www.astrolab.be

AstroLAB's Educatieve Serie

2

Licht in de Sterrenkunde

- Basiseigenschappen van het licht
- Talrijke URLs naar direct bruikbare en interactieve internetbronnen
- Talrijke toepassingen en oefeningen
- Hoe licht manipuleren met behulp van telescopen ?
- Hoe licht vastleggen met camera's ?

Ing. Philippe Vercoutter

AstroLAB's Educatieve Serie N° 2

Licht in de Sterrenkunde

Versie 0.3 – Alfa Versie
Laatste update: 29 November 2005

Foto-bijdrages van Sébastien Kersten, Bruno Nolf,
Wouter Devers en Philippe Vercoutter, ACG vzw

© 2005, ing. Philippe Vercoutter, AstroLAB *IRIS*, ACG vzw, Ieper, België

Heel wat wat we over verafgelegen sterren en sterrenstelsels weten is gebaseerd op het licht dat we er van ontvangen. Het is daarom van zeer groot belang de exacte natuur van het licht te begrijpen. Wat is het precies ? Welke soorten van licht bestaan er ? Hoe kunnen we het licht zo naar onze hand zetten dat we er voordeel en/of informatie kunnen uithalen ? Al deze vragen en veel meer worden op een bevattelijke en niet té theoretische manier behandeld in deze tweede educatieve brochure van de Project- en Volkssterrenwachten AstroLAB *IRIS*.

Ziet U foutjes, onnauwkeurigheden, enz. of hebt U specifieke vragen, aarzel dan zeker niet om de medewerkers van de Project- en Volkssterrenwachten AstroLAB IRIS te contacteren op info@astrolab.be .

Inhoudstafel

1. Licht 6

1.1. Basiseigenschappen van een golf 6

Sterrenkundige toepassing: een lichtjaar 7

1.2. Hoe verplaatst licht zich ? 10

1.3. Het electromagnetische spectrum 12

Soorten spectra: Emmissie- en Absorptiespectra 19

Verklaring voor de soorten spectra 20

Het electromagnetische spectrum van waterstof 21

Het Doppler-Effect 25

Het Doppler-Effect 25

Het Zeeman-Effect 26

Polarisatie van licht 30

1.4. Lichtintensiteit 33

Wet van de Lichtintensiteit 34

Hoeveel fotonen ontvangen we van een Ster ? 36

Magnitude van een Ster 36

1.5. Fraunhofer Diffractie van Licht 38

Diffractie bij een enkelvoudige spleet 39

Diffractie bij een cirkelvormige spleet: de Airy-schijf 41

Diffractie bij een dubbele spleet: interferentie 44

1.6. Refractie van Licht - Dispersie 46

De Refractie-Index n 46

De Wet van Snellius 48

1.7. De stralingswetten 49

De wet van Planck 49

De wet van Wien 51

De wet van Stefan-Bolzmann 51

Toepassing: Sterkleuren 52

1.8. Het fenomeen “Kleur” 54

De kleurendriehoek van James Clerk Maxwell 54

Het CIE kleurendiagramma 55

1.9. Licht in de Aardatmosfeer 57

De licht-doorlaatbaarheid van de Aardatmosfeer 57

De blauwe lucht 59

Waterdruppels in de lucht: regenbogen 61

Ijskristallen in de lucht: halo’s 65

Kleurenschifting door de aardatmosfeer 67

1.10. Manipulatie van Licht 69

Veranderen van lichtrichting (vlakke spiegels) 69

Concentreren van licht (holle spiegels) ... 72
- Sferische aberratie ... 73

Het breken van het licht (refractie) ... 74
Concentreren van licht (bolle lenzen) ... 75
- Principe van de bolle lens ... 75
- Voornaamste parameters van een bolle lens ... 76
- Toepassing: de Astronomische Telescoop (refractor) ... 77
- Chromatische aberratie ... 78

Divergeren van licht (holle lens) ... 80
Opsplitsing in monochromatisch licht (prisma's) ... 82
- Driehoekige prisma's ... 82
- Lichtbreking door een glasblok ... 83
- Vijfhoekige prisma's (Pentaprisma's) ... 84

Selectie van bepaalde golflengtes (kleurfilters) ... 85
- Monochromatische kleurfilters ... 85
- Terminologie voor filters ... 87
- Combineren van kleurenfilters ... 88
- Een speciaal type roodfilters: H-alfa filters ... 90
- Interferentiefilters ... 91

Het transporteren van licht (glasvezel) ... 92

2. Teleskooptypes ... 93

2.1. Terminologie ... 93
2.2. Basisfuncties van een telescoop ... 93
2.3. Kostprijs van een telescoop ... 94
2.4. Gewicht van een telescoop ... 95
2.5. Refractor ... 96
- Chromaat ... 96
- Achromaat ... 98
- Apochromaat ... 100

2.6. Newton ... 102
2.7. De klassieke Cassegrain ... 104
2.8. Schmidt-Cassegrain ... 104
2.9. Maksutov-Cassegrain ... 106
2.10. Ritchey-Chrétien ... 108
2.11. Gregory ... 108
2.12. Kutter Schiefspiegler ... 109
2.13. Fotografische lenzen ... 110

Over de resolutie van fotografische lenzen ... 110

3. Beelddetectoren ... 112

3.1. Het menselijk oog ... 112

De bouw van het menselijk oog ... 112
De beperkingen van het menselijk oog ... 118

De contrastgevoeligheid van het menselijk oog 119
3.2. Artificiële ogen voor stilstaande beelden 121
Analoge systemen: Film-emulsies 121
Digitale systemen: CCD's 122
- Basiswerking van een CCD 122
- Basiseigenschappen van een CCD-chip 124
- De spectrale gevoeligheid van een CCD chip 124
- Leveranciers van CCD-chips 125
- Kleurenchips 126
- Bit-diepte 128
- Ruis in CCD's 129
- Vergelijking van de CCD-chip & de CMOS 130
- Types van CCD-chips 130
- Vergelijking resolutie tussen digitale sensors & film 132
- Leveranciers 134

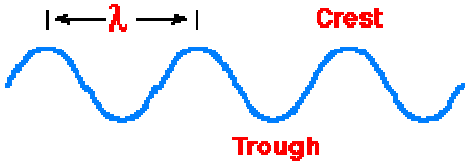
3.3. Artificiële ogen voor bewegende beelden 135
Analoge systemen: TV & video 135
- Basisconcepten 135
- Standaarden 137

Digitale systemen: Digital Video (DV) 143
Digitale systemen: Webcam 143
4. Appendix : Interessante Websites 145

1. Licht

1.1. Basiseigenschappen van een golf

Licht bestaat uit fotonen en vertoont zowel gedrag die normaal aan golven worden toegekend als aan deeltjes. Een golf wordt gekarakteriseerd door haar **golflengte λ** en haar **frekwentie f**.



Een golf vertoont **toppen** en **dalen** (in het Engels worden deze respectievelijk **crest** en **trough** genoemd).

De golflengte kan in volgende meeteenheden worden uitgedrukt:

Eenheden van golflengte		
Eenheid	**Symbool**	**Lengte**
centimeter	cm	10^{-2} meters
Angström	Å	10^{-8} centimeters
nanometer	nm	10^{-9} meters
micrometer	nm	10^{-6} meters

http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/waves.html

Tussen de golflengte en de frekwentie bestaat de volgende relatie:

$$c = \lambda \cdot f$$

Hierbij staat c voor de lichtsnelheid. Die is ongeveer gelijk aan 300.000 km/s en er wordt van aangenomen dat die constant is in het gehele heelal. De vergelijking laat duidelijk inzien dat wanneer de golflengte groter is, de frekwentie lager is.

De energiehoeveelheid van een golf kan worden berekend aan de hand van de volgende forumule:

$$E = h \cdot f$$

Hierbij staat h voor de **Constante van Planck**:

$$h = 4.135 \text{ x } 10\text{-}15 \text{ eV-sec} = 6.625 \text{ x } 10\text{-}27 \text{ erg-sec}$$

Of nog, door toepassing van bovenstaande formule:

$$E = h \cdot c / \lambda$$

Sterrenkundige toepassing: een lichtjaar

Wist U dat in de sterrenkunde men grote afstanden uitdrukt in **lichtjaren**? Eén lichtjaar is gelijk aan de afstand dat het licht aflegt gedurende precies één jaar. Laten we eventjes uitrekenen hoeveel deze afstand in kilometers bedraagt:

1) Gedurende één dag zijn er 24 * 60 * 60 = 86.400 seconden
2) Gedurende één dag kan een lichtstraal dus
   86.400 * 300.000 km/s = 25 920 miljoen km ≈ 26 miljard kilometer afleggen.
3) Gedurende één jaar, bestaande uit 365 dagen, zal een lichtstraal dus in totaal een afstand van 26 miljard km * 365 ≈ 9,5 triljoen km afleggen.

Oefening: Uit Educatieve Brochure Nr. 1 weten we dat de gemiddelde afstand tot de eerste ster, onze Zon, gemiddeld zo'n 150 miljoen kilometer bedraagt. Op welke afstand, uitgedrukt in licht-afstand, is dit ?

Antwoord: 150.10^6 / 300.10^3 km/s = 500 s ≈ 8 minuten. De Zon ligt dus op zo'n 8 minuten van de Aarde verwijderd. Ter informatie: de tweede dichtsbijzijnde ster ligt op maar liefst 4 lichtjaren van on verwijderd. Dit betekent dus dat wanneer we met een raket aan de lichtsnelheid zouden kunnen vliegen naar deze ster, Proxima Centauri geheten, we maar liefst 4 jaren onderweg zouden zijn. Denk ook even na over het volgende: wanneer we de Zon bekijken hier op Aarde, dan zien we haar niet zoals die nù op dit moment is, maar wel het beeld dat ze zo'n 8 minuten geleden uitstraalde. In feite kunnen we dus eigenlijk bepaalde zaken in het heelal waarnemen zoals die zich in het verleden voordeden. Bij de Zon is dit fenomeen tamelijk beperkt, maar bij veraf gelegen sterren en melkwegstelsels kan men soms tot wel enkele miljarden jaren geleden in de tijd kijken.



http://www.anzwers.org/free/universe/

An Atlas of *The Universe* geeft een mooi grafisch overzicht over de verschillende afstanden in ons heelal. De lezer zal merken dat alle afstanden op deze webstek zijn uitgedrukt in lichtjaren (*light years* in het Engels).

Oefening: Zoek op deze website even de ster Proxima α Centauri op.

*Antwoord: Op de webpagina http://www.anzwers.org/free/universe/nearstar.html vindt U een overzichtelijke tabel met alle dichtste sterren op vermeld. In de kolom Dist (ly) vindt U dat de afstand tot Proxima α Centauri zo'n 4.22 lichtjaren bedraagt. In het Engels wordt een **light year** afgekort door **ly**.*

<u>Oefening:</u> De afstand Zon-Aarde wordt ook de **Astronomische Eenheid** genoemd (en afgekort als AE). Kunt U berekenen hoeveel Astronomische Eenheden passen in één lichtjaar?

Antwoord: In één lichtjaar kan 9.5 triljoen kilometer worden afgelegd. Eén AE is gelijk aan 150 miljoen kilometer, zijnde de gemiddelde afstand Zon-Aarde. Delen we beide zaken door elkaar dan zien we dat één lichtjaar gelijk is aan 63.333 AE. Afgerond kunnen we dus stellen dat 1 lichtjaar ongeveer gelijk is aan zo'n 63 duizend Astronomische Eenheden.

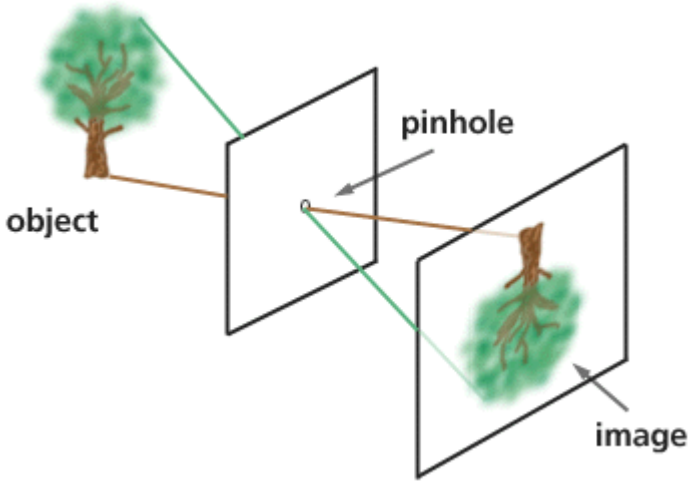
1.2. Hoe verplaatst licht zich ?

In principe verplaatst licht zich **rechtlijnig**. Dit wil zeggen dat wanneer licht geen enkel andere materiesoort ontmoet dan deze waarin het zich op dat moment verplaatst haar richting steeds rechtdoor is en altijd zal zijn.



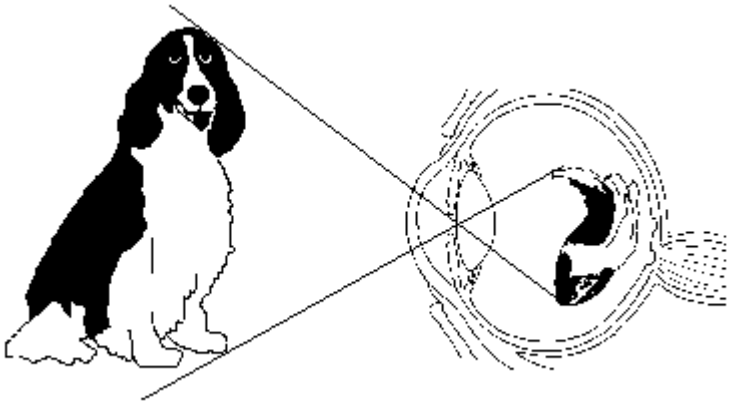
Deze opname werd op 25 Juni 2004 omstreeks 21h bij AstroLAB IRIS gemaakt (Ieper, België). De lichtstralen vertrekken allen vanuit de Zon, onze dagster. De foto illustreert heel duidelijk dat licht zich rechtlijnig voortbeweegt. (© 2004, Philippe Vercoutter)

Toepassing: Bekijk even het onderste plaatje: in een blad papier maken we piepklein gaatje. Op een bepaalde afstand plaatsen we vervolgens een projectieschermpje. We merken dat op het scherm het object, in dit geval een boom, omgekeerd zal geprojecteerd staan. Om dit te begrijpen dien je enkel en alleen een aantal lichtstralen die op het object worden gereflecteerd te verbinden met het centrale gaatje (*pinhole* genoemd in het Engels). Dat weet je meteen in welke richting de lichtstraal op het schermpje zal geprojecteerd worden. Doe je dit voor verschillende lichtstralen, dan zul je merken dat het bewuste object omgekeerd geprojecteerd zal staan op het schermpje. Dit alles is dus gewoon het gevolg van de rechtlijnige beweging van het licht. Deze test illustreert het basisprincipe van de **camera obscura** (en zeg maar ook in één adem: het **fototoestel**).



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/lightpath/lightpath.shtml

Toepassing uit de sterrenkunde: het licht afkomstig van sterren. Een ster kun je van op een grote afstand beschouwen als een puntvormige lichtbron. Vanuit deze lichtbron zal het licht zich dus rechtlijnig verplaatsen in alle mogelijke richtingen. Dicht bij dit object zal het lichtfront (wavefront) gebogen zijn, maar naargelang we ons verder en verder verwijderen van de lichtbron zal men het golffront alsmaar meer als vlak kunnen beschouwen. Dit is zeker het geval met sterlicht dat onze Aarde bereikt. We weten uit het voorgaande immers al dat de sterren zodanig ver zitten, dat het lichtfront van die ster dat ons bereikt als perfect vlak mag worden beschouwd.



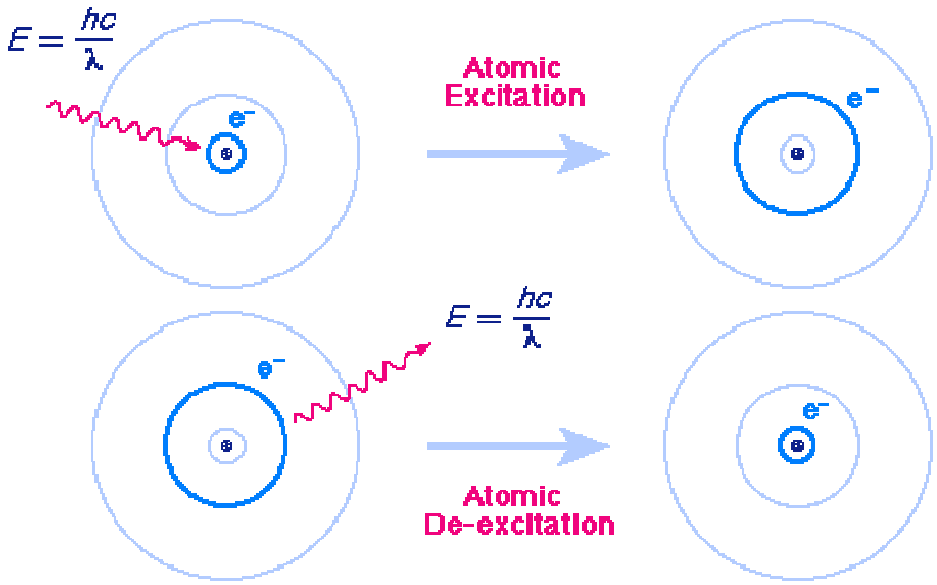
http://www.yorku.ca/eye/toc-sub.htm
Ook ons oog keert de wereld om!

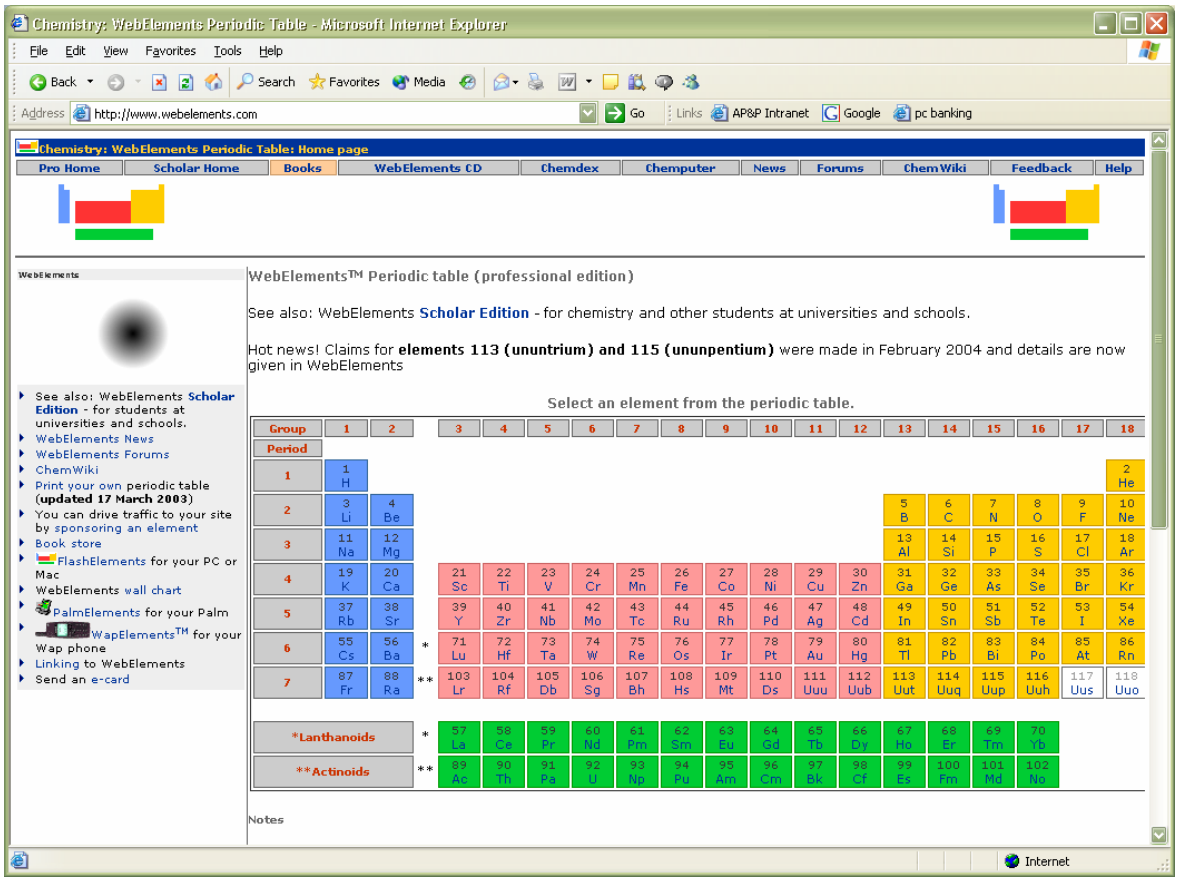
1.3. Het electromagnetische spectrum

Elk **atoom** bestaat uit een kern en één of meerdere **electronen** diezich rond die atoomkern bewegen. Zo heeft het chemische element waterstof, afgekort als H, precies één electron. Het tweede chemische element uit de zogeheten Tabel van Mendeleev, is Helium. Dit element bezit 2 electronen. Zo kunnen we deze tabel van chemische elementen verder aflopen: zo bestaan er atomen die precies over 4, 5, 6, ... electronen beschikken.

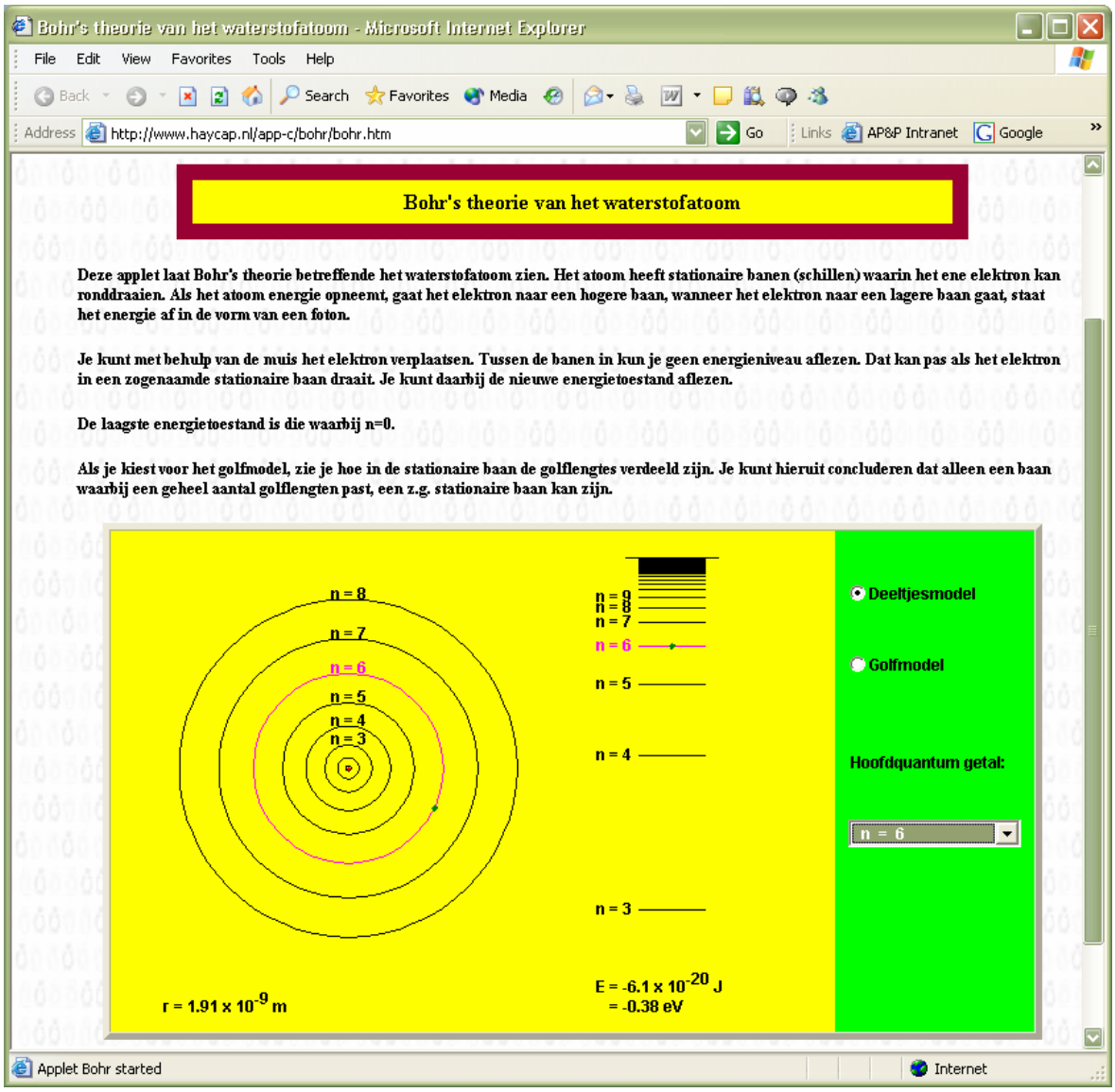
Alle materie van het Heelal komt voor onder de vorm van de volgende 5 stabiele **elementaire deeltjes**: electronen, **protonen**, **neutronen**, **neutrino**'s en **fotonen**. Protonen zijn positief geladen, electronen negatief. Alle *zichtbare* materie bestaat uit electronen, protonen en neutronen. De twee andere elementaire deeltjes, neutrino's en fotonen dus, ontstaan door interactie tussen electronen, protonen en neutronen. Deze interacties ontstaan door dé vier zogeheten **fundementele natuurkrachten**: **de zwakke en sterke kernkracht, het electromagnetisme en de zwaartekracht (gravitatie)**.

Alle electronen van een atoom draaien in welbepaalde banen rond de atoomkern. Elk van deze banen stemt overeen met een bepaalde energie-inhoud. Wanneer een electron van een baan met een hogere energie-inhoud valt naar een baan met een lagere energie-inhoud, dan komt hierbij een foton vrij. Op dezelfde manier kan een electron door het invangen van een foton van een baan met lagere energie-inhoud naar een baan met hogere energie-inhoud gaan. We zeggen dan dat het atoom geëxciteerd is.

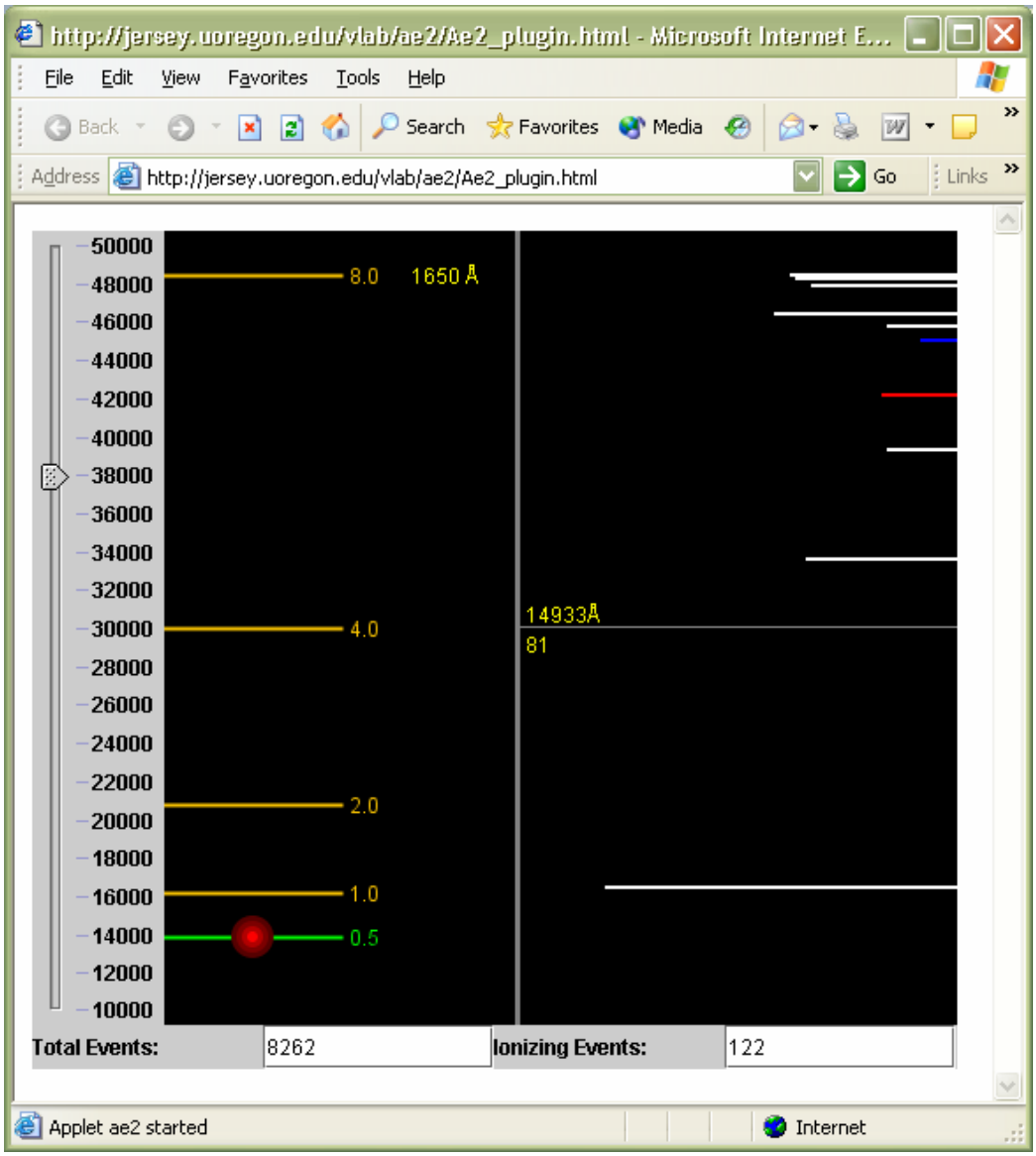




http://www.webelements.com
Op deze website vindt de lezer een volledig overzicht van alle atomen die men op vandaag kent. Wil je meer informatie over een bepaald atoom, klik gewoon op het desbetreffende symbooltje. Informatie over het waterstof-atoom, voorgesteld door het symbool H, vind je bijvoorbeeld hier http://www.webelements.com/webelements/elements/text/H/key.html .



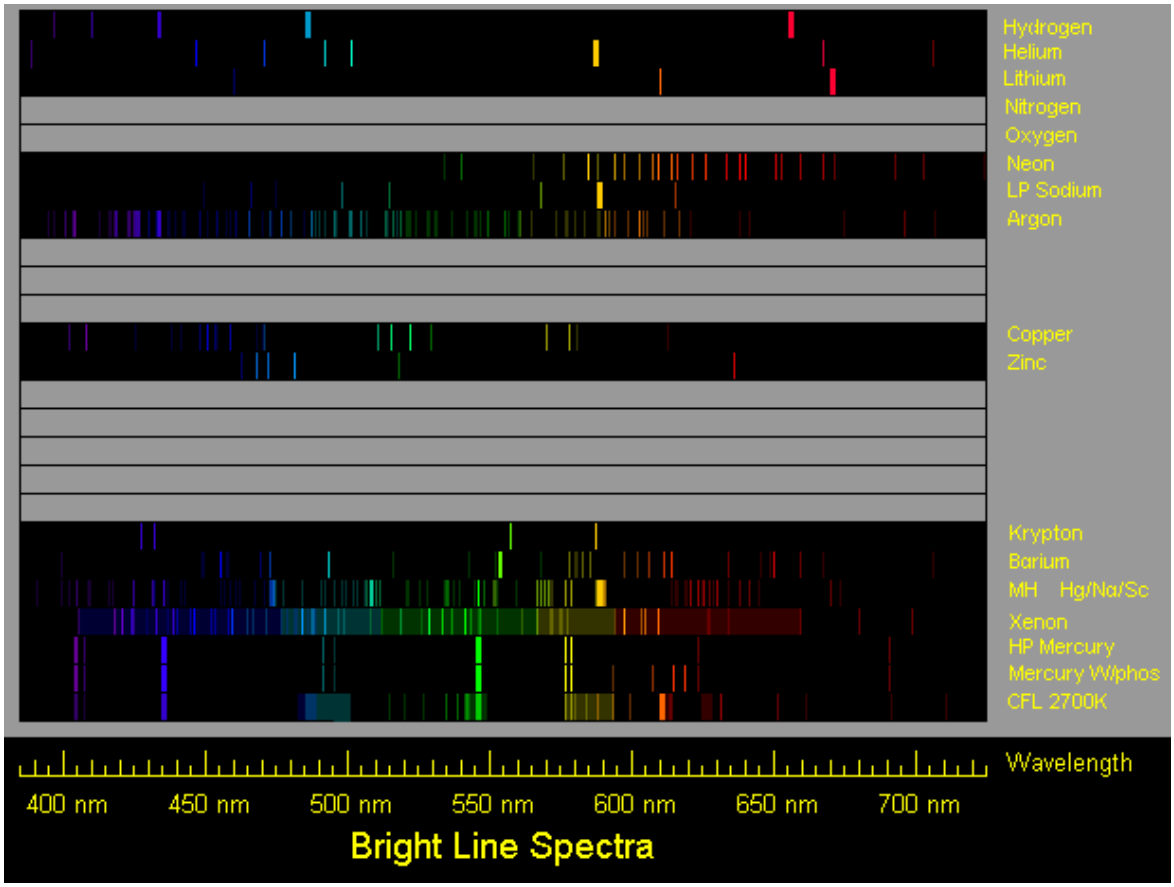
http://www.haycap.nl/app-c/bohr/bohr.htm
Deze JAVA applet laat toe modellen van eenvoudige atomen voor te stellen. Centraal staat de atoomkern die positief geladen is. Daarrond draaien één of meerdere negatief geladen electronen. Iedere electronenbaan stemt overeen met een bepaalde energie-inhoud. In dit model kan men een electron van baan laten veranderen en zien wat er vervolgens gebeurt.



http://jersey.uoregon.edu/vlab/ae2/Ae2_plugin.html

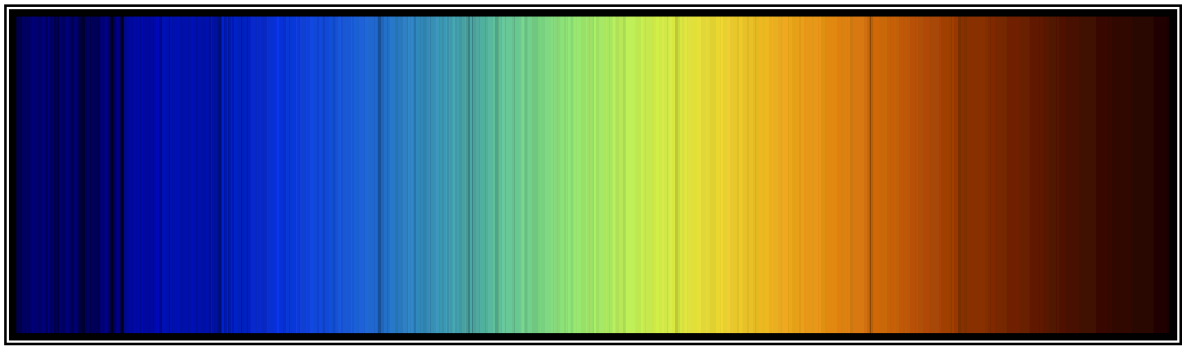
Deze JAVA applet toont aan de gebruiker de verschillende energieniveau's van een atoom. Met de muis kun je een electron vastnemen en verslepen naar een hoger niveau. Dit electron zal dan terugvallen naar haar grondniveau. Dit terugvallen gebeurt volgens bepaalde waarschijnlijkheidscenario's. Telkenmale een electron opnieuw een lager niveau bereikt zal een foton worden afgegeven. De applet zal proberen om de golflengte van dit foton (zeg maar de kleur) te bepalen en zal dit rechts op het scherm tonen. Bijvoorbeeld: indien de golflengte van het foton tussen de 4.000 en 5.000 Angström ligt dan correspondeert dit met blauw licht. Het programma zal honderden scenario's voor dit terugvallen simuleren en aldus kun je goed zien welk soort van lijnen in het spectrum worden gegenereerd.

Ieder atoom kan slechts welbepaalde lichtsoorten, overeenstemmend met een bepaalde golflengte en frekwentie, opnemen of afgeven. Onderstaande figuur toont op een overzichtelijke manier aan welke lichtsoorten (zeg maar kleuren) door welke atomen worden afgegeven.



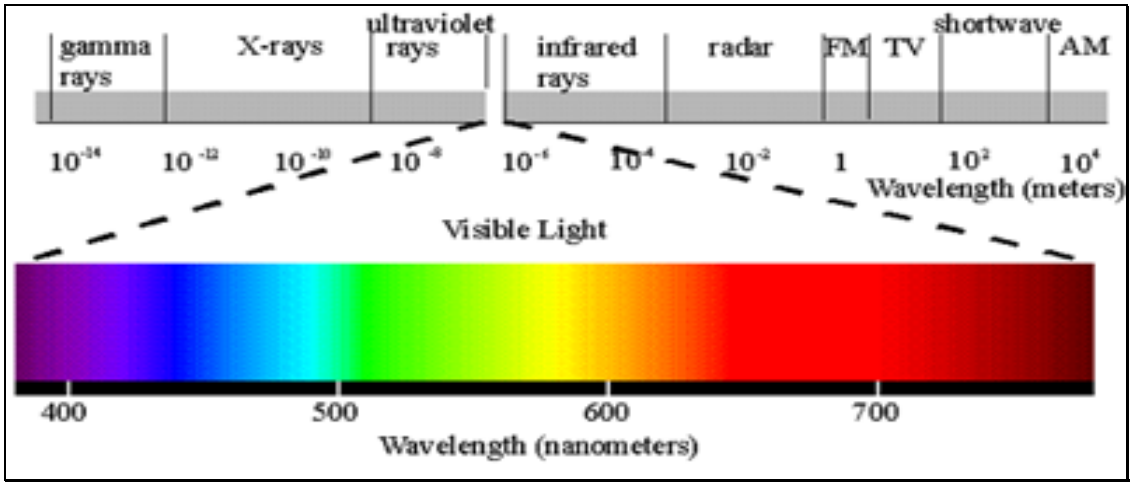
(C) Donald L. Klipstein 1997, 1998, 1999 - http://members.misty.com/don/spectra.html

Nemen we nu een grote gasbol, zoals bijvoorbeeld onze Zon, dan zullen alle aanwezige atomen, **ionen** (dit zijn atomen met één of meerdere electronen teveel of te weinig in vergelijking met hun normale *evenwichtstoestand*) samen een hele reeks van lichtsoorten afgeven. Wij nemen dit dan waar als een **continu spectrum**.


Voorbeeld van een zonnespectrum met haar typische absorptie- en emissielijnen.

Kijken we aandachtig toe naar het bovenstaande spectrum van de Zon, dan merken we lijntjes op. Deze lijnen noemen we Fraunhofer-lijnen. Ze ontstaan doordat welbepaalde atomen op de Zon lichtdeeltjes van een bepaalde golflengte opnemen en/of opnieuw afgeven. Door nauwkeurig deze lijntjes in het zonnespectrum te bestuderen kan men te weten komen welke chemische elementen precies deze **lichtabsorptie of emissie** hebben veroorzaakt. Het is op deze manier dat sterrenkundigen te weten komen welke elementen voorkomen in de atmosfeer van een ster.

Laten we duidelijk zijn: als we tot nog toe hebben gesproken van 'het' spectrum, dan hebben we het eigenlijk nog maar slechts gehad over het 'zichtbare' spectrum. Onze ogen kunnen slechts een bepaald gebied van het gehele spectrum waarnemen. **Infra-rood straling**, zeg maar warmtestraling, kunnen we zonder extra hulpmiddelen niet zien maar wel als warmte *voelen*. We *weten* dus op die manier dat er wel degelijk nog andere stralingen bestaan. Net zoals onze huid warmtestraling kan opvangen, bestaan er diverse andere soorten van apparatuur waarmee men de rest van het spectrum kan waarnemen. Hieronder ziet de lezer een overzicht van het gehele spectrum.



http://www.yorku.ca/eye/spectru.htm
Web-boek: "**The Joy of Visual Perception**" (by Prof. Peter Kaiser).

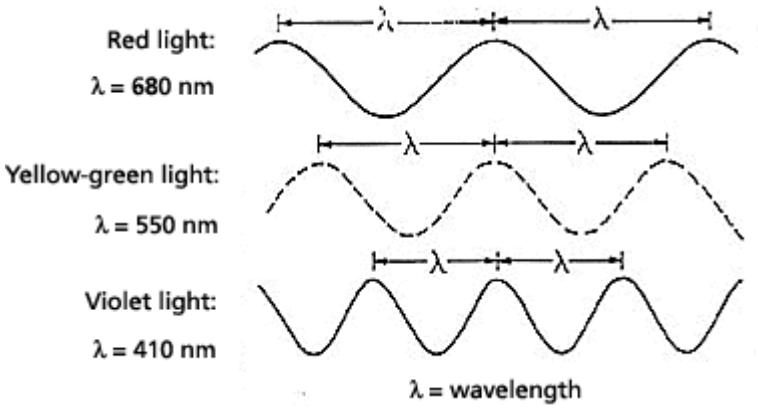
☞ Hoe kan ik de volgorde van de regenboogkleuren onthouden ?

Onthou gewoon het letterwoordje ROGGBIV (gelijkt een beetje op 'rosbief'):

R	staat voor **R**ood
O	staat voor **O**ranje
G	staat voor **G**eel
G	staat voor **G**roen
B	staat voor **B**lauw
I	staat voor **I**ndigo (de benaming van deze kleur is wel een beetje in onbruik geraakt)
V	staat voor **V**iolet

De verschillende soorten Electromagnetische Straling				
Gebied	**Golflengte (Angstroms)**	**Golflengte (centimeters)**	**Frekwentie (Hz)**	**Energie (eV)**
Radio	$> 10^9$	> 10	$< 3 \times 10^9$	$< 10^{-5}$
Microgolf	$10^9 - 10^6$	10 - 0.01	$3 \times 10^9 - 3 \times 10^{12}$	10^{-5} - 0.01
Infrarood	10^6 - 7000	$0.01 - 7 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{12} - 4.3 \times 10^{14}$	0.01 - 2
Visibel	7000 - 4000	$7 \times 10^{-5} - 4 \times 10^{-5}$	$4.3 \times 10^{14} - 7.5 \times 10^{14}$	2 - 3
Ultraviolet	4000 - 10	$4 \times 10^{-5} - 10^{-7}$	$7.5 \times 10^{14} - 3 \times 10^{17}$	$3 - 10^3$
X-Stralen	10 - 0.1	$10^{-7} - 10^{-9}$	$3 \times 10^{17} - 3 \times 10^{19}$	$10^3 - 10^5$
Gamma Stralen	< 0.1	$< 10^{-9}$	$> 3 \times 10^{19}$	$> 10^5$

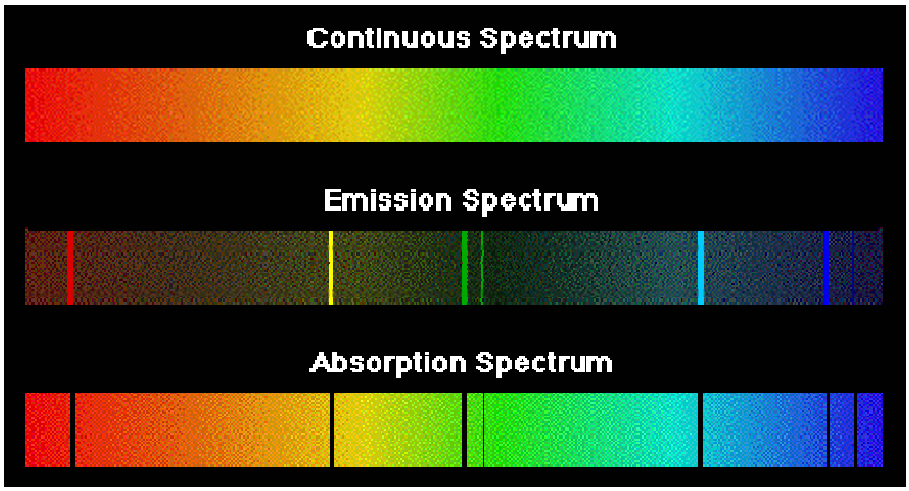
Deze tabel geeft een overzicht van de voornaamste golflengtebereiken en hun voornaamste eigenschappen. (http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/spectrum.html *)*



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/color/color.shtml

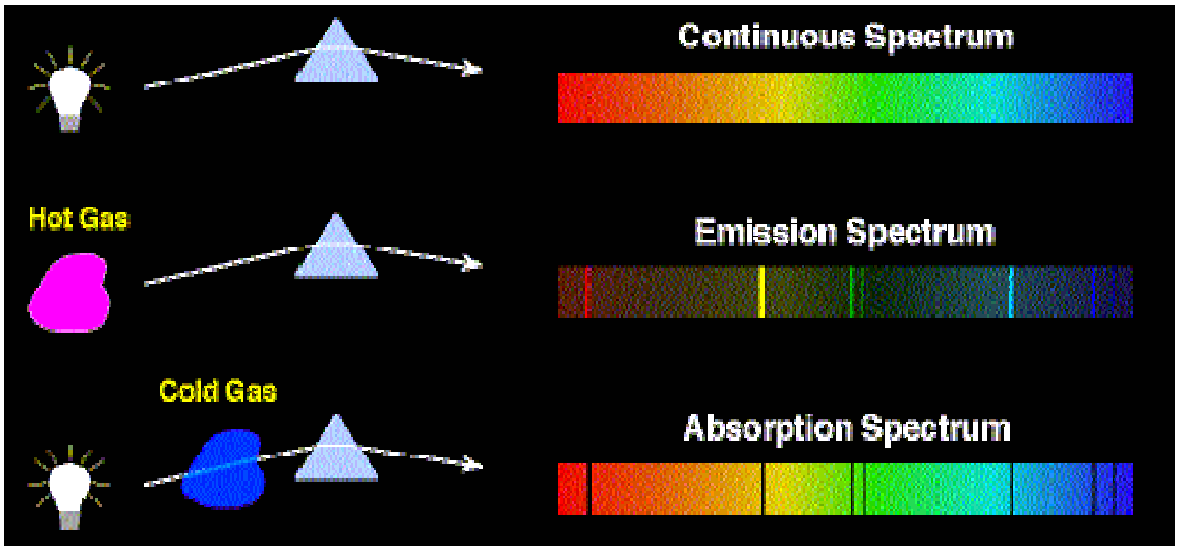
Soorten spectra: Emmissie- en Absorptiespectra

Normaal gezien zal een gasvormig lichaam een continu spectrum geven: alle golflengten komen aan bod. Bij een **emissie-spectrum** zal men opmerken dat slechts een aantal spectraallijnen heel goed uit uiting komen. Bij een **absorptie-spectrum** daarentegen zal men zien dat uit het continue spectrum een aantal lijnen zijn verdwenen.



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/absorption.html

Verklaring voor de soorten spectra

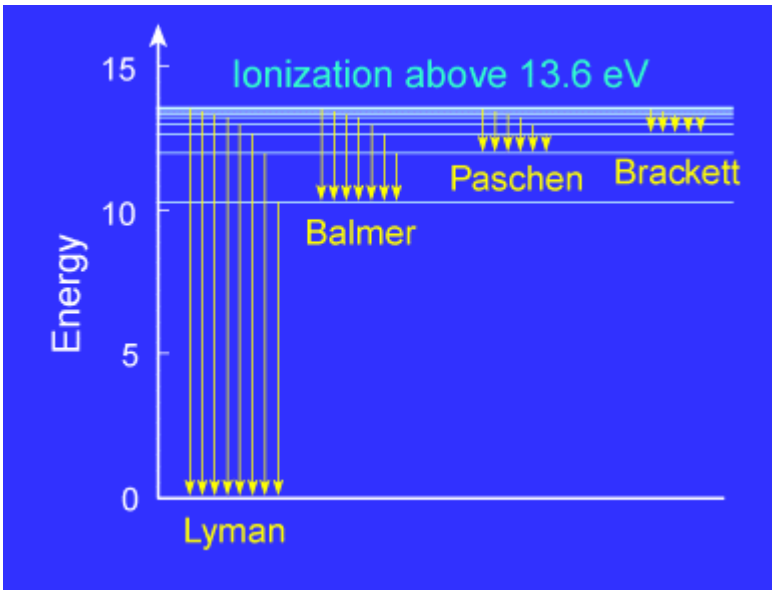


Een emissie-spectrum ontstaat meestal in ijle gassen. Het spectrum bestaat dan enkel en alleen uit licht dat wordt uitgestraald door bepaalde atomen wanneer die energie afgeven als electronen naar een lagere energiebaan terugvallen.

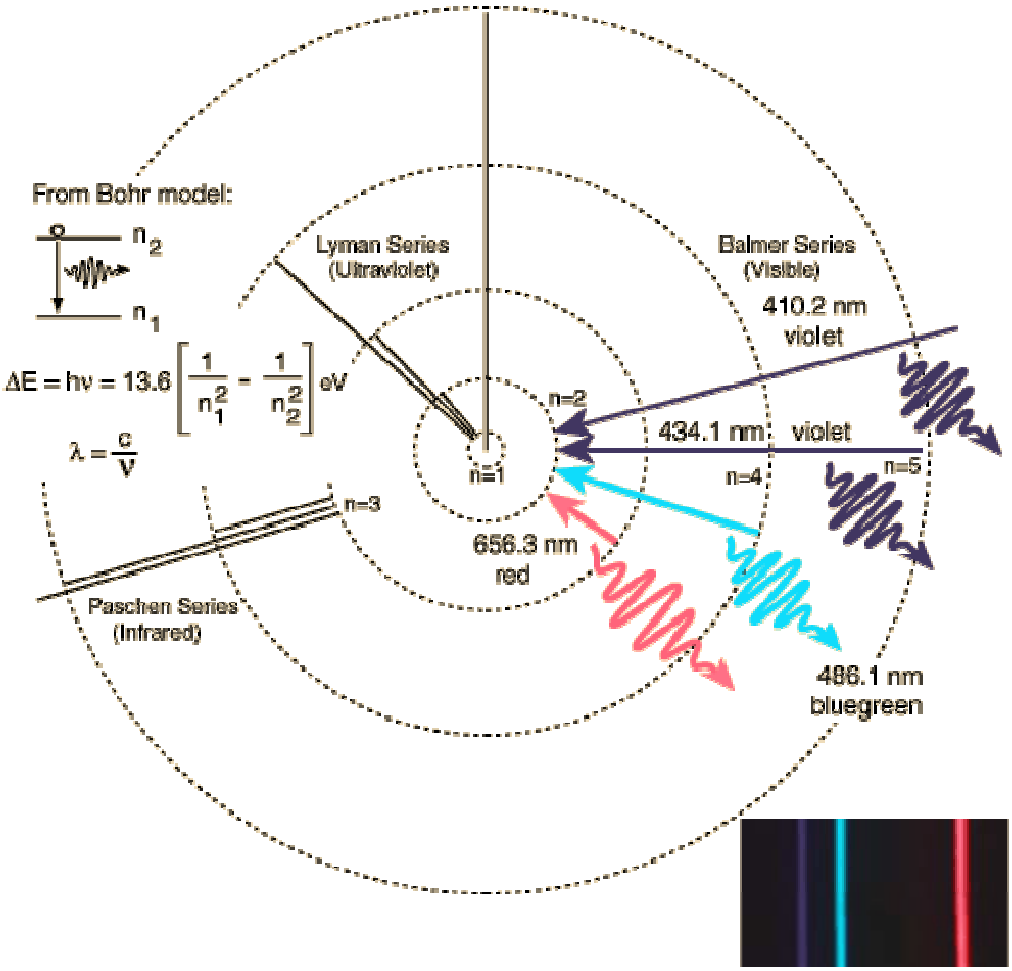
Een absorptiespectrum ontstaat wanneer licht afkomstig van een ster bijvoorbeeld gedeeltelijk wordt opgenomen door de atomen in een kouder gas. Deze atomen filteren als het ware het sterlicht. Uit de lijntjes die men dan in het spectrum opmerkt kan men de samenstelling van de koude(re) gaswolk afleiden.

Het electromagnetische spectrum van waterstof

Waterstof is het lichtste atoom dat bestaat. Voor sterrenkundigen is dit één van de belangrijkste atomen uit het Heelal aangezien dit het meest voorkomende element is. Vanwege dit belang zullen we dit atoom eventjes van naderbij bekijken. Meer nog: we gaan vooral de verschillende soorten van waterstof bekijken en het licht dat door die soorten van waterstof wordt uitgestraald of geabsorbeerd.



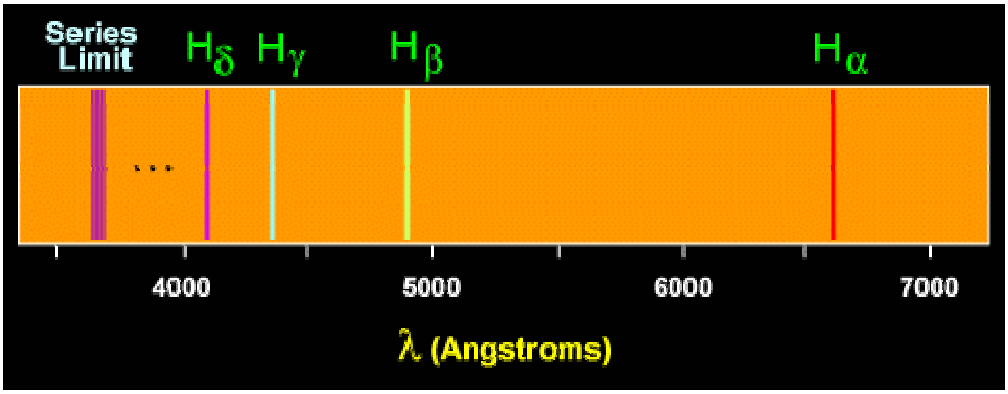
Het waterstofatoom kan zich in welbepaalde toestanden bevinden. Emissie- en absorptieprocessen in het waterstofatoom resulteren in welbepaalde reeksen (*series* genoemd in het Engels) licht. Ieder van deze reeksen start of eindigt bij een welbepaalde toestand van het waterstofatoom.



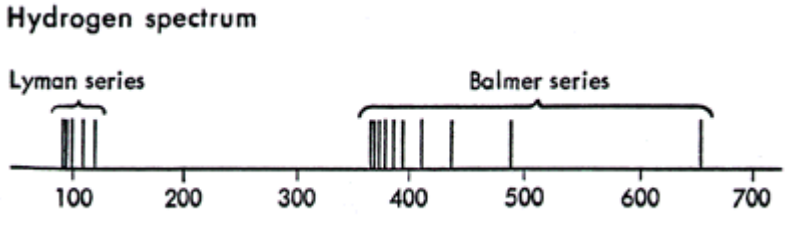
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html

Zo bijvoorbeeld start de **Balmer-reeks** bij de eerste geëxciteerde toestand van waterstof. De **Lyman-reeks** daarentegen start of eindigt bij de grondtoestand van waterstof. Zo bestaan er nog andere reeksen van spectrumlijnen die passen bij andere toestanden van waterstof: de **Paschen-reeks** en de **Brackett-reeks**. Door de structuur van het waterstofatoom ligt de Balmer-reeks in het visuele lichtbereik, terwijl dat de Lyman-reeks zich volledig in het Ultra-Violet gedeelte van het spectrum ligt. Besluit: een overgang van een electron naar de basistoestand van het waterstofatoom kan nooit in het visuele licht worden waargenomen. Wat we wel kunnen zien in het visuele spectrum zijn de Balmer-lijnen. Onderstaande figuur geeft de diverse Balmer-lijnen aan: we noemen ze respectievelijk **H-α**, **H-β**, **H-γ**, enz. Bermerk dat de Balmer-reeks, dus net zoals iedere andere lijnenreeks, een absolute bovengrens heeft van golflengte.

Johann Balmer was een wiskundige die in 1885 de formules voor de golflengtes wist te bepalen. Theodore Lyman was diegene die in 1905 de violette reeks van waterstof-lijnen ontdekte.

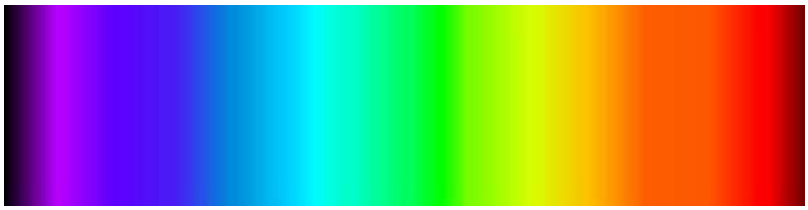


Het Balmer spectrum van waterstof.
http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/absorption.html

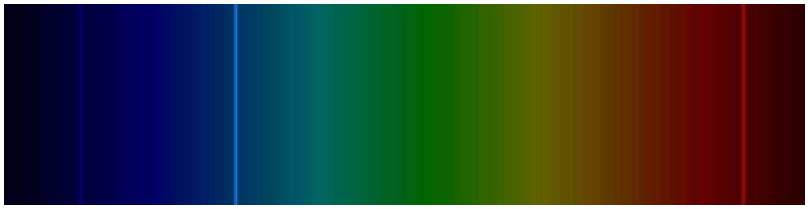


http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/electrons/electrons.shtml#2

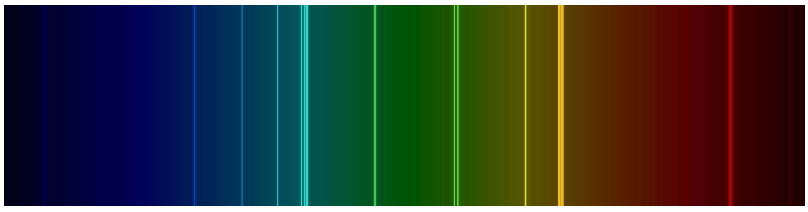
Spectrum van wit licht



Het spectrum van waterstof



Ter vergelijking: het spectrum van Koolstof



http://www.le.ac.uk/physics/faulkes/web/telescopes/y_te_detectors.html

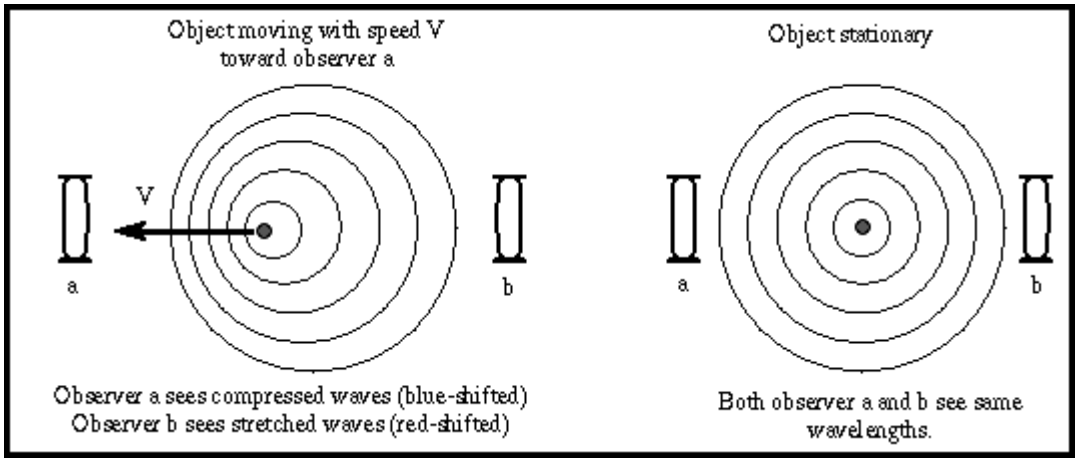
H-α (H-alfa) licht speelt een zeer belangrijke rol in de sterrenkunde: het is één van de spectraallijnen die vrijkomen wanneer waterstof van zijn rusttoestand gaat naar de eerste geëxciteerde toestand. Dit is een van de redenen waarom met nogal wat waarnemingen probeert te doen specifiek in dit golflengtebereik van H-α. Op AstroLAB IRIS bijvoorbeeld wordt de Zon veelvuldig in H-α licht waargenomen. De exacte golflengte van H-α licht is 6562.8 Angström. Het ligt in het rode gebied van het spectrum. H-α is dus een specifiek soort van rood licht.



Deze opname van de Zon in H-alfa licht werd door AstroLAB IRIS lid Sébastien Kersten op 21 mei 2004 gemaakt. In H-alfa ziet de Zon er normaal rood uit maar door speciale digitale beeldbewerkingstechnieken wordt dit specifieke rood omgezet naar oranje. In H-alfa zijn zaken te zien die in het gewone licht onzichtbaar blijven zoals bijvoorbeeld daar zijn protuberansen (uitbarstingen te zien aan de rand van de Zon) en filamenten (dit zijn protuberansen waar we recht op kijken boven het zonneoppervlak).

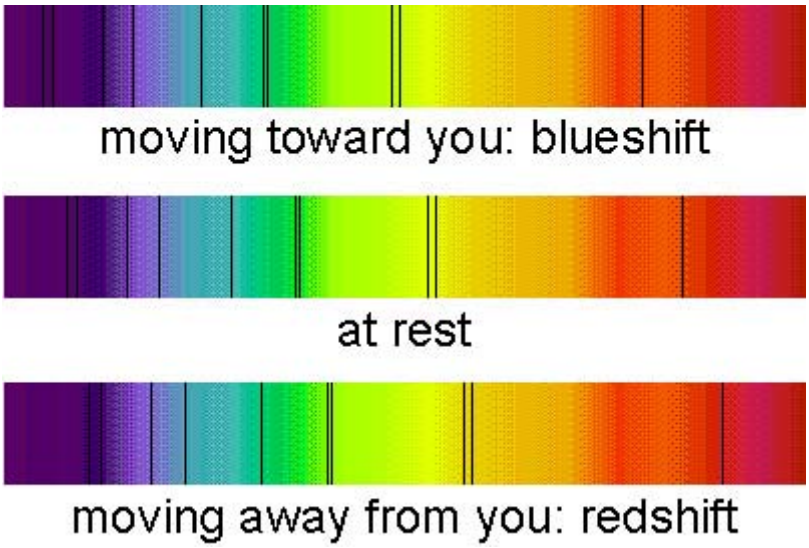
Het Doppler-Effect

Indien een lichtbron zich van ons af beweegt of naar ons toe, dan zullen we de lijntjes in het spectrum wat verschoven zien. In het geval de lichtbron zich van ons af beweegt zullen deze lijntjes allemaal wat naar het rode gedeelte van het spectrum zijn verschoven. Dit noemen we **de roodverschuiving of het Doppler-Effect**. In het geval de lichtbron zich naar ons toe beweegt zullen we net het tegenovergestelde zien: de lijntjes zullen een **blauwverschuiving** vertonen.



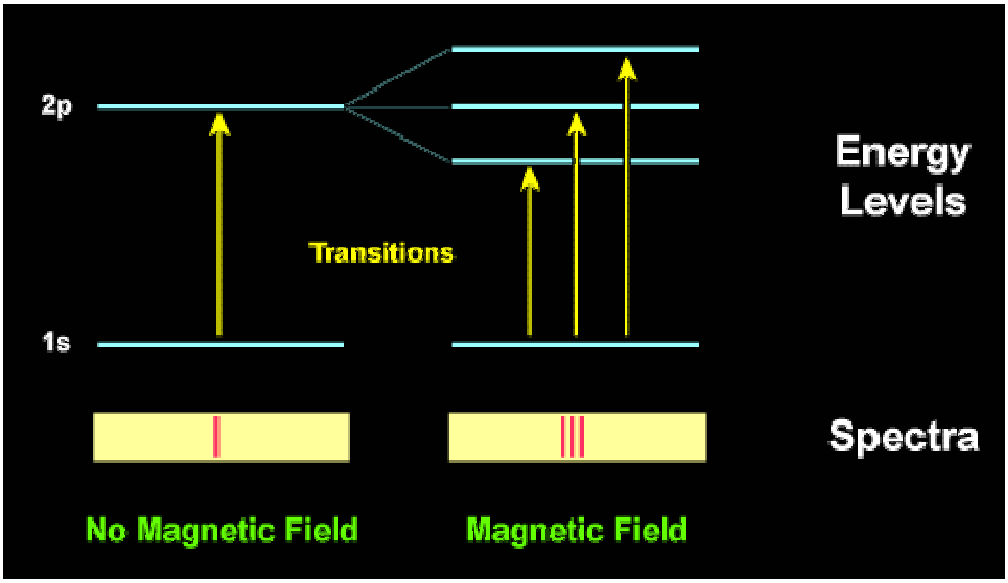
http://www.astronomynotes.com/light/s10.htm

Uit de mate van verschuiving van een bepaalde spectraallijn kan men afleiden met welke snelheid een ster of sterrenstelsel zich van ons af beweegt of naar ons toe komt.



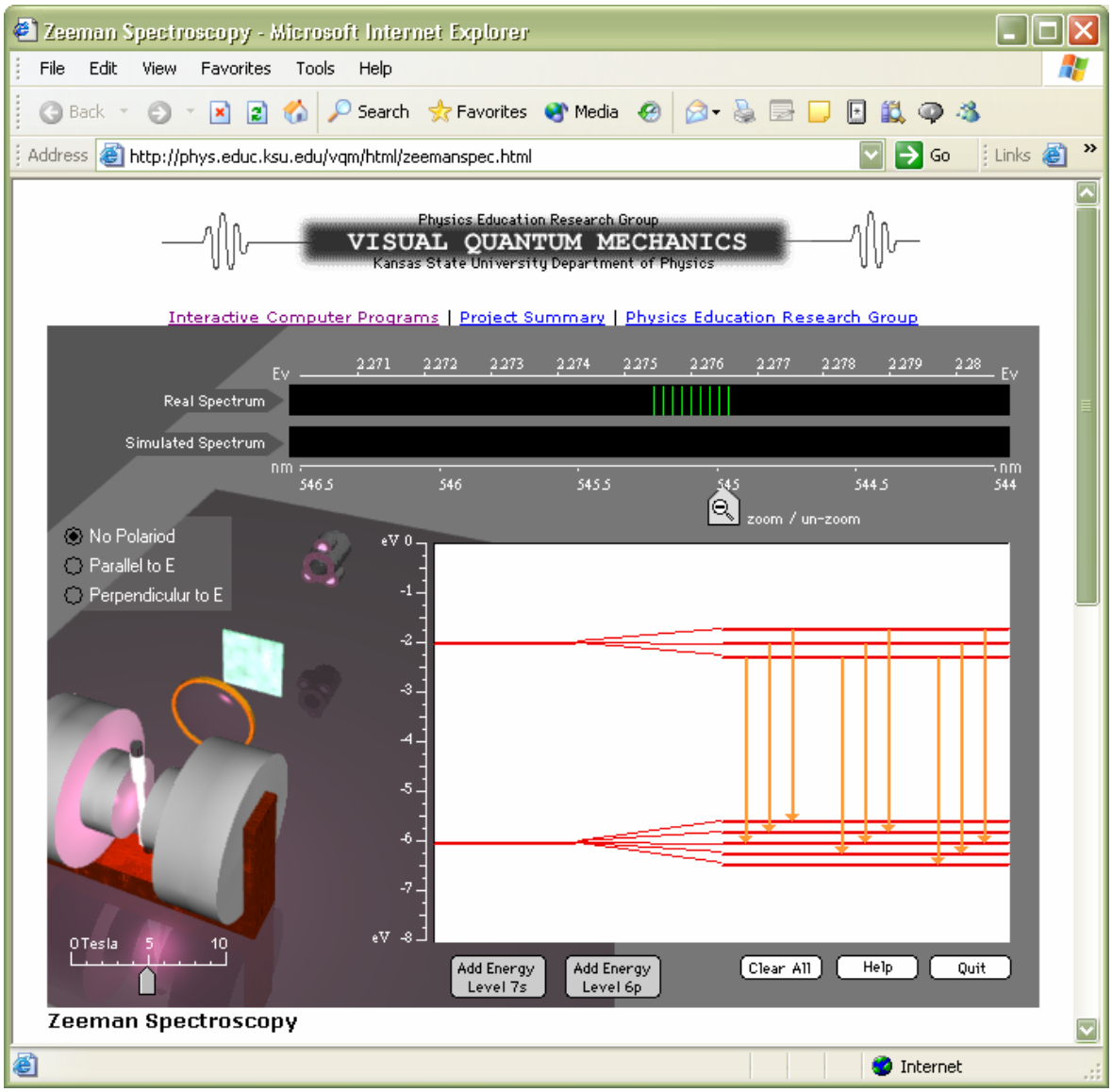
Het Zeeman-Effect

Tot op dit ogenblik hebben we eigenlijk nog niet gesproken over magnetische velden. Wanneer een atoom zich in een magnetisch veld bevindt, dan splitsen de verschillende energieniveau's van dit atoom zich in véél meer energieniveau's dan gebruikelijk en splitsen de spectraallijnen zich zelfs! Deze splitsing noemen we het **Zeeman-effect**.



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/zeeman-split.html

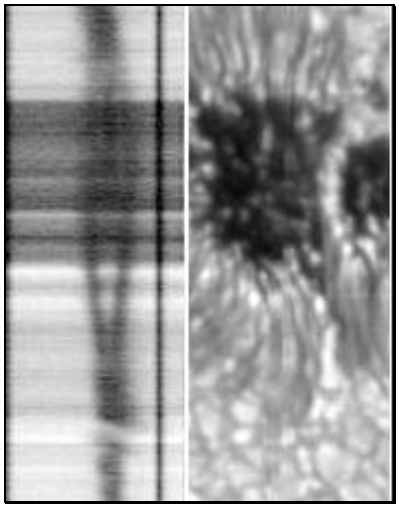
Omgekeerd kan men, wanneer men in een spectrum ziet dat bepaalde spectraallijnen zijn geplitst in twee of meerdere lijnen, afleiden dat de atomen die deze lijnen uitstralen zich in een magnetisch veld bevinden.



http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/zeemanspec.html

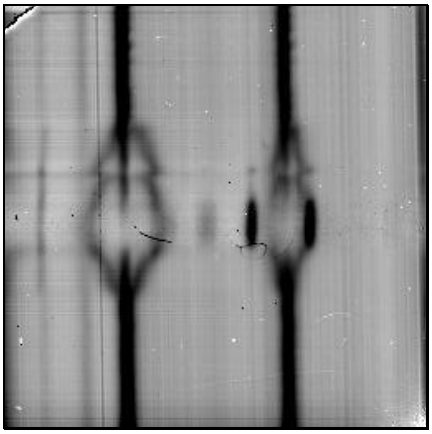
Voorbeeld uit de sterrenkunde

Een voorbeeld zijn de sterke magnetische velden van zonnevlekken. Wanneer men het spectrum van licht afkomstig van een zonnevlek bekijkt dan merkt men de splitsing van bepaalde spectraallijnen onmiddellijk op. Dit komt doordat er zich bijzonder sterke magneetvelden bevinden in een zonnevlek.



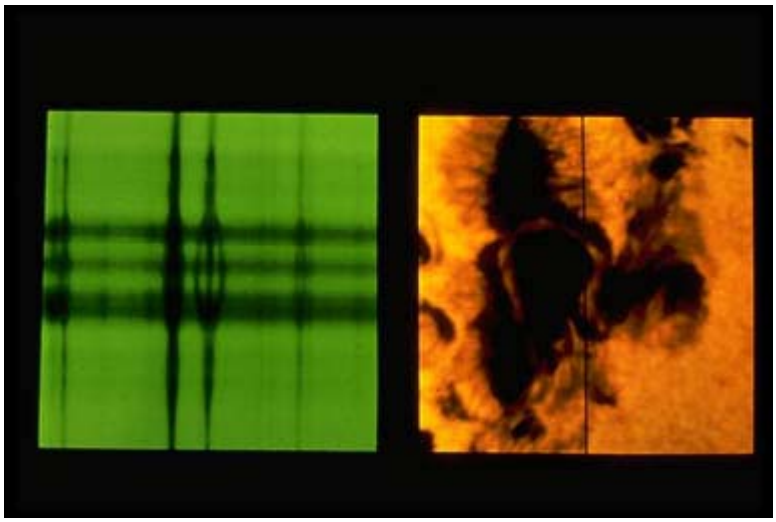
Splitsing van een absorptie-spectrallijn (het Zeeman-effect) door de sterke magnetische velden die in een zonnevlek aanwezig zijn. Merk op dat de splitsing het grootst is in het centrum van de zonnevlek (umbra) omdat daar het magnetische veld het sterkst is.

http://science.msfc.nasa.gov/ssl/pad/solar/suntime/slshow8.stm



De mate van splitsing van de twee Zeeman sigma componenten van de Fe I spectraallijn is een maat voor de totale magnetische veldsterkte in de zonnevlek.

© NSO ("**Magnetic** Signature in Ca II 854.2nm Downflow", PPT, 13 November 2002)

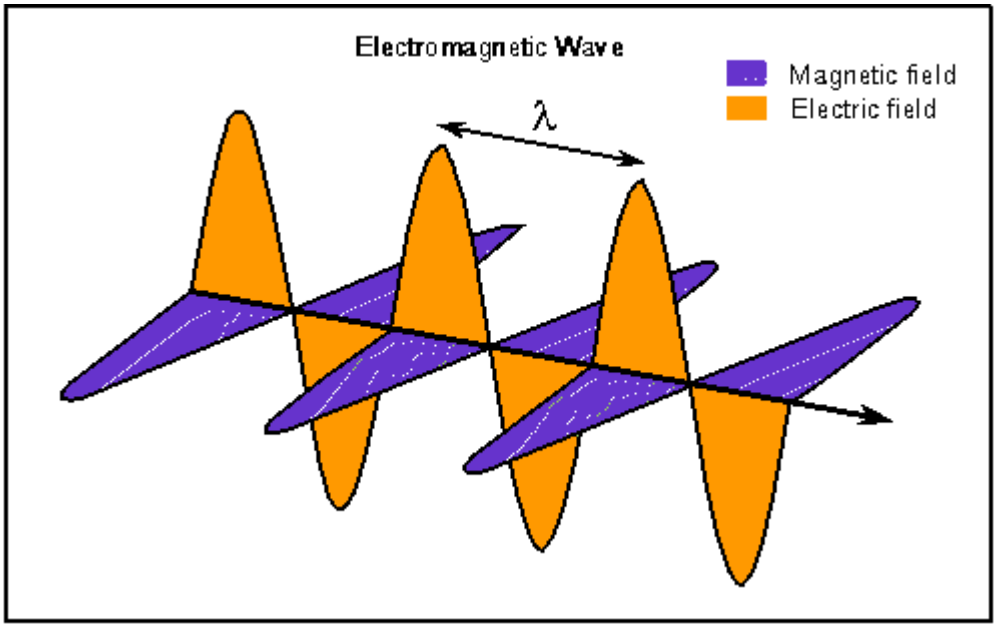


Courtesy of the National Optical Astronomy Observatories (NOAO)
http://ase.tufts.edu/astroweb/print_images.asp?id=26

Polarisatie van licht

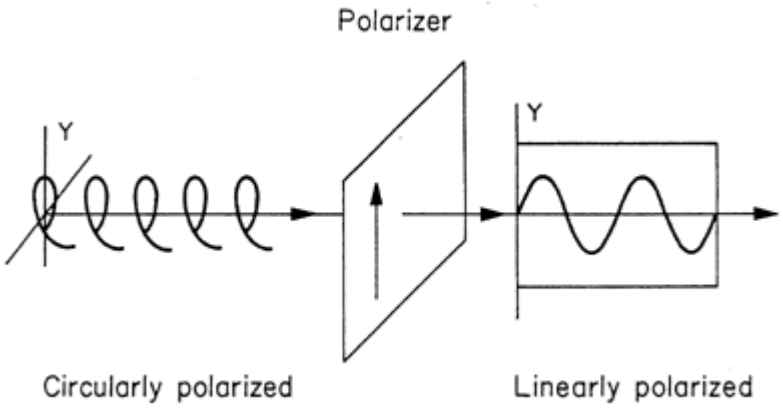
Licht trilt in verschillende vlakken. Sedert het begin van de 19-de eeuw weet men dat elektrische en magnetische velden hand in hand gaan. Het is onmogelijk het ene van het andere te scheiden: heb je een bewegende lading, dan heb je onmiddellijk een magnetisch veld. Heb je een verandering in het magnetische veld, dan heb je stroom. Magneten bijvoorbeeld bestaan eigenlijk uit atomen waar heel kleine electrische stroompjes in lopen.

Maxwell was de wetenschapper die voor het eerst zei dat licht eigenlijk een **electrogmagnetische golf** is. Het magnetische veld staat loodrecht op het electrische veld. Het licht zelf beweegt zich voort in een richting die nog eens loodrecht staat op zowel het magnetische als het electrische veld. Licht, electriciteit en magnetisme zijn eigenlijk manifestaties van *iets* dat we **electromagnetische straling** noemen.



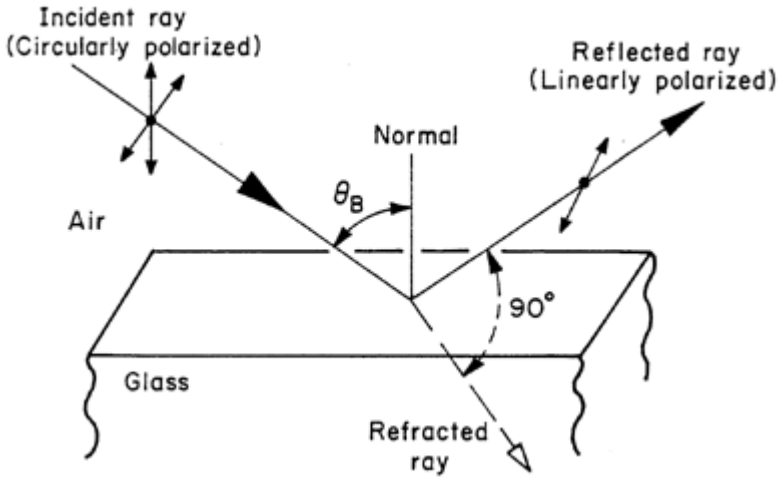
http://www.astronomynotes.com/light/s2.htm
© by Nick Strobel (see www.astronomynotes.com)

Wanneer licht componenten bevat uit alle mogelijke trilrichtingen , zeggen we dat het licht **circulair gepolariseerd** is. Is er één welbepaalde voorkeursrichting dan is dit licht **lineair gepolariseerd**. Met behulp van polarisatiefilters kan men het licht van een bepaalde lichtbron die in één welbepaalde richting trilt filteren.



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/polarize/polarize.shtml

Circulair gepolariseerd licht kan met behulp van een aangepast polarisatiefilter worden gefilterd. Alle lichtcomponenten die niet voldoen aan de voorkeursrichting van het filter worden tegengehouden.



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/polarize/polarize.shtml

Wanneer licht op glas of water valt onder een welbepaalde hoek (de zogeheten Brewster hoek θ_B, dan is het gereflecteerde licht volledig gepolariseerd (bij andere hoeken dit slechts ten dele). Fotografen kennen dit fenomeen en gebruiken daarom een polarisatiefilter om de soms storende reflecties op vensterramen of waterplassen weg te filteren. Hiertoe draaien ze hun polarisatiefilter zodanig dat de reflectie verdwijnt. Voor glas is $\theta_B = 56{,}3°$. Voor water is deze hoek 53°.

Voorbeelden uit de sterrenkunde

In onze sterrenwacht AstroLAB IRIS gebruiken we polarisatiefilters bijvoorbeeld om de intensiteit van het licht exact in te stellen (bijvoorbeeld bij zonne-waarnemingen). Door het polarisatiefilter zodanig te draaien kunnen we de mate van polarisatie, en dus lichtdoorlaat, bepalen. Of nog anders gezegd: door te draaien aan een polarisatiefilter kan men het beeld verhelderen of verdonkeren.

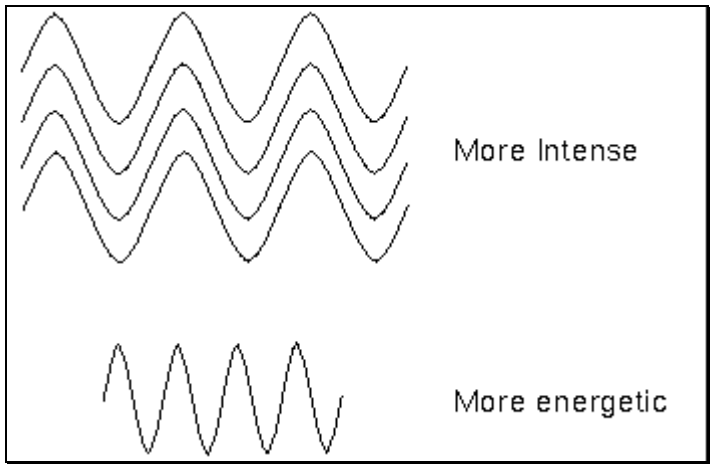


Een polarisatiefilter zoals dit bij AstroLAB IRIS in gebruik is om de helderheid van een beeld exact in te stellen.

Nu nog eventjes iets over een andere toepassing van polarisatiefilters. Leden van expedities ingericht door AstroLAB IRIS naar de totale zonsverduisteringen van 1991 (Mexico) en 1994 (Bolivië) , hebben voor Dr. Clette, zonnefysicus van de Koninklijke Sterrenwacht van België, foto's genomen van de zonneatmosfeer (corona) in gepolariseerd licht. Hierbij werd een polarisatiefilter in een aantal vooraf goed gedefinieerde standen geplaatst. Door opmeten van de lichtintensiteiten op de opnames kon men de electronendichtheid van de corona bepalen.

1.4. Lichtintensiteit

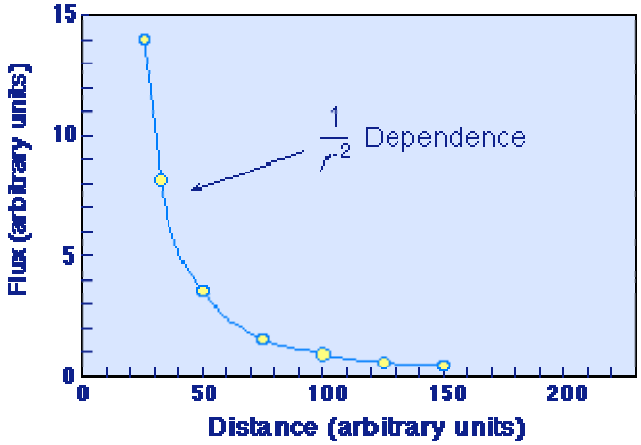
Hier wil ik nog even duidelijk maken wat eigenlijk het verschil is tussen *intensiteit* en *energieniveau* van een lichtstraal. Bekijk hiervoor onderstaand schema.



❑ Een meer **energetische golf** is een lichtgolf die een hogere frekwentie heeft. Voorbeeld: blauw licht is energetischer dan rood licht.
❑ Een **intensere lichtbundel** is een lichtbundel van véél licht maar van dezelfde frekwentie. De lichtintensiteit heeft dus te maken met de hoeveelheid fotonen die in de lichtbundel voorkomen. Voorbeeld: een laserstraal is een (zeer) intense lichtbundel van golven die allemaal dezelfde golflengte (energieniveau) hebben.

Wet van de Lichtintensiteit

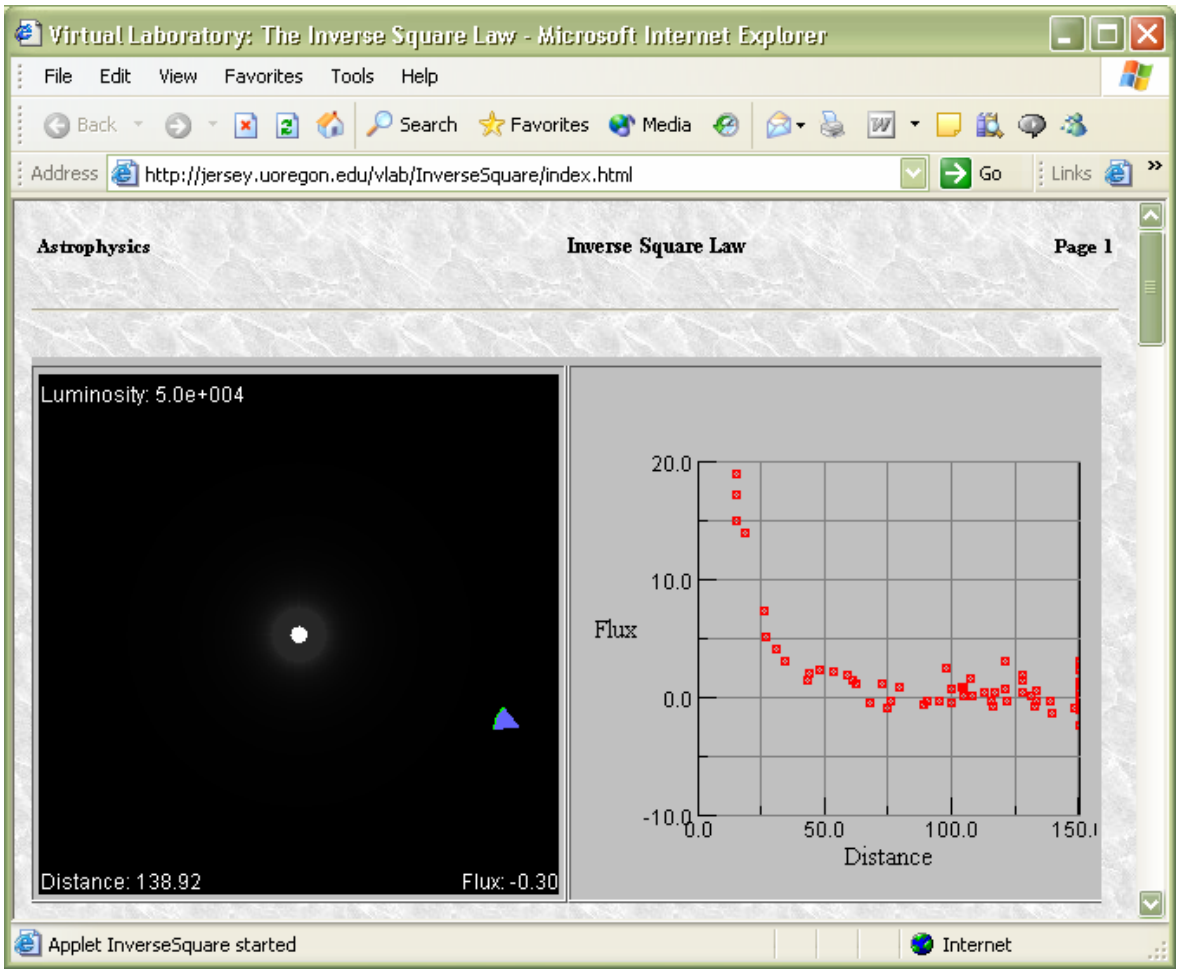
Iedereen weet dat wanneer men zich van een lichtbron verwijdert, deze lichtbron alsmaar donkerder lijkt. De mate waarin deze lichtbron schijnbaar zwakker wordt ligt vast in onderstaande wetmatigheid:



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/intensity.html

Stel dat op een bepaalde afstand d tot de lichtbron we een lichtintensiteit I hebben, dan zal de lichtintensiteit op de dubbele afstand *niet* gehalveerd zijn, maar wel gedeeld door 4. Of nog:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$$



http://jersey.uoregon.edu/vlab/InverseSquare/index.html

Deze JAVA applets laten U toe om met verschillende lichtbronnen te experimenteren. Je kunt lichtbronnen met verschillende lichtintensiteiten kiezen alsmede diverse waarnemingsposities innemen. Op deze manier construeer je zelf je eigen lichtcurve voor de diverse beschikbare lichtbronnen.

Hoeveel fotonen ontvangen we van een Ster ?

Laten we Wega nemen als voorbeeld van een ster. Van Wega ontvangen we in het zichtbare gebied (tussen 380 en 750 nm dus) een gemiddelde stroom van zo'n 100 miljoen fotonen per seconde, per m^2 en per nm golflengtebereik.

Oefening: Hoeveel fotonen van zichtbaar licht ontvangen we met de 20 cm triplet apochromaat van AstroLAB IRIS II ?

Antwoord: Het type van telescoop doet er niet toe: enkel de doormeter is van belang om te weten hoeveel fotonen zullen worden opgevangen. De totale oppervlakte van de refractor bedraagt:

$S = \pi . R^2 = 3,14 . 0,10^2 \approx 3.10^{-2} m^2$.

Het aantal nm zichtbaar spectrum = 750 – 380 = 370 nm.

In totaal ontvangen we dan van Wega:

$370 * 3.10^{-2} * 100.10^6 = 1,11$ *miljard fotonen per seconde.*

Magnitude van een Ster

In de sterrenkunde wordt de helderheid van een ster uitegdrukt in **magnitudes**. Magnitude betekent eigenlijk *grootte*. Vroeger deelde men de sterren inderdaad in volgens hu schijnbare grootte. De ster Wega bijvoorbeeld, waarvan sprake in de vorige paragraaf, heeft een magnitude 0 (nul). Hoe helderder een hemelobject is, hoe kleiner haar magnitude is. Bij de Zon, onze dagster, is ze zelfs zéér negatief: ze heeft een magnitude van -26! Ook de volle maan heeft een negatieve magnitude van -12. De planeten Jupiter en Venus kunnen zo'n -4 à -3 bereiken.

Wanneer er een verschil van één magnitude is tussen twee sterren, dan is de ene ster 2,512 x zwakker dan de andere. Met het blote oog kan men op donkere plaatsen sterren zien tot de 5^e à 6^e magnitude. Bijna alle sterren hebben een positieve magnitude. De sterkste telescopen op vandaag kunnen objecten zien tot de 29^e à 30^e magnitude.

Eigenlijk moeten we spreken van **schijnbare magnitude**: we hebben het immers over de helderheid van het object zoals wij dat hier op Aarde kunnen waarnemen. Een zeer heldere ster die op een zeer grote afstand van de Aarde staat kan, gezien de Wet van de Lichtintensiteit, toch bijzonder lichtzwak overkomen. In dit specifieke voorbeeld zal de schijnbare magnitude dus laag zijn, maar de **absolute magnitude** hoog. Sterren die zeer veel licht produceren hebben dus een hoge absolute magnitude.

Sterren die vijf magnitudes zwakker zijn stralen $2,512^5 \approx 100$ x minder licht uit, bij tien magnitudes is dit al $10^4 = 10.000$ en bij een magnitudeverschil 15 is dit al gezakt met een factor $10^6 = 1.000.000$ = één miljoen keer zwakker.

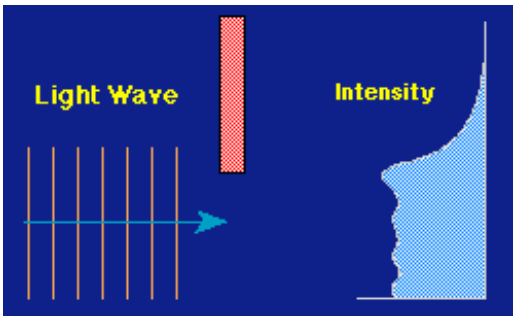
Oefening: Stel dat we een ster willen waarnemen die 5 magnitudes zwakker is dan Wega (zie oefening hierboven). Hoeveel fotonen ontvangen we dan nog per seconde ?
Antwoord: 1,11 miljard fotonen per seconde / 10^4 = 11,1 miljoen fotonen per seconde. Dit is nog altijd ruimschoots voldoende om te worden waargenomen.

Oefening: Stel dat we een ster willen waarnemen van de 15^e magnitude. Hoeveel fotonen ontvangen we dan nog per seconde ?
Antwoord: 1,11 miljard fotonen per seconde / 10^6 = 1.110 fotonen per seconde. Slechts nog maar een goede duizendtal fotonen per seconde.

Om hier compleet te zijn nog eventjes het volgende. Bij de bespreking van de schijnbare en absolute magnitudes hadden we het slechts over de helderheid binnen het zichtbare spectrum. Er bestaat echter ook nog zoiets als de **bolometrische magnitude**: dit is de absolute magnitude indien men rekning houdt met het licht uit alle golflengtebereiken. Hier wordt dus ook rekening gehouden met radiostraling, X-en gammastraling die van de ster uitgaat.

1.5. Fraunhofer Diffractie van Licht

Doordat licht eigenschappen heeft van een golf, is het voor licht mogelijk om als het ware achter een hoek te kijken. Zie onderstaand experiment. Het roze plaatje is een ondoorzichtig stukje materie. Zou licht enkel en alleen uit deeltjes bestaan dan zou je op de muur rechts een heel duidelijke aftekening zien tussen het verlichte en het onverlichte gedeelte. Door het **golfgedrag** van licht zul je in werkelijkheid zien dat de intensiteit achter het muurtje slechts geleidelijk afneemt. Licht dat een fysieke obstructie tegenkomt in haar pad zal steeds dit speciale effect veroorzaken. Dit fenomeen noemen we **diffractie**.



Het diffractie-fenomeen zorgt in de wereld van de sterrenkunde voor twee gevolgen:

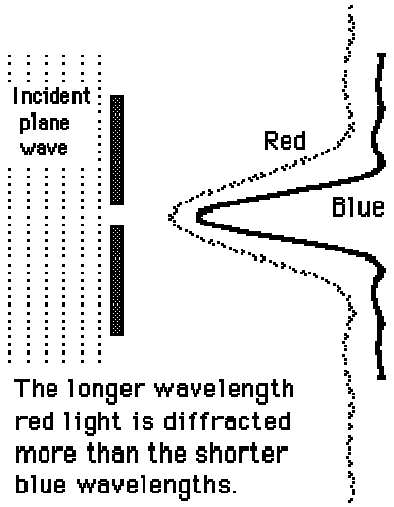
a) de diffractie-fenomen van licht door een telescoop zorgen er voor dat er een absolute grens is aan de kwaliteit van het beeld dat in de telescoop wordt gevormd: het lichtfront dat van een ster komt, en dat perfect vlak is, ziet de telescoop als het ware als een obstructie. Zoals we juist bescheven zorgt deze obstructie voor diffractie-effecten en deze limiteren uiteindelijk de beeldkwaliteit.

b) diffractie wordt in de sterrenkunde benut voor het opsplitsen van licht in haar componenten. Men gebruikt hiervoor **diffractieroosters**. Dit zijn glasplaatjes met daarop ondoorzichtige fijne lijntjes op aangebracht. De lichtstraal wordt doorheen deze roosters gestuurd en wanneer het licht dit rooster verlaat ontstaan door diffractie allerlei fenomen. Een van de zaken die men met behulp van diffractieroosters kan doen is het opsplitsen van licht in haar kleurcomponenten. In de sterrenkunde gebruikt men diffractieroosters in **spectrografen**.

Diffractie bij een enkelvoudige spleet

Hieronder vindt de lezer een tweetal eigenschappen terug van diffractie bij een enkelvoudige spleet:

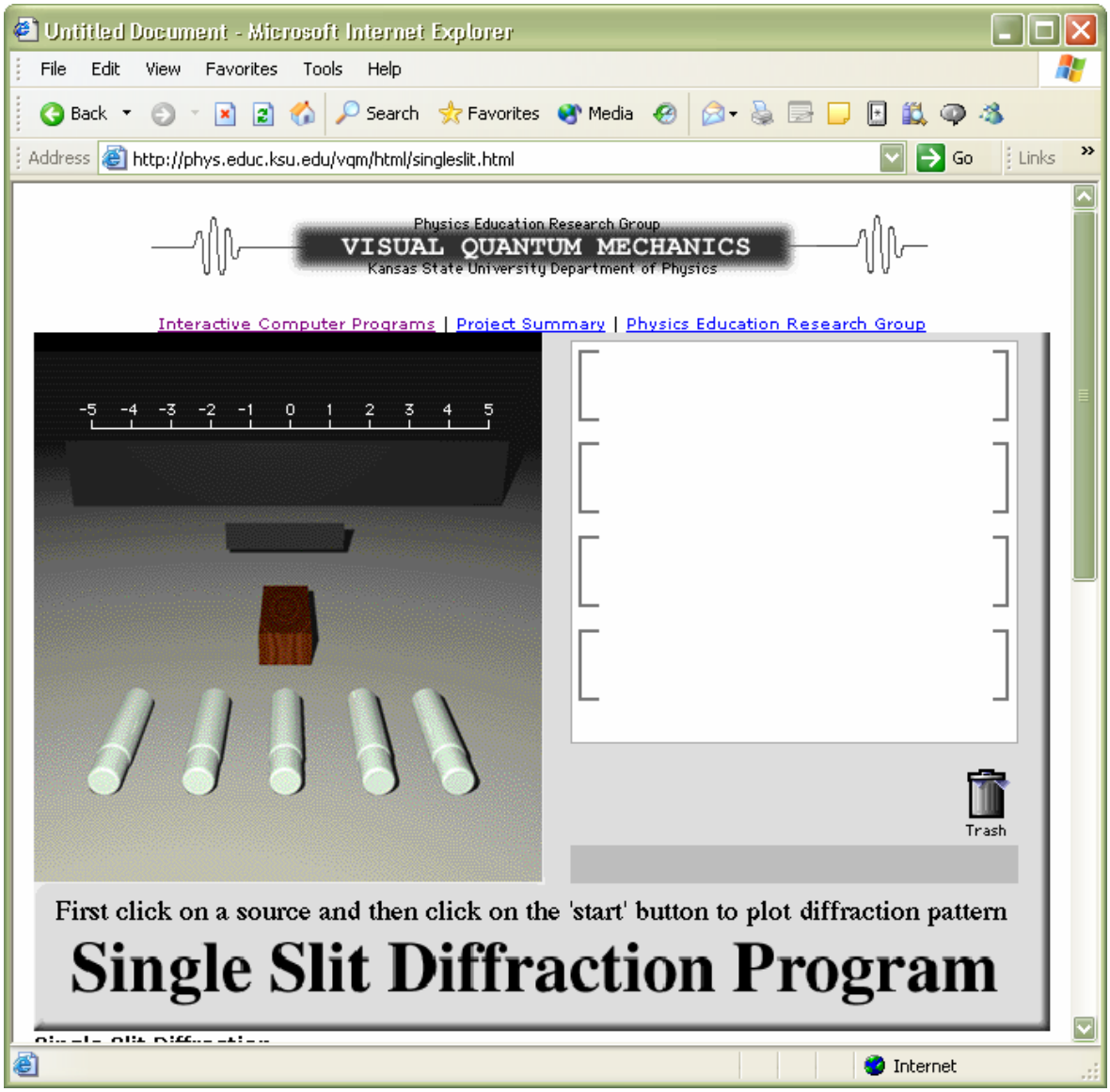
1) licht met een langere golflengte wordt meer uitgesmeerd dan licht met een kortere golflengte;
2) hoe smaller de spleet, hoe meer het licht zal worden uitgesmeerd.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html



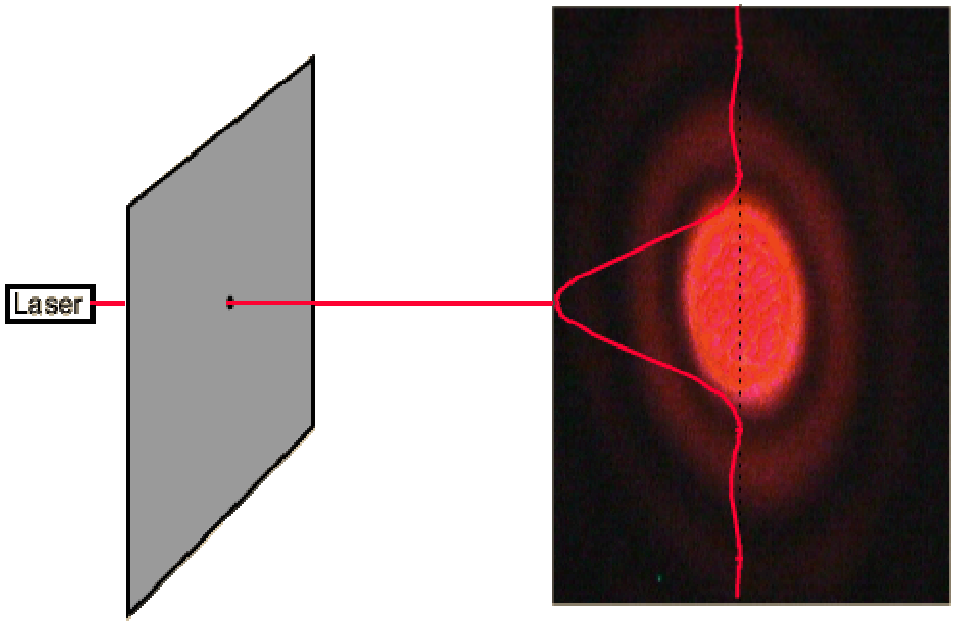
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html



http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/singleslit.html

Diffractie bij een cirkelvormige spleet: de Airy-schijf

Laten we nu eens kijken naar wat er gebeurt als we een lichtstraal, zoals bijvoorbeeld laser-licht, doorheen een cirkelvormige opening sturen. Op ons projectiescherm rechts zien we dan cirkelvormige patronen verschijnen: in het midden is er een heldere schijf, en daarrond komen er ringen voor met afnemende helderheid. Dat helder schijfje noemen we het **Airy-schijfje**.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp.html

Merk op dat deze vorm van **circulaire diffractie** precies is wat er gebeurt in een sterrenkijker: het vlakke lichtfront wordt als het ware gebroken door deze opening en veroorzaakt zo'n Airy-schijfjes. Of nog anders gezegd: de kijkeropening zorgt er voor dat een puntvormige lichtbron wordt uitgesmeerd over een schijfje. Wanneer er geen enkele obstructie voorkomt in de kijkeropening (zoals bijvoorbeeld bij lenzenkijkers het geval is), dan komt 86% van alle licht terecht in dat centrale schijfje. De overige 14% van het invallende licht wordt gedivergeerd naar de verschillende diffractieringen.

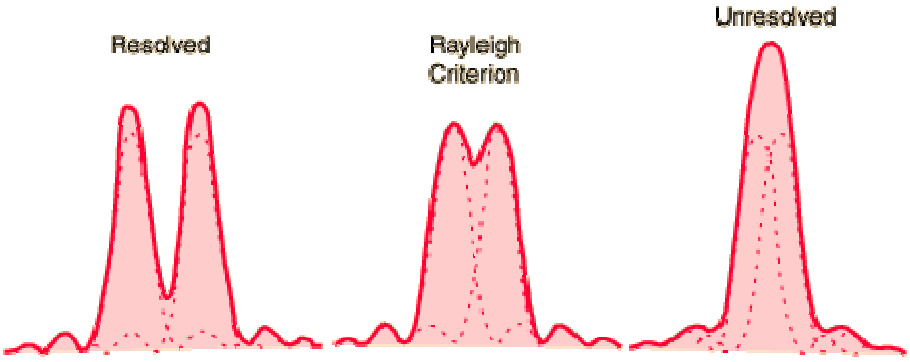
Wanneer de som alle afwijkingen van het optische systeem (zeg maar de telescoop) kleiner is dan het Airy-schijfje, dan zeggen we dat de telescoop **diffractie-begrensd** is. Uit dit alles kunnen we afleiden dat het geen enkele zin heeft om de optiek van een telescoop met een welbepaalde opening nodeloos te verfijnen: op een bepaald moment zijn de fouten geintroduceerd door het gebruik van onvolmaakte spiegels en lenzen kleiner dan het diffractieschijfje.

De grootte van diffractieschijfje ligt voor een bepaalde kijkeropening vast en het is die grootte die het oplossend vermogen van een kijker bepaalt. Een kleine kijkeropening betekent een grote Airy-schijf. Een grotere kijkeropening zorgt voor een kleinere diffractieschijf.

Raileigh berekende wat het **oplossend vermogen** (de zogeheten **resolutie**) bij golflengte λ van een kijker met diameter d is. Hij kwam tot het volgende besluit:

$$\sin\theta_R = 1.22\,\frac{\lambda}{d}$$

Staan twee sterren onder een hoek θ van elkaar, dan zullen we ze nog net kunnen scheiden. Vraag is natuurlijk: wanneer kunnen we zeggen dat we 2 sterren nog echt van elkaar kunnen scheiden. We weten immers dat iedere ster wordt afgebeeld als een Airy-schijfje. Twee sterren onderscheiden betekent dus dat we de twee gevormde Airy-schijfjes nog moeten kunnen onderscheiden. Onderstaande tekening maakt het een en het ander duidelijk. We zeggen dat twee sterren nog net van elkaar te onderscheiden zijn wanneer het eerste diffractie-minimum van de ene ster samenvalt met het maximum van de andere. We bekomen dan de situatie zoals in het midden weergegeven. We noemen dit **het Rayleigh-criterium**.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/imgpho/rayc.gif

Ik wil er de lezer ook nog eens op wijzen dat de grootte van het Airy-schijfje afhankelijk is van de golflengte. Of, eenvoudig gezegd: met een telescoop ziet men het scherpst in het blauw. Blauw heeft immers de kleinste golflengte. De linaire doormeter d_{airy} van de Airy-schijf tot de eerste diffractie-ring wordt gegeven door onderstaande formule:

$$d_{airy} = 2{,}44 \cdot \lambda \cdot F / D$$

Hierbij staat F voor de brandpuntsafstand van de kijker en D voor de doormeter van de kijker.

Of nog, als we weten dat F / D = f (zijnde de zogenaamde **openingsverhouding** van de kijker) is:

$$d_{airy} = 2{,}44 \cdot \lambda \cdot f$$

Of als hoek θ_{airy} uitgedrukt wordt dit:

$$\theta_{airy} = 2{,}44 \cdot \lambda / D$$

<u>Oefening</u>: Het menselijk oog heeft ook een circulaire opening van zo'n 5 mm. Bereken even wat het scheidend vermogen θ van het menselijk oog is voor groen licht (λ = 500 nm).

Antwoord: $\theta = 1{,}22.10^{-4}$ radialen. Vergelijk dit even met wat er in de literatuur wordt gerapporteerd: Ackerman meldt een scheidend vermogen van 5.10^{-4} radialen voor de

meeste mensen. In optimale omstandigheden werd een scheidend vermogen van 2.10^{-4} radialen opgemeten.

Oefening: Op AstroLAB IRIS II staat de Lichtenknecker Optics VAF 200/2400 telescoop. De aanduiding 200/2400 betekent dat de doormeter van het objectief d = 200 mm bedraagt en de brandpuntsafstand 2,4 meter. Bereken even wat het scheidend vermogen, in boogseconden, is van deze kijker bij een golflengte van 550 nm.
Tip: Wil je radialen omzetten naar boogseconden dan moet je het aantal radialen vermenigvuldigen met 206,265 .
Antwoord: $\theta = 0{,}69$" (boogseconden).

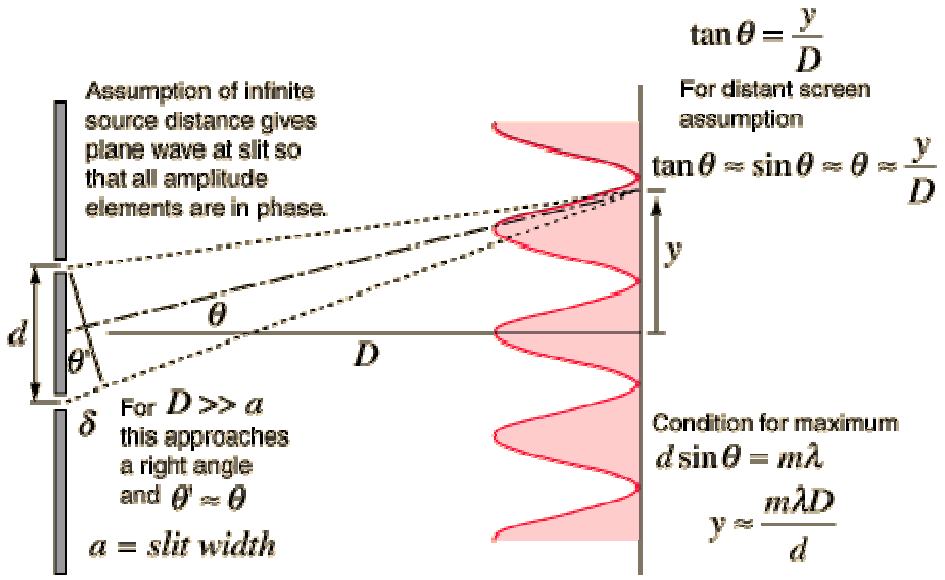
Diffractie bij een dubbele spleet: interferentie

In dit geval zal het licht dat afkomstig is van de twee spleten, die elk een breedte a hebben en op een afstand d van elkaar liggen, interageren met elkaar. Er treedt **interferentie** op. Op ieder punt van het projectiescherm rechts in de onderstaande figuur (op een afstand y van het middelpunt van de twee spleten) zal licht afkomstig van de twee spleten samenkomen. Doordat nu de afstand van een specifiek punt op dit scherm tot de twee spleten normaal gezien verschillend zal zijn (met een factor δ), zal het licht dat daar aankomt **faseverschillen** vertonen.

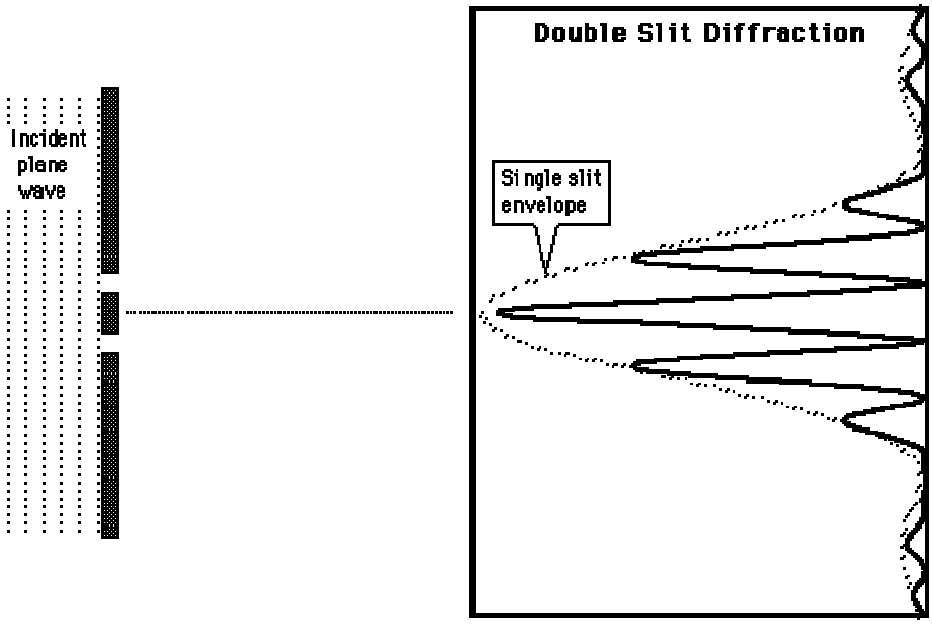
Zo kan het zijn dat de lichtstralen afkomstig van de twee spleten 180° van elkaar verschillen. In dergelijk geval zullen beide lichtstralen elkaar opheffen (we zeggen dat de beide lichtstralen elkaar op dat punt uitdoven).

Het is evenzeer mogelijk dat de maxima van de beide lichtgolven elkaar versterken (dit zal zo zijn als er bijvoorbeeld geen enkel faseverschil is).

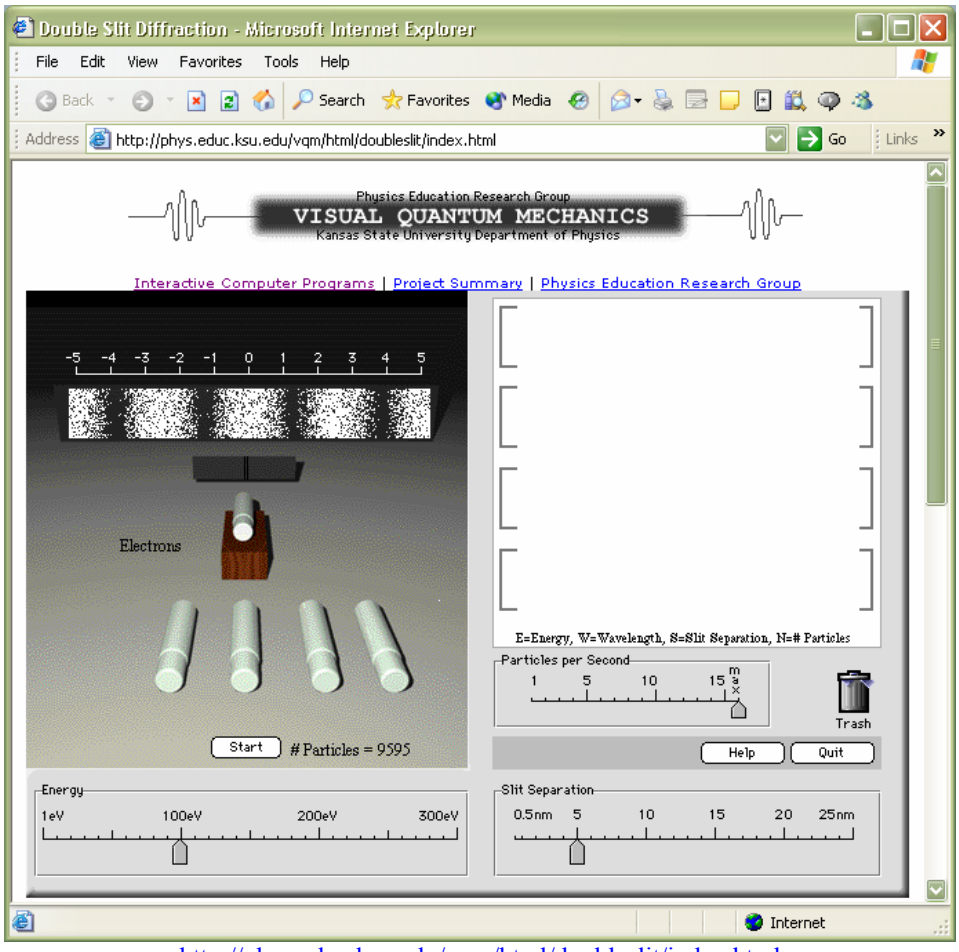
Besluit: op het projectiescherm zullen lichtere en donkere banden ontstaan. Dit is een typisch voorbeeld van een **interferentiepatroon**.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html



http://phys.educ.ksu.edu/vqm/html/doubleslit/index.html

1.6. Refractie van Licht - Dispersie

Een lichtstraal kan worden afgebogen wanneer deze lichtstraal doorheen een andere soort van materie (medium) gaat. Dit effect noemen we **refractie**. De afhankelijkheid tussen de golflengte en de mate van refractie noemen we **dispersie**. Deze dispersie is afhankelijk van een aantal zaken:

a) golflengte van het licht;
b) materiesoort (gaat het licht van lucht naar water, van water naar glas, enz.);
c) de hoek waaronder de lichtstraal de andere materie raakt.

Refractie heeft voor de sterrenkunde een aantal gevolgen:

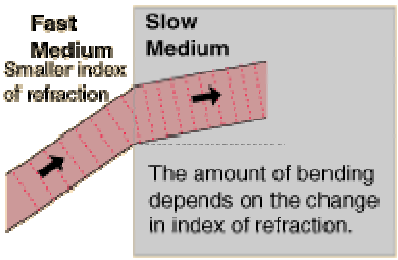
1) het is de basis voor het prisma: hierdoor kan licht worden opgesplitst in kleuren;
2) het is de basis voor het probleem van de **chromatische aberratie** in telescopen bijvoorbeeld: door deze aberratie focuseren de kleuren niet allemaal in hetzelfde brandpunt.

De Refractie-Index n

De refractie-index, ook nog de **brekingsindex** genoemd en aangeduid met de letter n, is een maat voor de afzwakking van de snelheid v van de lichtstraal.

$$n = \frac{c}{v}$$

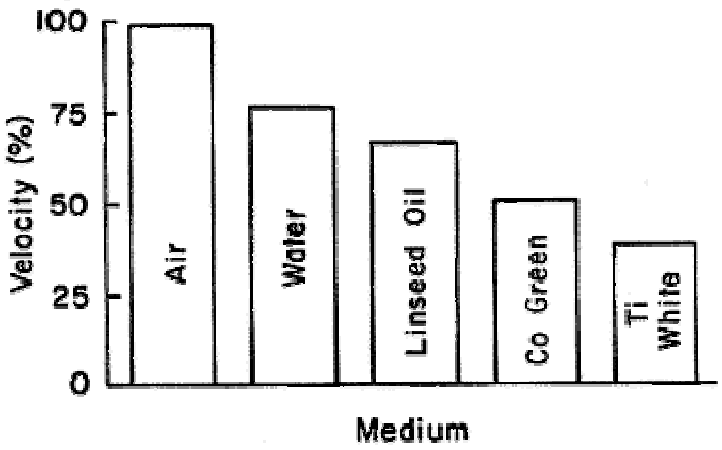
Hierbij staat c voor de lichtsnelheid.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/refr.html#c1

Hieronder vindt U de refractie-index voor een aantal bekende stoffen terug:

Vacuum	1.000	Ethyl alcohol	1.362
Air	1.000277	Glycerine	1.473
Water	4/3	Ice	1.31
Carbon disulfide	1.63	Polystyrene	1.59
Methylene iodide	1.74	Crown glass	1.50-1.62
Diamond	2.417	Flint glass	1.57-1.75



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/refraction/refraction.shtml

Grafische voorstelling van de vermindering van de lichtsnelheid wanneer deze door een bepaald materiaal wordt gestuurd. Zo ziet men bijvoorbeeld dat licht in water zo'n 25% tragervooruit gaat dan in lucht. Of nog anders gezegd: in water gaat het licht slechts aan een snelheid van 225.000 km/s in plaats van de gebruikelijke 300.000 km/s. In lucht is de lichtsnelheid 99.7% van dat in het luchtledige.In bepaalde pigmenten van Titanium, bijvoorbeeld wit, daalt de lichtsnelheid tot maar liefst 40%.

Een lijst vindt U ook hier terug:
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/indrf.html#c1 .
Het is nuttig te onthouden dat vacuüm en lucht een brekingsindex hebben dat gelijk is aan één.

Merk op dat de frekwentie van het licht geenszins wordt veranderd wanneer deze doorheen een andere materie gaat. Of, anders gezegd, de kleuren blijven bewaard. Wat er gebeurt is dat bij een vertraging van de lichtstraal, de golflengte ietwat verkleint.

Herinner U dat tussen de golflengte en de frekwentie de volgende relatie bestaat:

$$c = \lambda \, . \, f$$

en dus geldt:

$$c = n \, . \, v = \lambda \, . \, f = \text{constant}$$

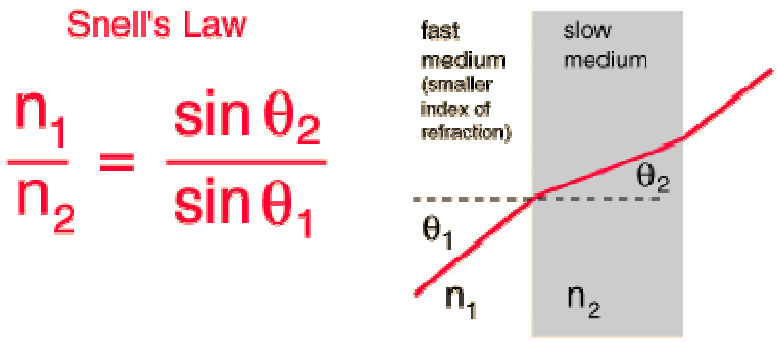
Bijgevolg:

$$\lambda = v \, . \, (n / f \, . \, c)$$

Als de snelheid dus naar beneden gaat kan het niet anders zijn dan dat de golflengte van de lichtstraal zal dalen aangezien de termen die tussen ronde haakjes staan voor een welbepaalde materie constant blijft.

De Wet van Snellius

Wanneer een lichtstraal onder een hoek van θ_1 ten opzichte van de normaal van de ene materiesoort met refractie-index n_1 overgaat naar een andere materiesoort met refractie-index n_2 dan kan men aan de hand van de Wet van Snellius de uitgaande hoek θ_2 bepalen.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/refr.html#c1

Indien $n_1 < n_2$ dan zal de refractiehoek vergroten. Merk op dat θ_1 kleiner moet zijn dan een welbepaalde hoek wil men refractie verkrijgen. Indien θ_1 té groot is, dan krijgen we reflectie.

1.7. De stralingswetten

De wet van Planck

Het licht dat afkomstig is van zogeheten *back bodies* (zwart objecten) voldoet aan welbepaalde wetmatigheden. Concreet betekent dit dat aan de hand van een welbepaalde formule, de zogheten Wet van Planck, men kan voorspellen welke intensiteit het licht van een bepaalde golflengte (kleur) , afkomstig van een object die temperatuur T heeft, zal hebben.

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

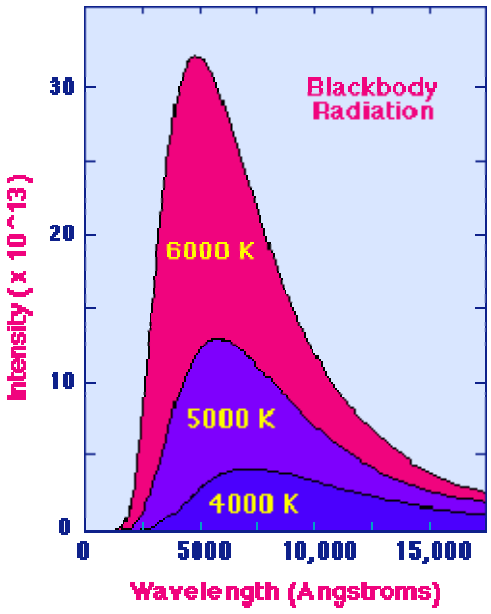
$h = 6.625 \times 10^{-27}$ erg- sec (Planck Constant)

$k = 1.38 \times 10^{-16}$ erg/ K (Boltzmann Constant)

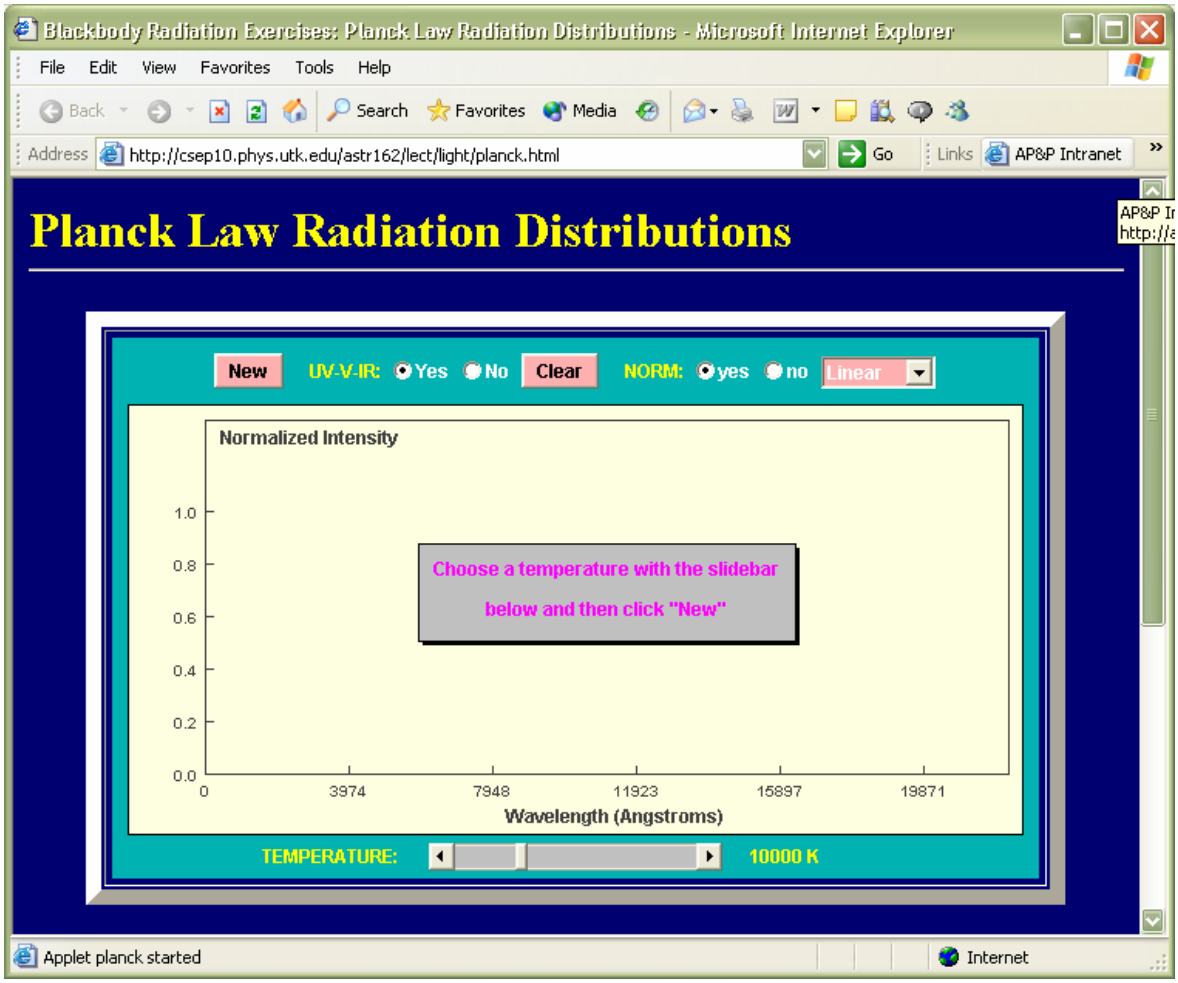
$c = 3 \times 10^{10}$ cm/sec (Speed of Light)

http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/radiation.html

Aan de hand van bovenstaande formule kun je onderstaande grafiek maken. Voor iedere welbepaalde temperatuur T, uitgedrukt in K (Kelvin), kan men één curve tekenen. Doet men dit voor verschillende temperaturen, dan bekomt men onderstaande figuur.



Men merkt op dat naarmate de temperatuur T van het bewuste object daalt de maximum piek naar rechts verschuift (de golflengte van de topwaarde wordt langer, of nog: het object wordt *roder*).



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/planck.html

De wet van Wien

De wet van Planck kan worden afgeleid uit 2 andere wetten. De eerste is de Wet van Stefan-Boltzmann.

Wien Displacement Law: $\lambda_{Max} = \frac{3 \times 10^7}{T}$

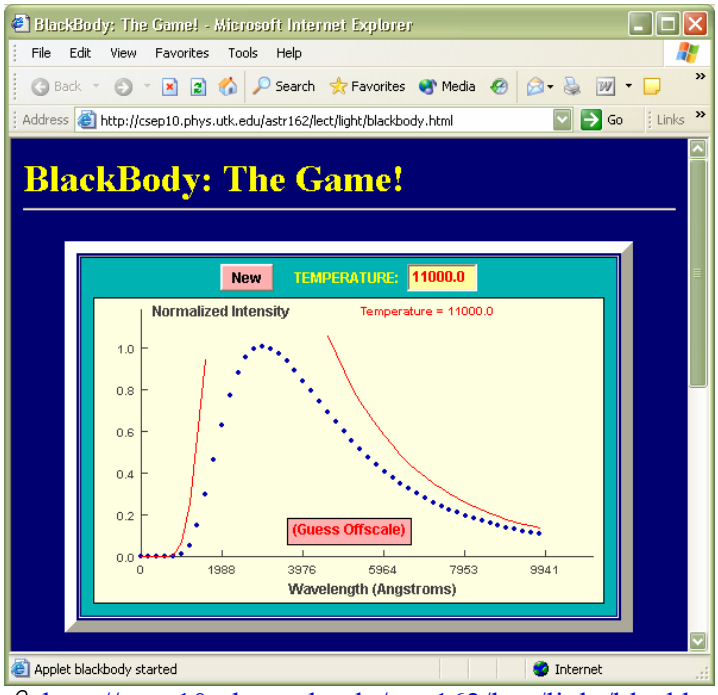
(λ in Angstroms T in Kelvin)

De wet van Stefan-Bolzmann

Steffan - Boltzmann Law: $E = \sigma T^4$

$\sigma = 5.6705 \times 10^{-5}$ erg - cm^{-2} - K^{-4} - sec^{-1}

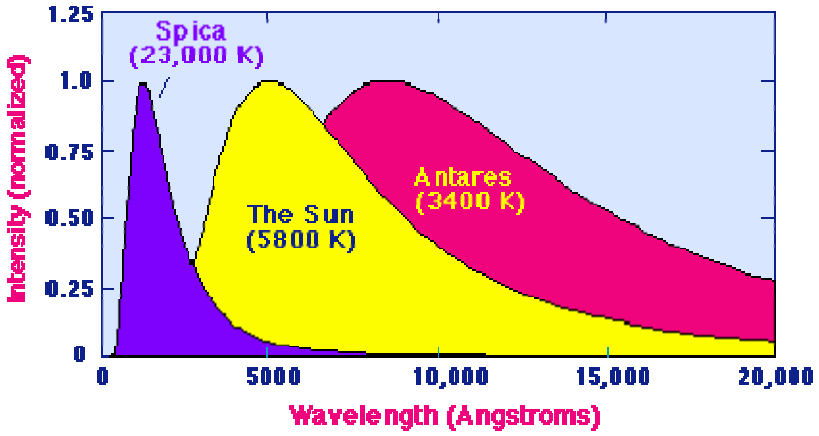
(Steffan - Boltzmann Constant)



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/blackbody.html

Toepassing: Sterkleuren

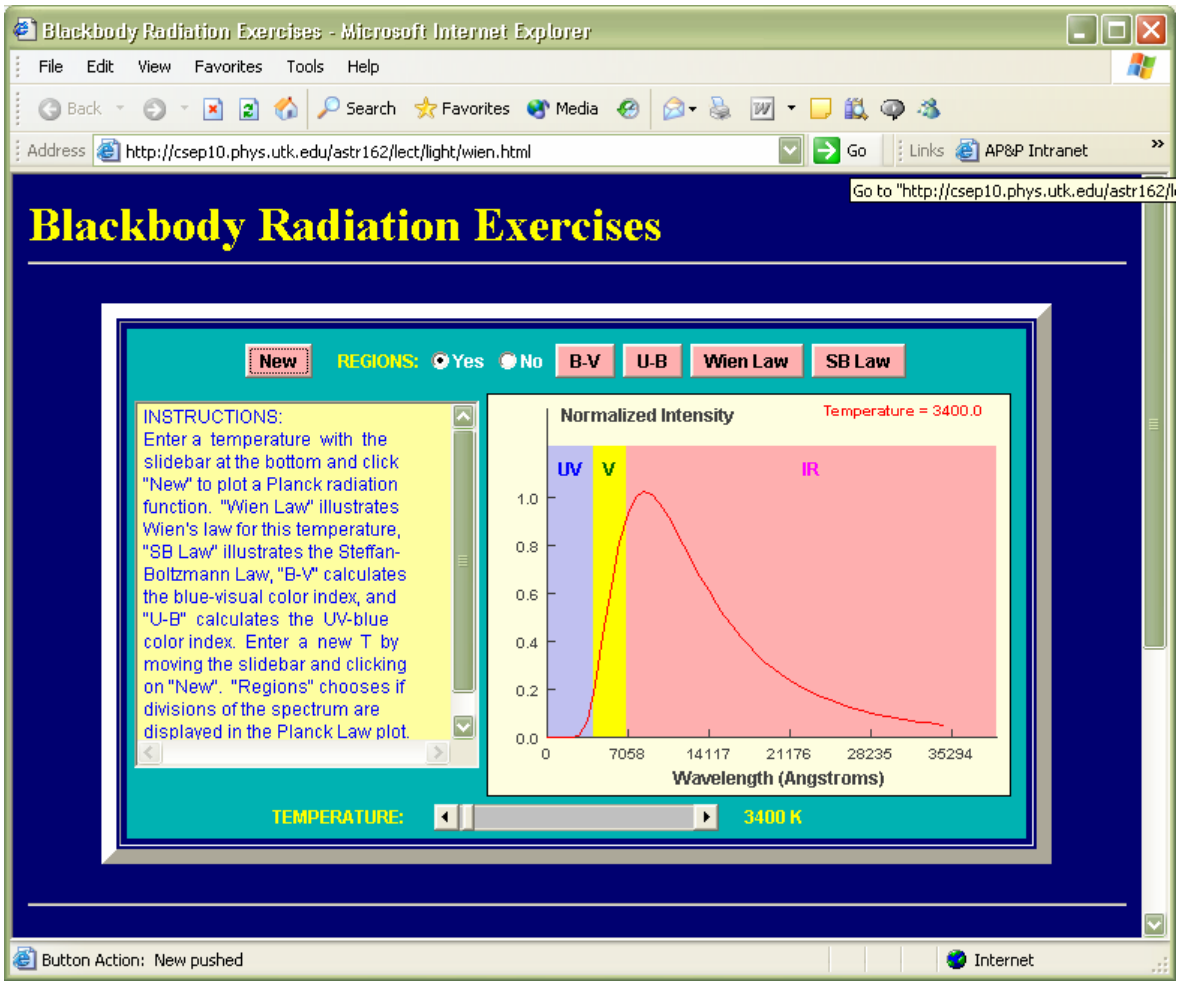
De stralingswetten hebben bepaalde gevolgen voor de sterrenkunde. Een belangrijk gevolg is dat sterren een welbepaalde kleur in functie van hun temperatuur zullen vertonen. Hoe heter de ster, hoe blauwer ze zal lijken.



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/radiation.html

De figuur hierboven illustreert in welk golflengtegebied drie heel bekende sterren stralen. De bekendste ster van het trio is uiteraard de Zon. Die heeft een tamelijk gele kleur. Die gele kleur komt overeen met een black body straling van 5.800 K. De fotosfeer van de Zon, dit is het zichtbare oppervlak, heeft inderdaad een temperatuur van zo'n 5.800 Kelvin.

Andere sterren, zoals Antares bijvoorbeeld, zijn rodere en dus koelere sterren. Bij Antares is de globale oppervlaktetemperatuur *slechts* zo'n 3.400 K. Spica daarentegen is dan weer een veel hetere ster: de straling komt overeen met een black body temperatuur van maar liefst 23.000 K. Zo'n ster zal dus vooral in het Ultra-violet (UV) stralen. Een koudere ster als Antares straalt vooral licht uit in het Infra-rood (IR).



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/wien.html
Deze JAVA applet laat toe een bepaalde stertemperatuur in te stellen (onderaan). Klik je vervolgens op de 'New'-toets dan wordt de grafiek opnieuw berekend. Staat 'Regions' aan, dan zie je onmiddellijk in welk gebied (UV, Visuele of IR) een ster haar energie uitstraalt.

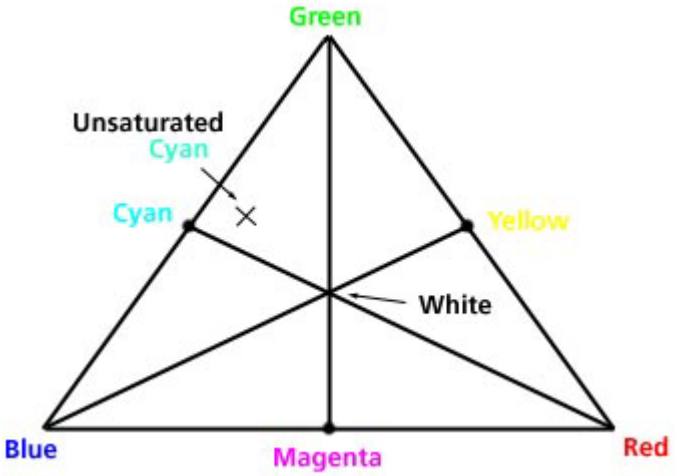
1.8. Het fenomeen “Kleur”

In ons oog komen drie soorten van kegeltjes voor die elk gevoelig zijn voor ofwel voornamelijk rood, blauw en groen. Voor meer uitleg hieromtrent zie de sectie betreffende de bouw van het oog.

In deze sectie zullen we het hebben over hoe kleuren kunnen worden voorgesteld en samengesteld.

De kleurendriehoek van James Clerk Maxwell

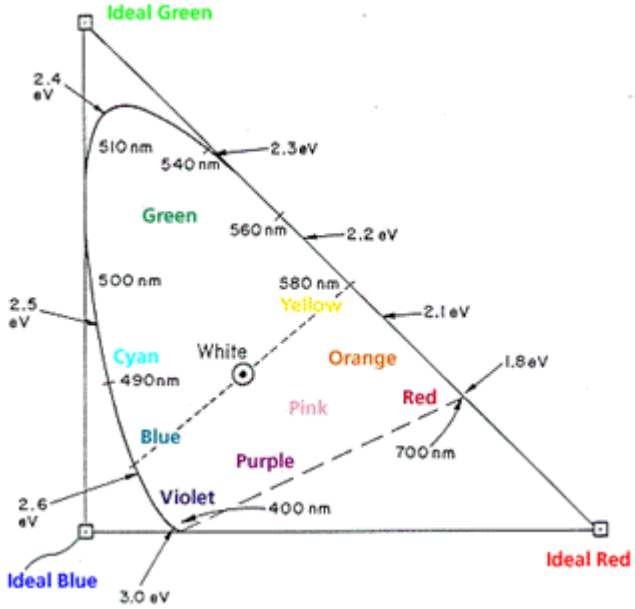
De drie toppunten in de kleurendriehoek van James Clerk Maxwell stellen de drie hoofdkleuren voor: Rood, Groen en Blauw (meestal worden deze drie basiskleuren met de afkorting **RGB** voorgesteld). Door deze 3 basiskleuren te combineren kunnen heel wat, maar niet àlle, kleuren worden samengesteld. Bijvoorbeeld: meng je groen en rood, dan bekomt men geel. Mengt men blauw met rood (onderste as in de driehoek), dan bekomt men magenta. Enzovoort. Een speciaal geval is wit licht: dit punt ligt in het zwaartepunt van deze kleurendriehoek.



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/color/composition.shtml

Het CIE kleurendiagramma

De Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) definieerde in 1931 al drie andere basiskleuren (de zogeheten "ideale" basiskleuren) om aldus àlle kleuren echt te kunnen voorstellen. Het model werd in 1967 zelfs nog eens gewijzigd. In dit CIE kleurendiagramma wordt dus uitgegaan van 3 imaginaire (onbestaande) primaire kleuren. Deze staan in de 3 hoekpunten van onderstaande driehoek.



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/color/composition.shtml

Het CIE kleurendiagramma

In de driehoek zien we de CIE curve aangeduid. Deze curve toont alle **spectraalkleuren**. De streepjeslijn die 380 nm en 700 nm verbindt zijn de niet-spectrale kleuren van paars die men bekomt door het mengen van violet en rood. De keuren die door ons oog kunnen worden gezien liggen allemaal tussen de curve en de onderste streepjeslijn. Merk op hoe de kleur wit kan worden gevormd door de 3 basiskleuren op een gelijke manier te combineren.

Wanneer men twee kleuren op het diagramma met elkaar verbindt en de lijn snijdt het witpunt W, dan zeggen we dat de twee bewuste kleuren **complementair** zijn. Zo zie je bijvoorbeeld dat de kleur geel en blauw complementair zijn: de verbindingslijn snijdt W. Volg je de kleuren op die lijn dan zul je zien dat we gaan van gesatureerd (verzadigd) blauw (zeg maar de spectraalkleur blauw), naar pastel blauw, licht blauw, wit, licht geel, pastel geel tot gesatureerd geel.

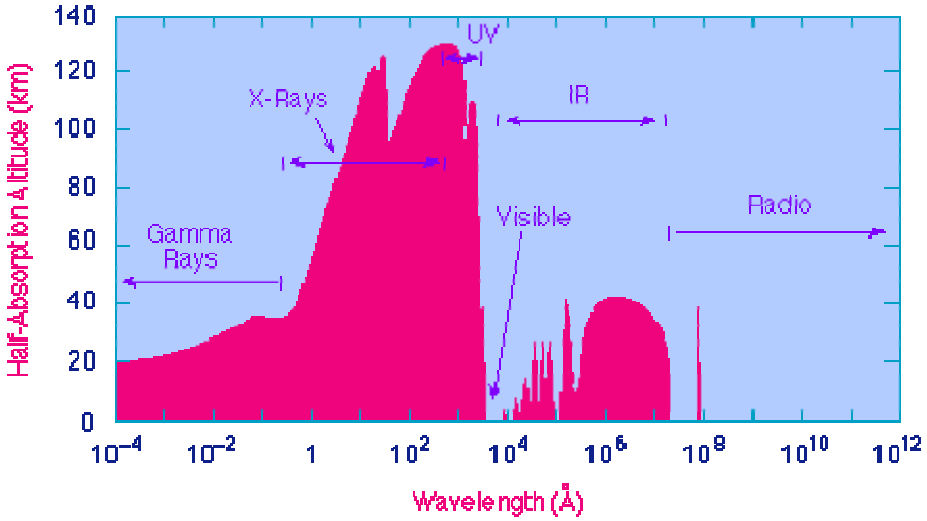
Dit alles betekent dat we eigenlijk ook W als de oorsprong van onze kleurengrafiek zouden kunnen beschouwen. Kleur kunnen we dan zien als het mengsel, in een bepaalde verhouding uiteraard, van wit licht en licht van een zekere golflengte. Deze golflengte is de **dominante golflengte** en de kleur van die dominante golflengte wordt **hue** genoemd. De kleurensensatie wordt dus bepaald door de hue. De mate van hue wordt ook aangeduid als

zijnde de **saturatie** (ook nog de **verzadiging** of **chroma** genoemd). Alle punten die op de gebogen curve liggen zijn volledig gesatureerd.

1.9. Licht in de Aardatmosfeer

De licht-doorlaatbaarheid van de Aardatmosfeer

Een vraag die men zich moet stellen is of wij wel alle lichtsoorten, zeg maar het gehele spectrum, van een bepaald hemelobject hier op Aarde kunnen waarnemen. Het antwoord hierop is, jammer genoeg, nee! De reden hiervoor is eigenlijk simpel: alle licht dat ons oog of een andere detector bereikt moet eerst doorheen de aardatmosfeer gaan. Alle licht wordt dus eerst nog eens gefilterd door onze aardatmosfeer. De aanwezige moleculen in de aardatmosfeer nemen bepaalde lichtsoorten in meer of mindere mate op waardoor wij die bepalde lichtsoorten uiteraard niet meer kunnen waarnemen. We kunnen dus spreken over de licht-doorlaatbaarheid van de Aardatmosfeer. Onderstaand beeld geeft een duidelijk overzicht van de mate waarin de lichtsoorten al dan niet worden doorgelaten.



http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/light/windows.html

Uit de grafiek kan men duidelijk zien dat slechts de kleuren (het zogeheten visuele licht) en radiogolven quasi 100% door de atmosfeer worden doorgelaten. Gewone telescopen en radiotelescopen kunnen dus inn principe probleemloos hun werk doen. Anders is het gesteld met bijvoorbeeld het Infra-rood (IR): deze wordt slechts ten dele doorgelaten.

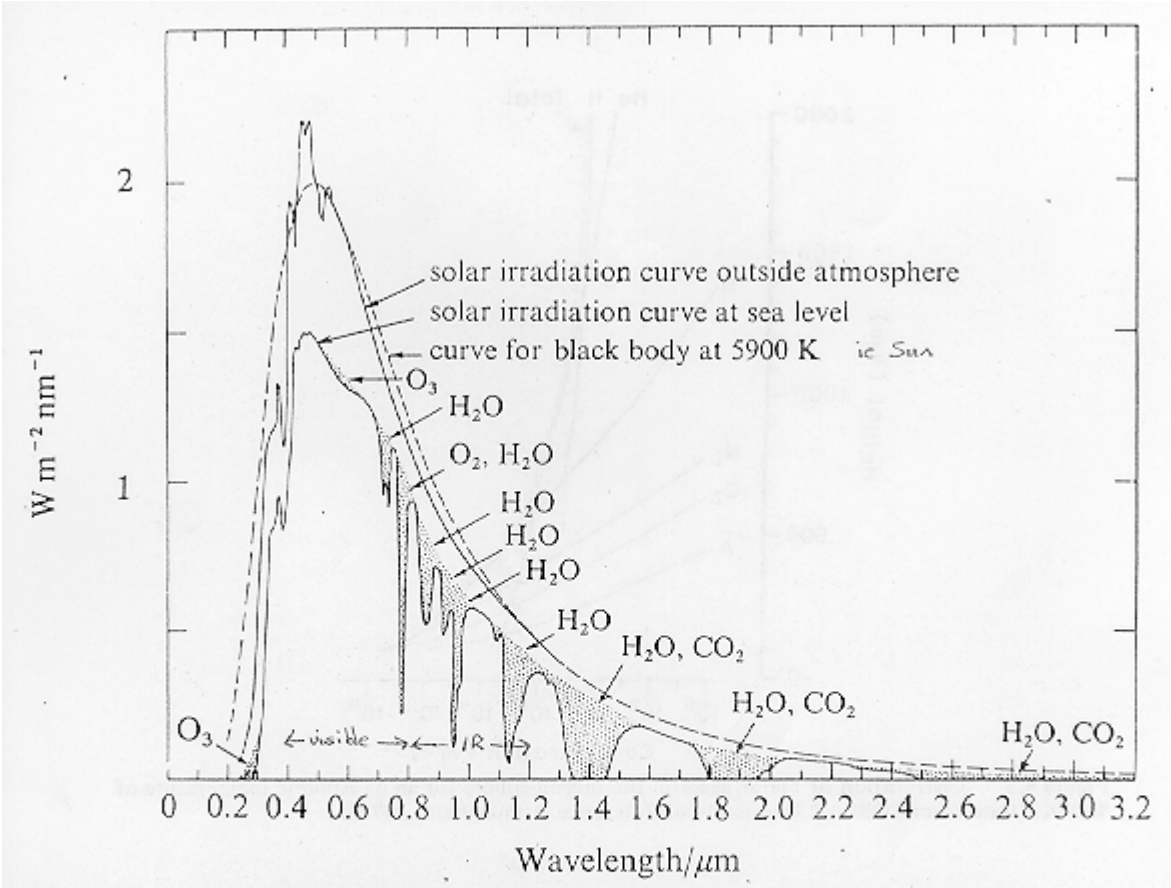


Fig. A8.1. Solar radiation curves. Shaded areas show absorption by vertical path of whole atmosphere by constituents shown (from Air Force Cambridge Research Laboratories, 1965).

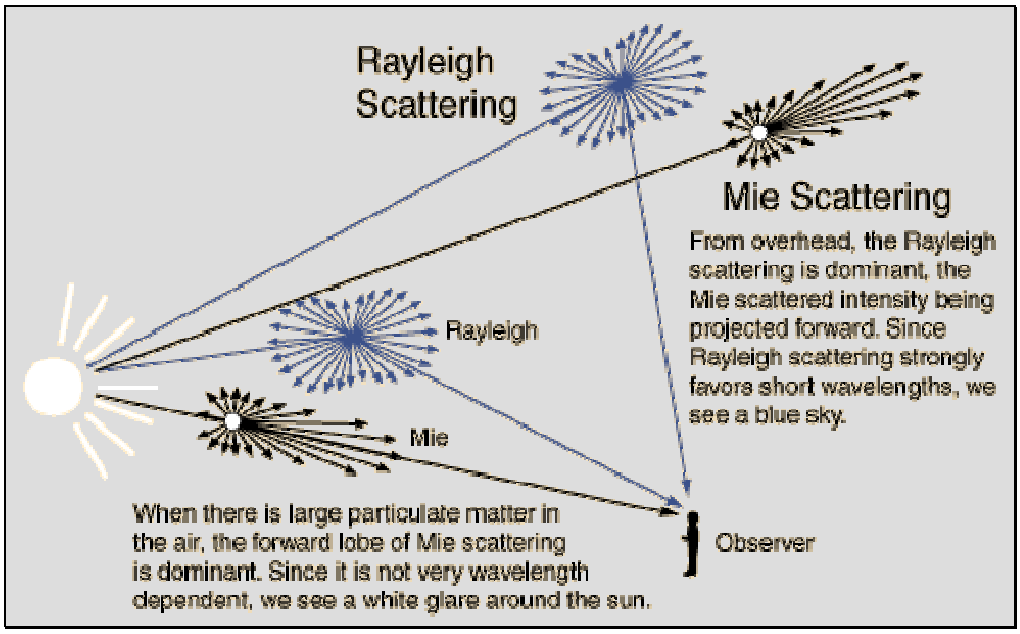
" The Physics of Atmospheres " Houghton p.178

Bovenstaande grafiek toont duidelijk aan welke gedeeltes van het spectrum van de Zon niet kunnen worden waargenomen vanaf de grond. Je vindt er ook het zonnespectrum zoals het vanaf de ruimte wordt waargenomen alsmede het spectrum dat door een ideale black body van 5.900 K wordt uitgestraald (zie verder in de tekst).
http://www.apl.ucl.ac.uk/lectures/3c37/3c37-1.html

De blauwe lucht

Hebt U zich al eens afgevraagd hoe het eigenlijk komt dat onze lucht blauw is? Eigenlijk is de reden heel eenvoudig. Licht dat op de moleculen van onze lucht valt wordt in alle mogelijke richtingen verspreid. Dit fenomeen noemen we **verstrooiing**. In het Engels noemen we dit verschijnsel **scattering**. Deze verspreiding is afhankelijk van de golflengte van het licht: hoe kleiner de golflengte van dit invallende licht is, des te beter dit licht wordt verdeeld in de dampkring. Doordat blauw licht de kortste golflengte heeft, zeg maar het energie-rijkst is, wordt het blauw het best over de hemel verdeeld. Rood licht daarentegen wordt ook wel over de hemel verdeeld, maar niet zo goed als het blauw, vandaar dat onze hemel blauw lijkt. Dit type van scattering noemen we de **Rayleigh scattering**. Rayleigh scattering komt vooral voor door deeltjes in de lucht die kleiner zijn dan één tiende van de golflengte van het licht die ze bestraalt.

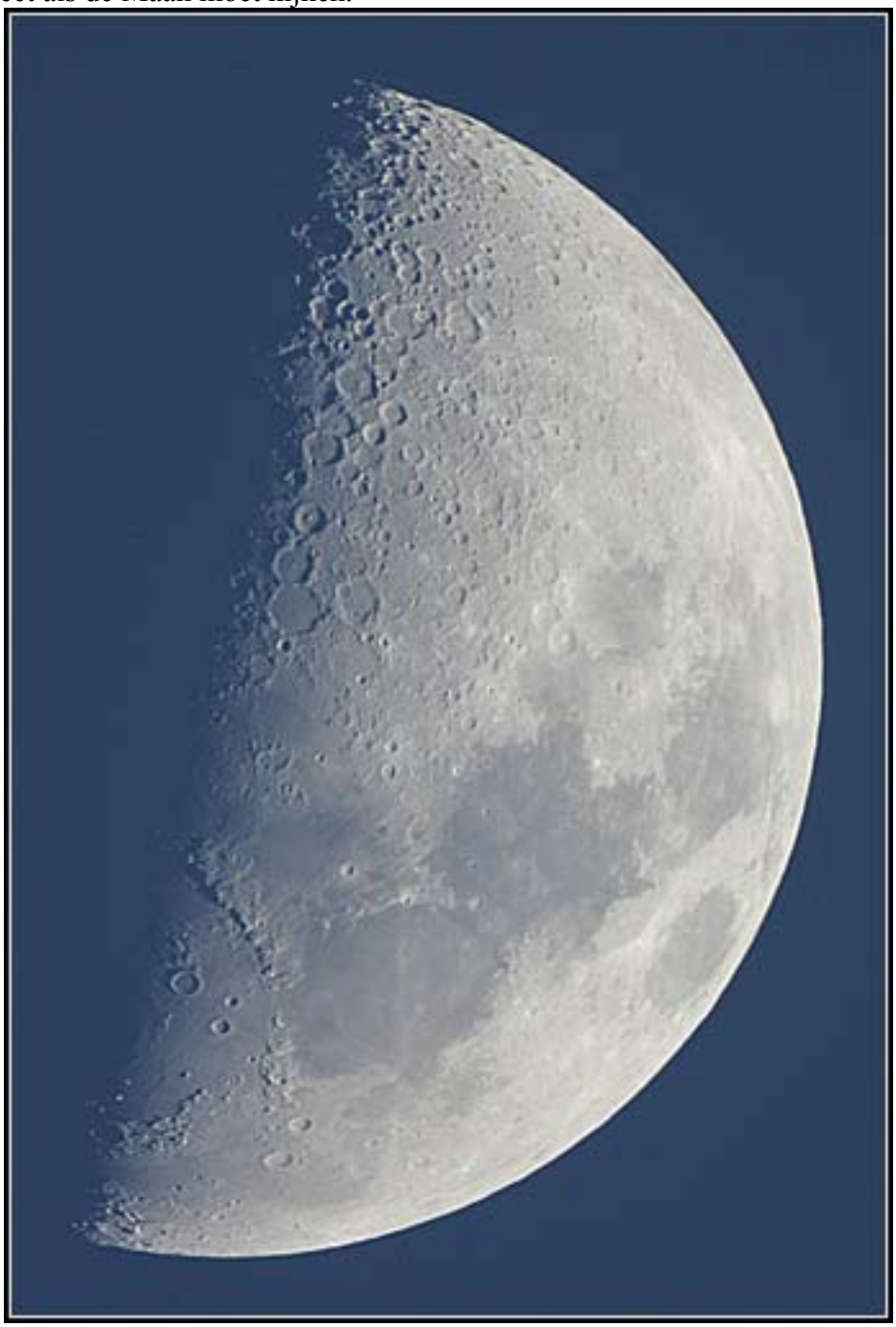
Wanneer we aan de hemel dicht van de Zon zelf naderen, dan zullen we opmerken dat, vooral wanneer er bijvoorbeeld veel stof in de lucht aanwezig is, de hemel daar helemaal niet zo blauw is als verder af van de Zon. Dit komt door de zogeheten **Mie scattering**. Dit soort van lichtverspreiding is tamelijk onafhankelijk van de golflengte van het licht, waardoor de hemel in de directe nabijheid van de Zon wit gekleurd is. Deze Mie scattering komt voor wanneer er zich deeltjes in de lucht bevinden die beduidend groter in afmeting zijn dan de golflengte van het licht die ze bestraalt.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/blusky.html

Sterrenkundige toepassing: Maanfoto's

Zolang de Zon niet is ondergegaan is het quasi onmogelijk om héél zuivere maanfoto's te nemen. Onderstaande foto maakt dit duidelijk: zolang de Zon niet is ondergegaan blijven fotonen die afkomstig zijn van de Zon verstrooid worden in de Aardatmosfeer. Deze verstrooiing zorgt als het ware voor een soort van gordijn waardoor men naar een hemelobject als de Maan moet kijken.



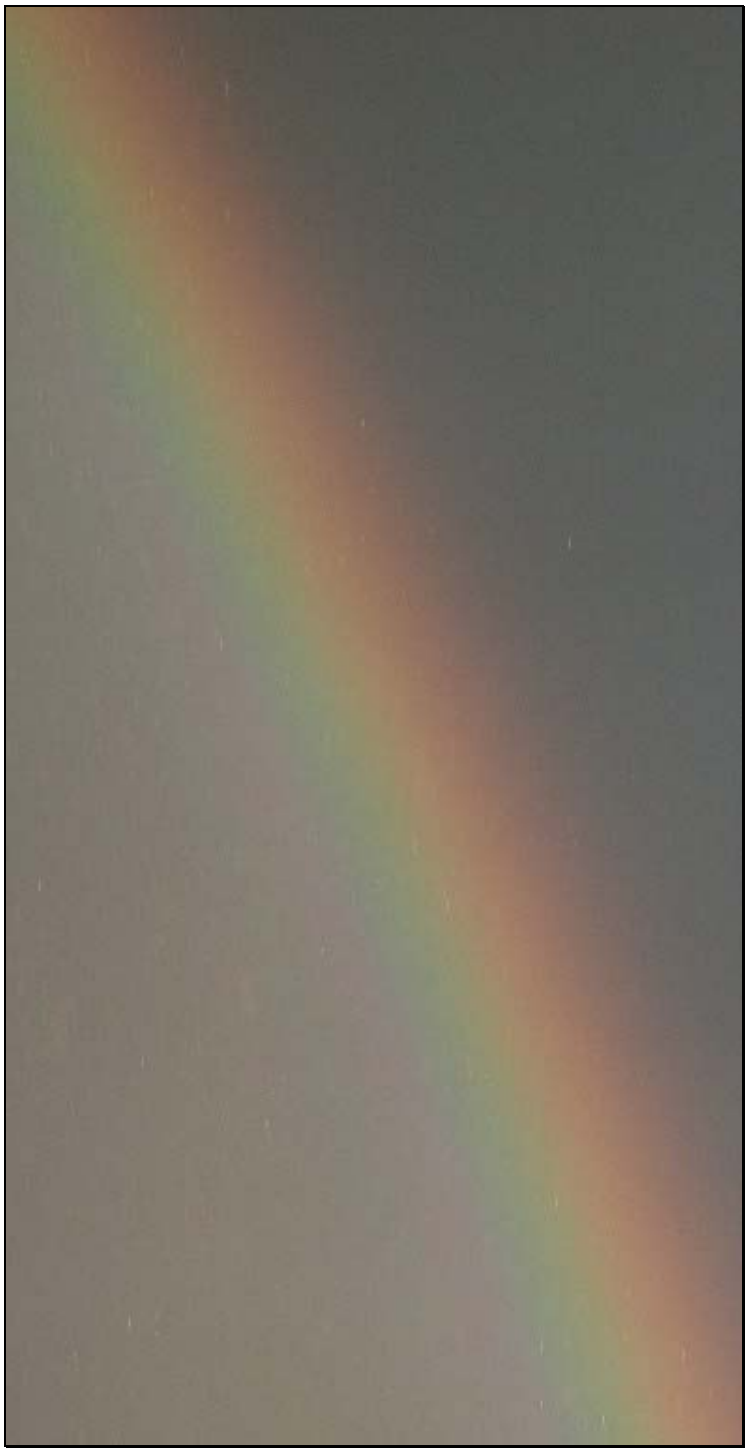
Maanfoto genomen in AstroLAB IRIS II toen de Zon nog niet onder was gegaan (25 Juni 2004 omstreeks 20h 5m UT, 1/25s @ 100 ASA, CANON EOS-1D Mark II, VAF 200/2400). We zien heel duidelijk de blauwe lucht. Het is ook alsof men door een soort van mist, afkomstig van de verstrooiing van het nog aanwezige zonlicht, aan het kijken is. Naarmate de Zon verder onder gaat wordt de hemel alsmaar donkerder. (© 2004, Philippe Vercoutter)

Waterdruppels in de lucht: regenbogen

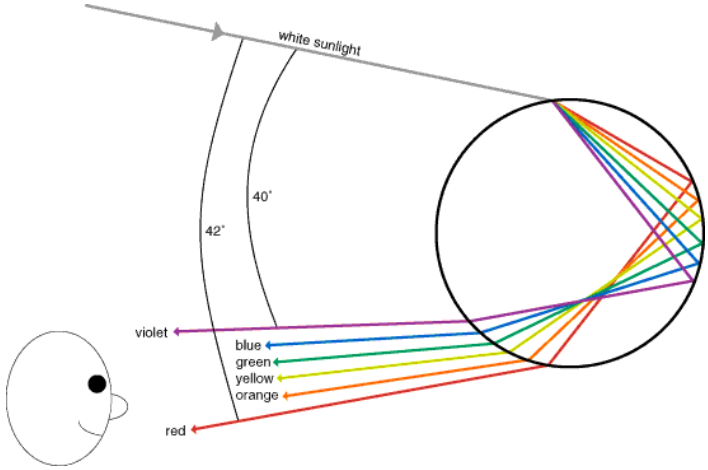
De lucht die de Aardatmosfeer uitmaakt bestaat niet enkel en alleen uit zuurstof, stikstof en nog een paar andere gassoorten. Lucht kan zowel waterdruppels als ijskristallen bevatten. Wanneer licht afkomstig van de Zon deze waterdruppels onder een welbepaalde hoek bereikt, dan kan men, indien men zich op de juiste plaats ten opzichte van de Zon en deze waterdruppels bevindt, gereflecteerd zonlicht zien. Aangezien deze reflectie afhankelijk is van de golflengte van het licht, ziet men een regenboog: rood, groen, enz. wordt immers allemaal een ietsjes anders afgebogen in de aanwezige waterdruppels.



Op 26 Oktober 2003 fotografeerde Philippe Vercoutter deze fraaie dubbele regenboog boven sterrenwacht Halley te Ledegem. De tweede regenboog tekent zich licht af rechts ten opzichte van de eerste heldere regenboog. (© 2004, Philippe Vercoutter)

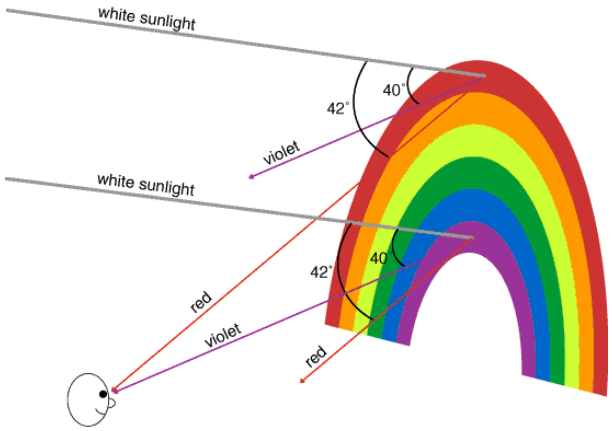


Detail van de regenboog die op 26 Oktober 2003 door Philippe Vercoutter werd gefotografeerd. De binnenste kleur van de boog is steeds violet, de buitenste ring steeds rood. Merk op hoe binnen de boog het aan het regenen is. (© 2004, Philippe Vercoutter)

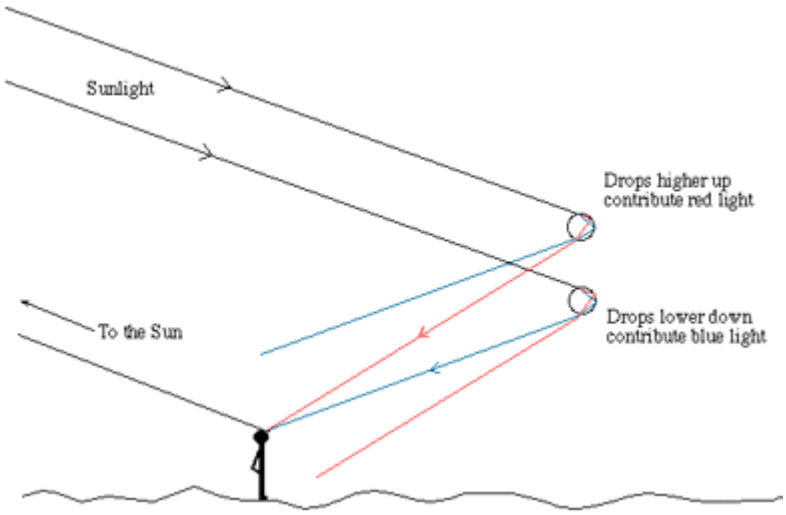


http://physics.uwstout.edu/WX/Notes/ch15notes.htm

Bij een regenboog staat de Zon altijd zo'n 40° boven het violet gedeelte ervan. Voor de rode component is dit 42°.



http://physics.uwstout.edu/WX/Notes/ch15notes.htm



http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/rainbow/rainbow3.shtml#1

Regenbogen ontstaan doordat de onderste waterdruppels in de atmosfeer vooral het blauwe en groene licht terugkaatsen en de regendruppels hoger aan de hemel vooral het rode en het gele licht.

Ijskristallen in de lucht: halo's

Hexagonale ijskristallen kunnen zich gedragen als kleine prisma's. En van prisma's weten we intussentijd al dat ze het licht kunnen opsplitsen in de diverse kleuren. Aangezien de ijskristallen die in de lucht hangen niet direct een voorkeursrichting hebben, komen er steeds wel een aantal in aanmerking om het zonlicht dat ze bereiken te breken in de diverse kleurcomponenten. Ijs heeft een brekingsindex n van 1,31 . Door berekeningen kan men aantonen dat bij dergelijke brekingsindex het licht minstens een hoek van 21,84° moet hebben willen we tot refractie van de lichtstralen komen.

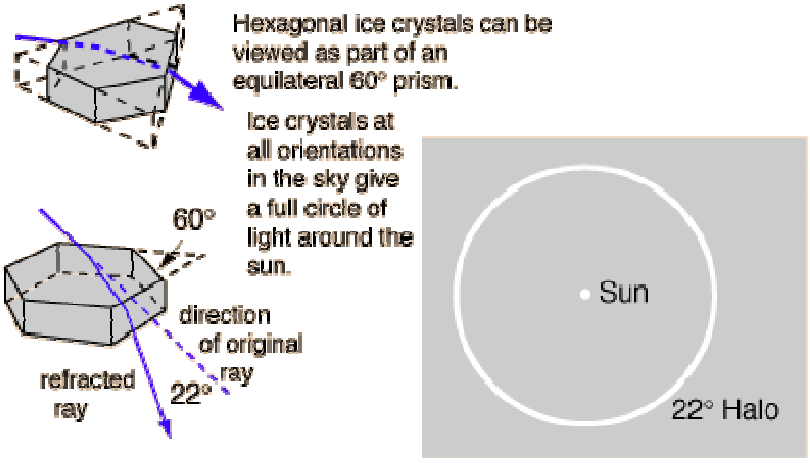
Voor alle duidelijkheid: een halo kan zowel rond de Zon als rond de Maan voorkomen: beiden kunnen licht van een voldoende hoge intensiteit op de ijskristallen laten vallen zodanig dat het fenomeen zichtbaar wordt. Lichtzwakke objecten kunnen in principe ook halo's laten zien, doch deze halo's zijn zo lichtzwak dat we ze niet kunnen waarnemen.



Bruno Nolf nam op 6 mei 2004 deze halo rond de Zon waar. Merk het 3D effect van de foto op: boom, wolken, vliegtuig-condensspoor (met bijhorende schaduw) en de halo.



Op 18 Januari 2004 nam Philippe Vercoutter een samenstand van de Maan en Saturnus waar. Rond de Maan stond een halo. Merk op dat de Maan fel overbelicht werd in deze opname precies om de halo én Saturnus te kunnen vastleggen.

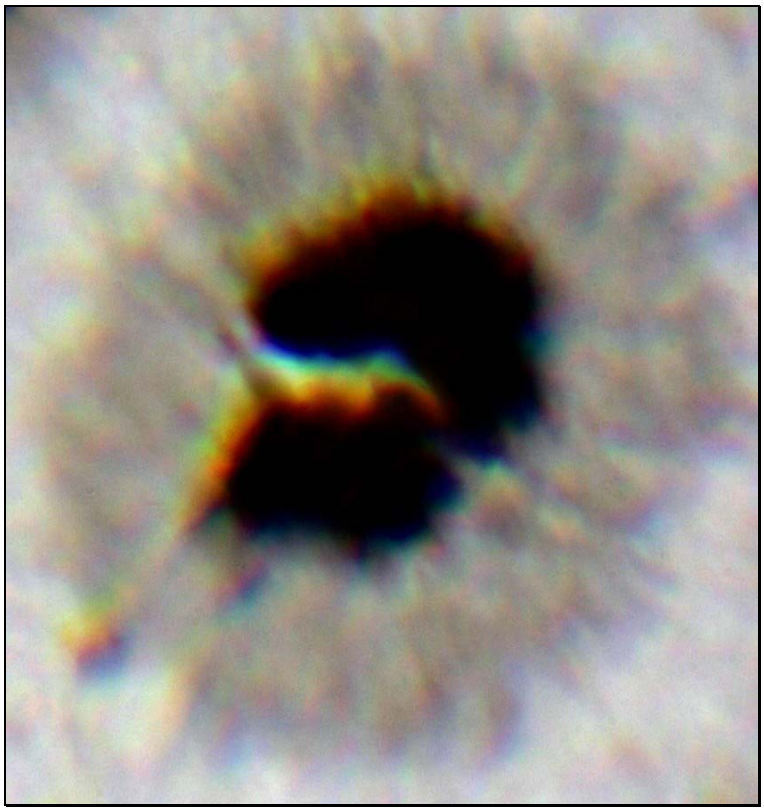


http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/atmos/halo22.html

Kleurenschifting door de aardatmosfeer

Wanneer lichtheldere objecten zich tamelijk laag aan de horizon bevinden dan zal men steeds kunnen opmerken dat het licht door de aardatmosfeer wordt geschift. We weten al dat we dit fenomeen dispersie noemen: de aardatmosfeer breekt de lichtstralen meer of minder naagelang de golflengte van het licht.

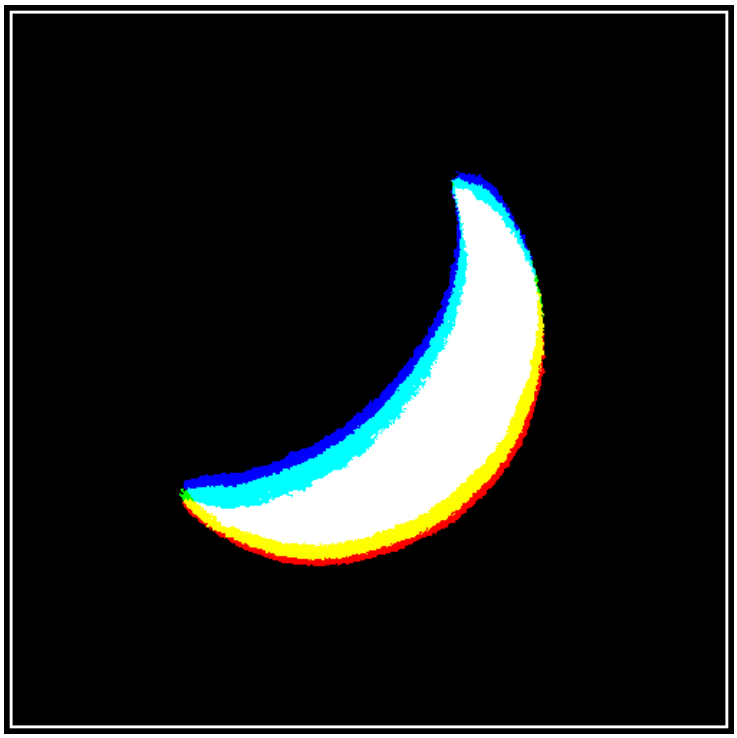
Hieronder vindt de lezer twee concrete voorbeelden uit de sterrenkunde waar dit fenomeen duidelijk werd waargenomen.



Op 28 Oktober 2003 nam Philippe Vercoutter bovenstaande opname van een lichtbrug boven zonnevlek 10489. Door het relatief late uur, 16h 9m lokale tijd, stond de Zon ook al wat lager aan de horizon. Alhoewel we overal in de opname wel wat kleurenschifting zien, valt deze toch het sterkst op bij het lichtsterkste onderdeel van de opname namelijk de lichtbrug.



Op 14 mei 2004 werd in AstroLAB IRIS II bovenstaande opname van Venus gemaakt. Venus stond op dat ogenblik zo'n 16° boven de horizon. De kleurenschifting, vooral aan de onderste punt van de sikkel, valt onmiddellijk op.



Wanneer we in de Venus opname van hierboven het contrast fel opdrijven (met maar liefst 100% bijvoorbeeld), dan zien we onmiddellijk hoe het beeld van de Venussikkel, die bestaat uit gereflecteerd wit zonlicht, al naar gelang de kleur door de Aardatmosfeer wordt verschoven. In feite is de witte sikkel die we hier waarnemen het resultaat van allemaal verschoven rode, groene, blauwe, enz. Venussikkeltjes. Op de plaats waar al die verschoven kleuren elkaar bedekken zien we wit verschijnen.

1.10. Manipulatie van Licht

Of er nu analoog of digitaal aan beeldcaptatie wordt gedaan, steeds moet men eerst het licht conditoneren zodanig dat we *het* beeld krijgen die we wensen. Een beeld wordt meestal niet 'zomaar' genomen: meestal wil men een bepaald kenmerk van het object of de situatie die men fotografeert naar voren laten komen. Ook moet het beeld aan een aantal technische kenmerken (lichtintensiteit, golflengte, polarisatie, ...) voldoen opdat het op een goede manier kan worden vastgelegd door de lichtdetector (digitale camera, CCD, film).

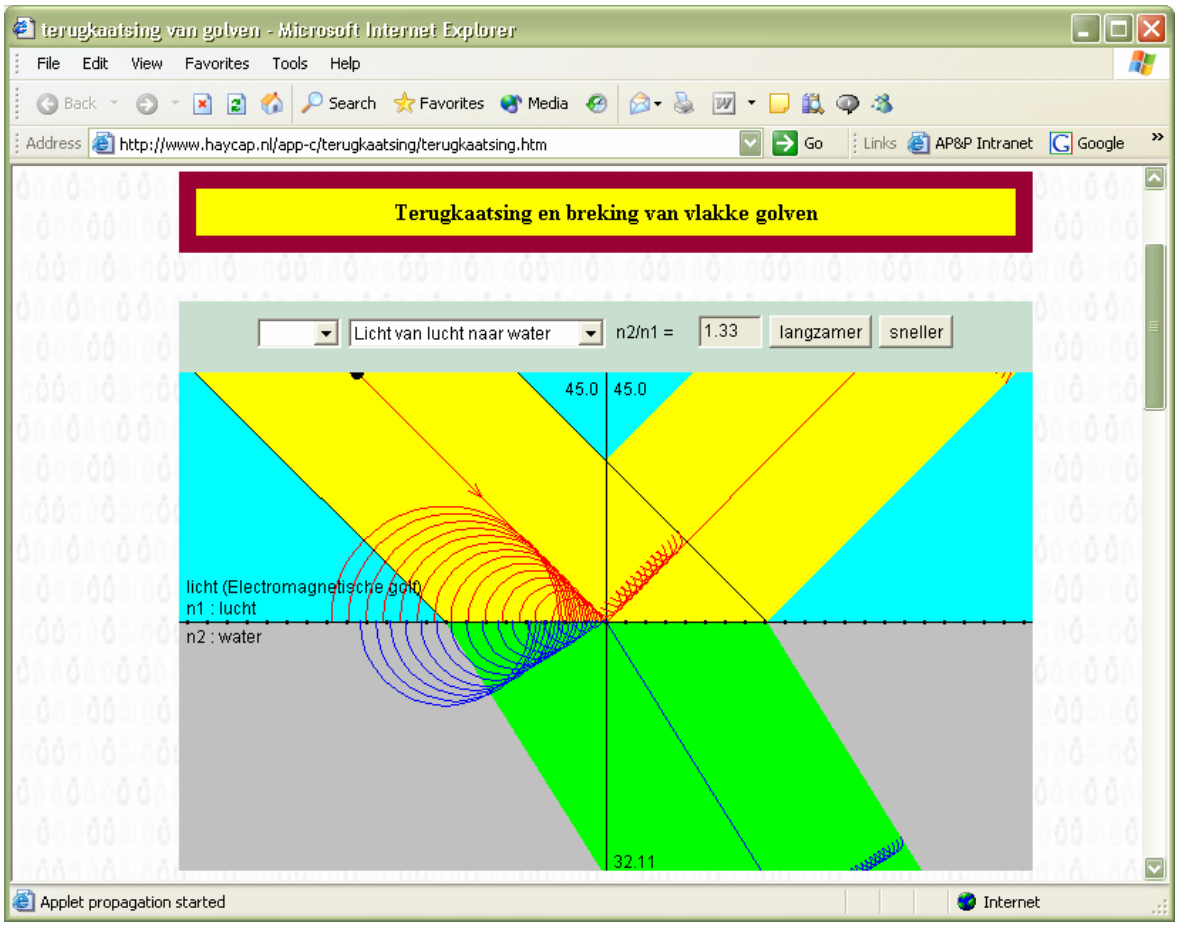
In de loop van de jaren heeft de mens talrijke systemen ontwikkeld om licht zodanig te conditioneren dat er goed konden worden waargenomen. Deze hulpsystemen zijn spiegels, lenzen, prisma's, filters, enz. of meer geavanceerde systemen als telescopen.

Veranderen van lichtrichting (vlakke spiegels)

Een spiegelend oppervlak is een van de eenvoudigste optische systemen die we kennen. Het principe is eigenlijk al heel lang gekend: denk bijvoorbeeld alleen nog maar eens aan een reflecterend wateroppervlak. In principe zijn de meeste objecten wel ergens spiegelend: ze reflecteren allemaal wel een stukje van het licht die ze ontvangen want anders zouden we ze zelfs gewoon niet zien.

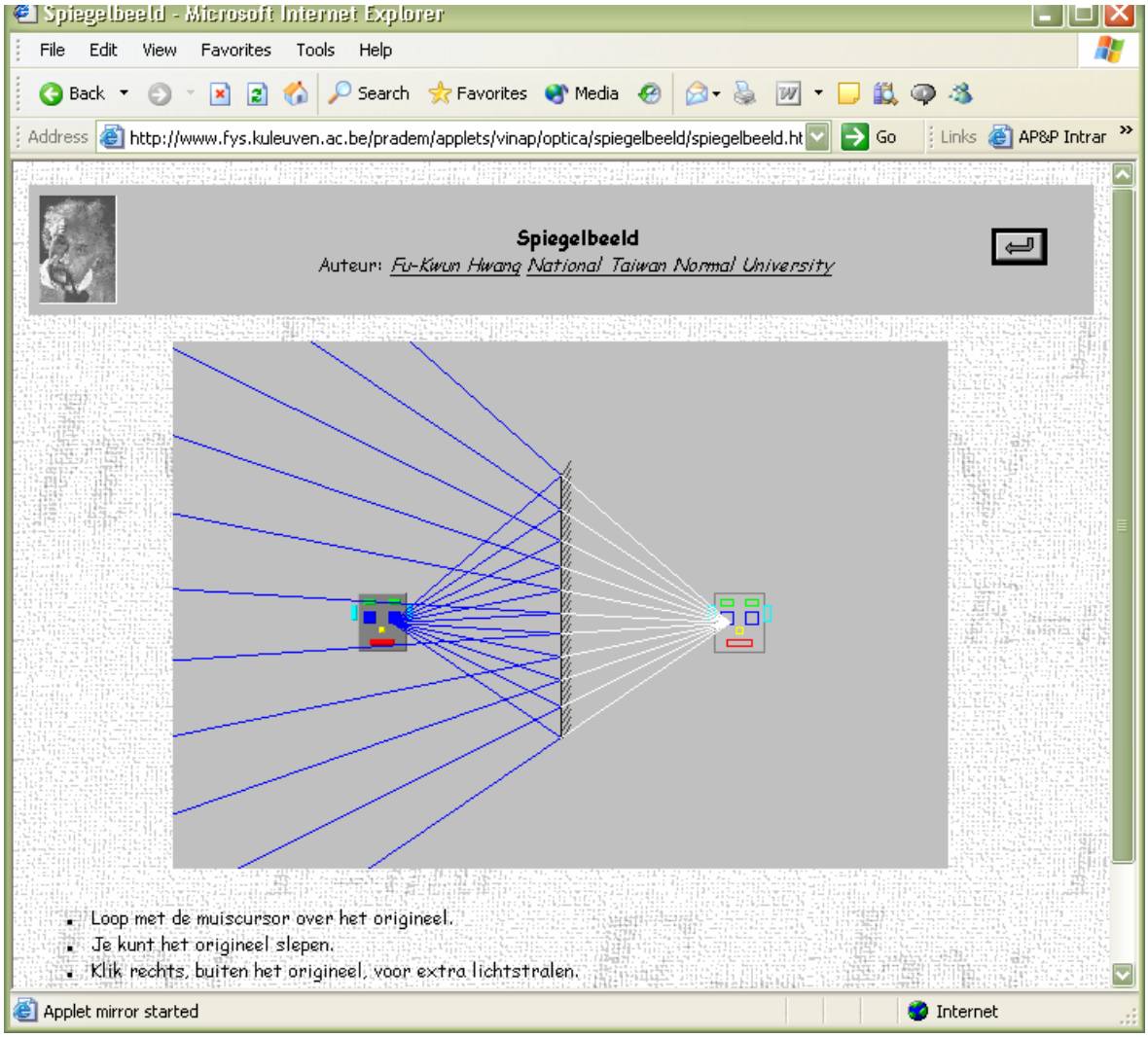
Het speciale van een **vlakke spiegel** is dat het de lichtstralen die er op vallen onder een welbepaalde hoek, voor de rest onvervormd terugkaatst onder een gelijkaardige gelijke hoek loodrecht op het spiegelend oppervlak. De richting die loodrecht op de spiegel staat noemen we **de normaal**. **Weerkaatsing** is een belangrijk basisprincipe uit de wereld van de optica.

Met een vlakke spiegel kunnen we op een heel eenvoudige manier licht dat van een bepaalde richting komt een totaal andere weg opsturen. In welke richting we het licht opsturen wordt volledig bepaald door de hoek waaronder we de spiegel plaatsen ten opzichte van het invallende licht.



http://www.haycap.nl/app-c/terugkaatsing/terugkaatsing.htm

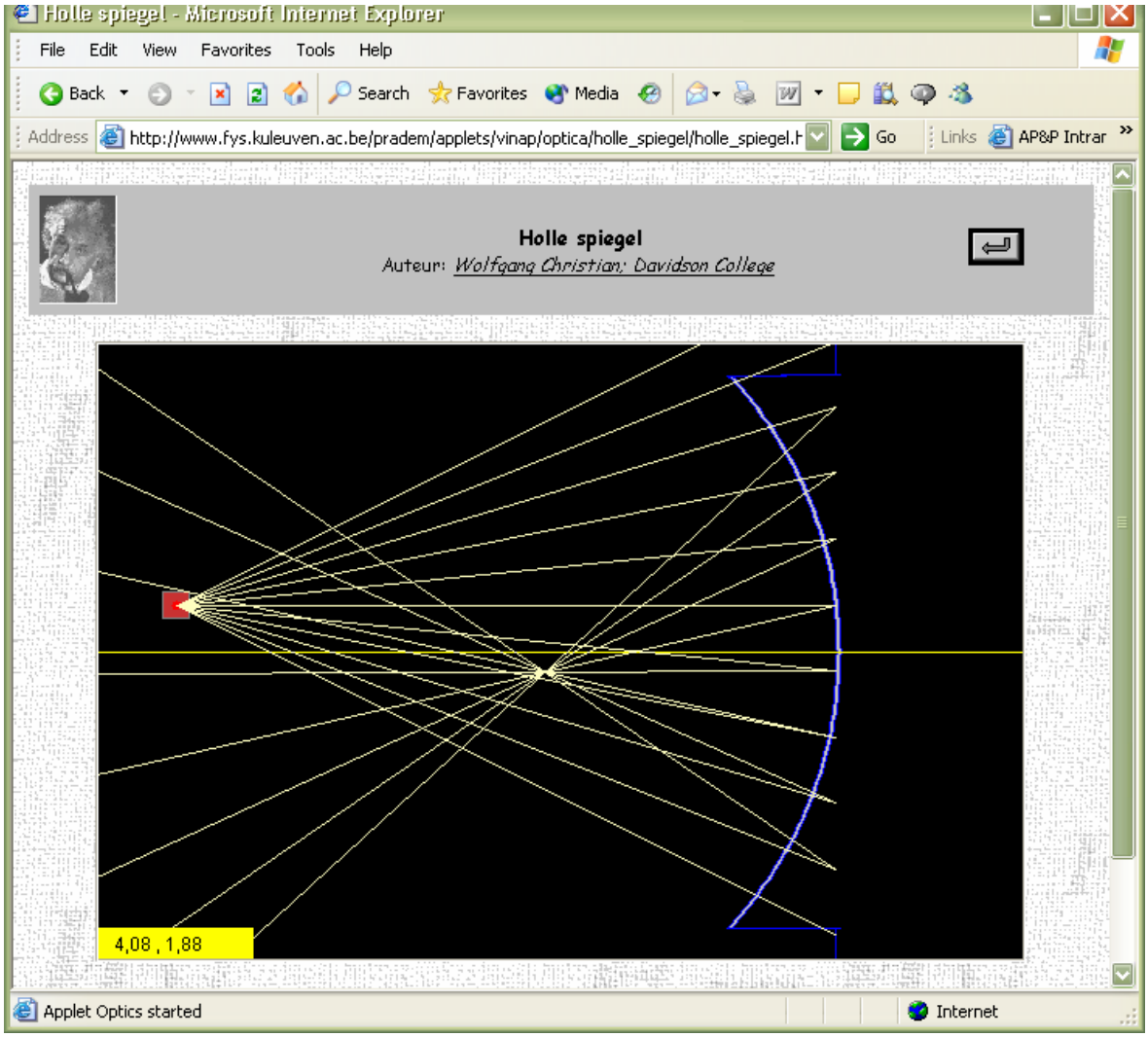
Deze JAVA applet illustreert hoe een lichtbundel wordt weerkaatst op een wateroppervlak (of een ander in te stellen oppervlak). Dit wateroppervlak gedraagt zich net als een spiegel. Je kunt zelf de hoek instellen waaronder de lichtbundel het wateroppervlak raakt. Je zult opmerken dat de hoek waaronder de lichtbundel wordt teruggekaatst steeds gelijk is aan die hoek.



http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/spiegelbeeld/spiegelbeeld.html
Daar vind je een JAVA applet die het principe van een vlakke spiegel en het beeld dat er wordt gevormd mooi aantoont.

Concentreren van licht (holle spiegels)

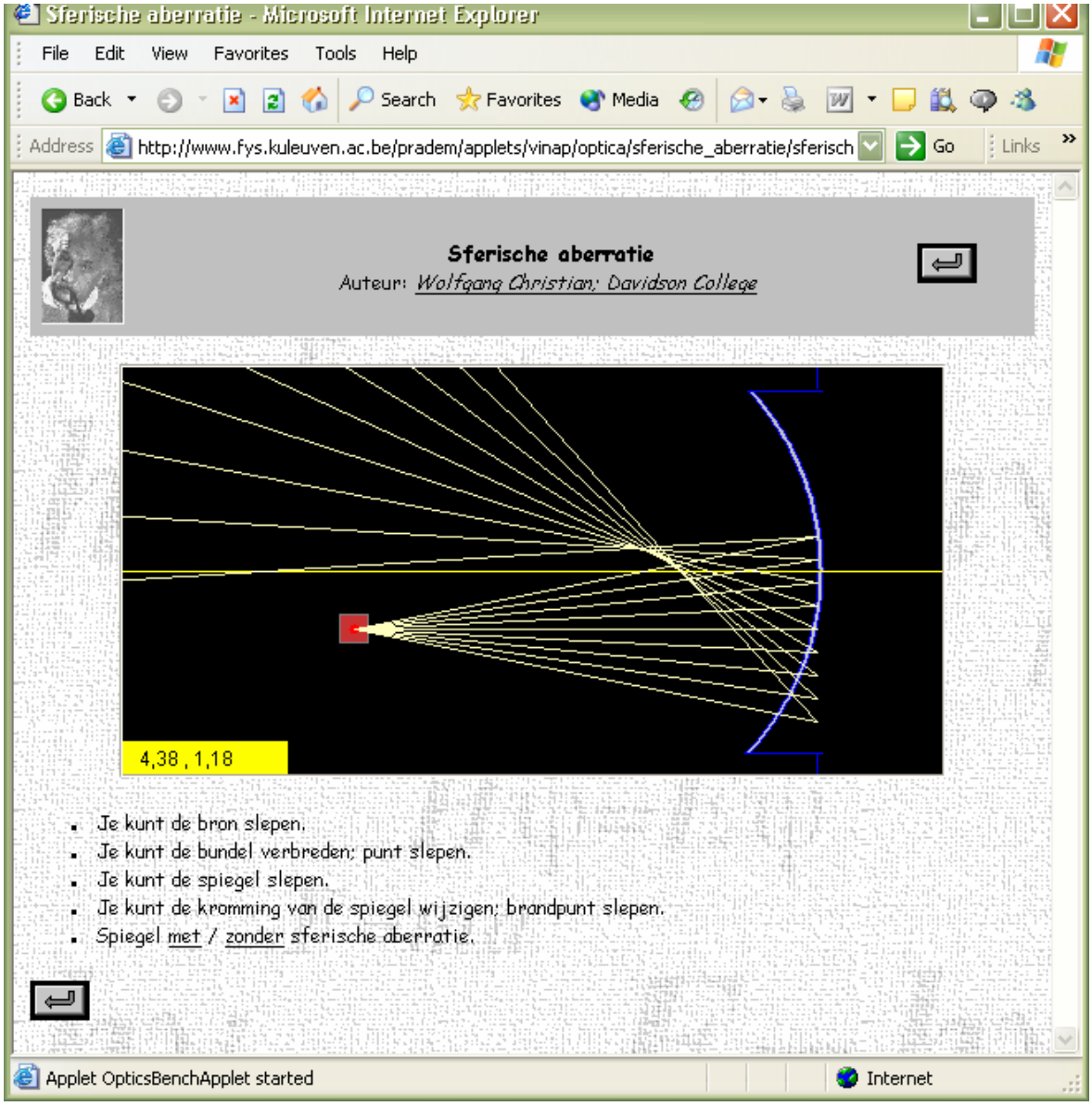
Een holle spiegel heeft als basiseigenschap dat het het licht naar de optische as toe afbuigt. Volg je alle lichtstralen die van een lichtbron afkomstig zijn en die op zo'n holle spiegel worden weerkaatst, dan zul je merken dat deze lichtstralen allemaal min of meer in hetzelfde punt, **het brandpunt**, samenkomen. Een holle spiegel kun je dus zien als een lichtconcentrator. Het punt waar al dit geconcentreerd licht samenkomt is dus het brandpunt.



http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/holle_spiegel/holle_spiegel.html
Deze JAVA applet laat je interactief toe om te kijken wat er precies gebeurt bij de afbeelding van een object bij een holle spiegel. Het punt waar alle gereflecteerde lichtstralen in samenkomen noemen we **het brandpunt**. Wanneer je het object loodrecht op de optische as (= horizontale centrale lijn) beweegt, dan zul je zien dat het gevormde beeld ook loodrecht op de optische as (in **het brandvlak**) zal bewegen. Van objecten die

dichter bij de spiegel liggen zal het gevormde beeld verder van de spiegel verwijderd liggen dan van objecten die verder af gelegen zijn.

- ***Sferische aberratie***

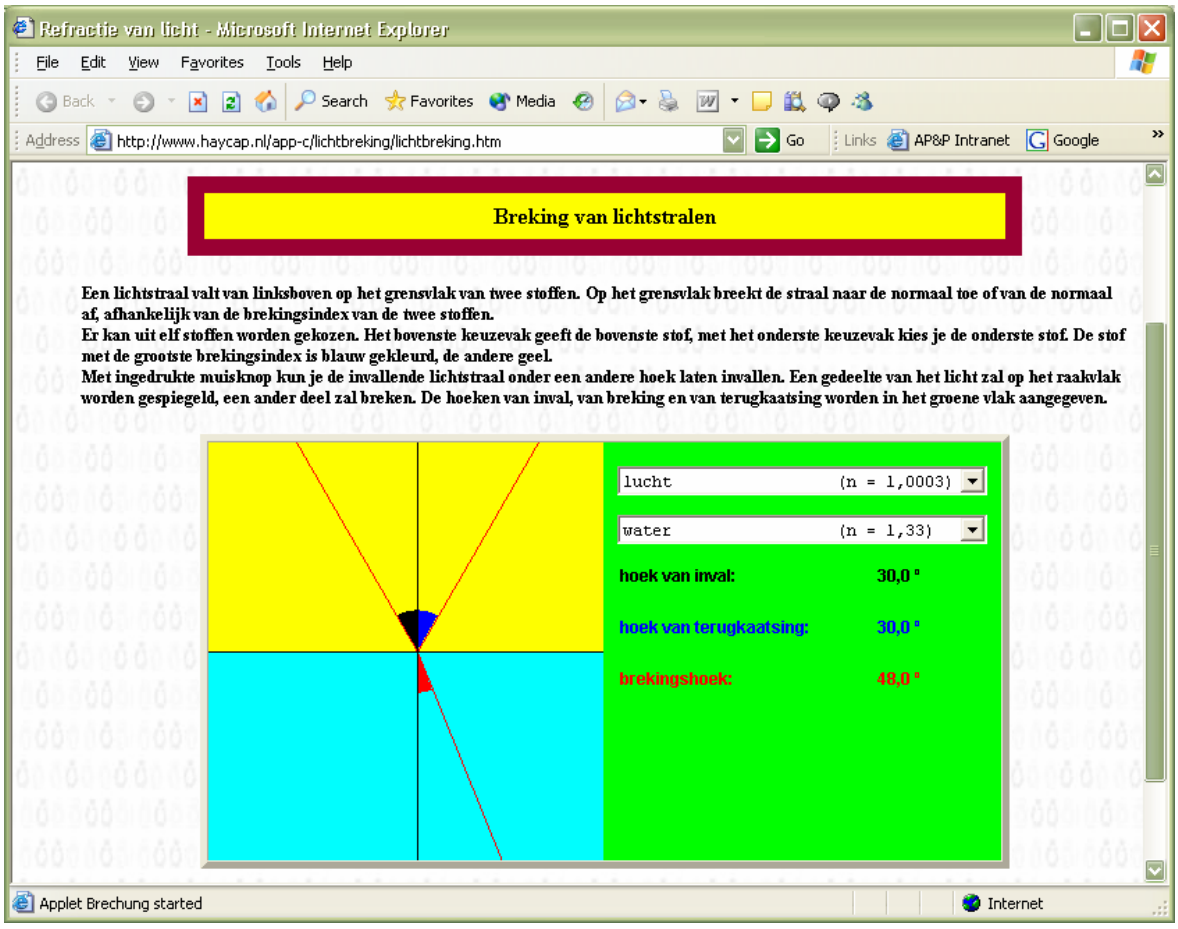


http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/sferische_aberratie/sferische_aberratie.html
Deze JAVA applet laat toe te kijken wat er met de lichtstralengang gebeurt in het geval een holle spiegel last heeft van **sferische aberratie** (of niet). In het geval van sferische aberratie komen alle lichtstralen van een bepaalde lichtbron niet allemaal netjes in het brandpunt van de spiegel samen. Iedere sferische spiegel heeft last van sferische aberratie.

Vandaar dat men in telescopen gebruik maakt van paraboloïde-oppervlakken: bij dergelijke spiegels komen alle stralen wél degelijk samen in dat ene brandpunt.

Het breken van het licht (refractie)

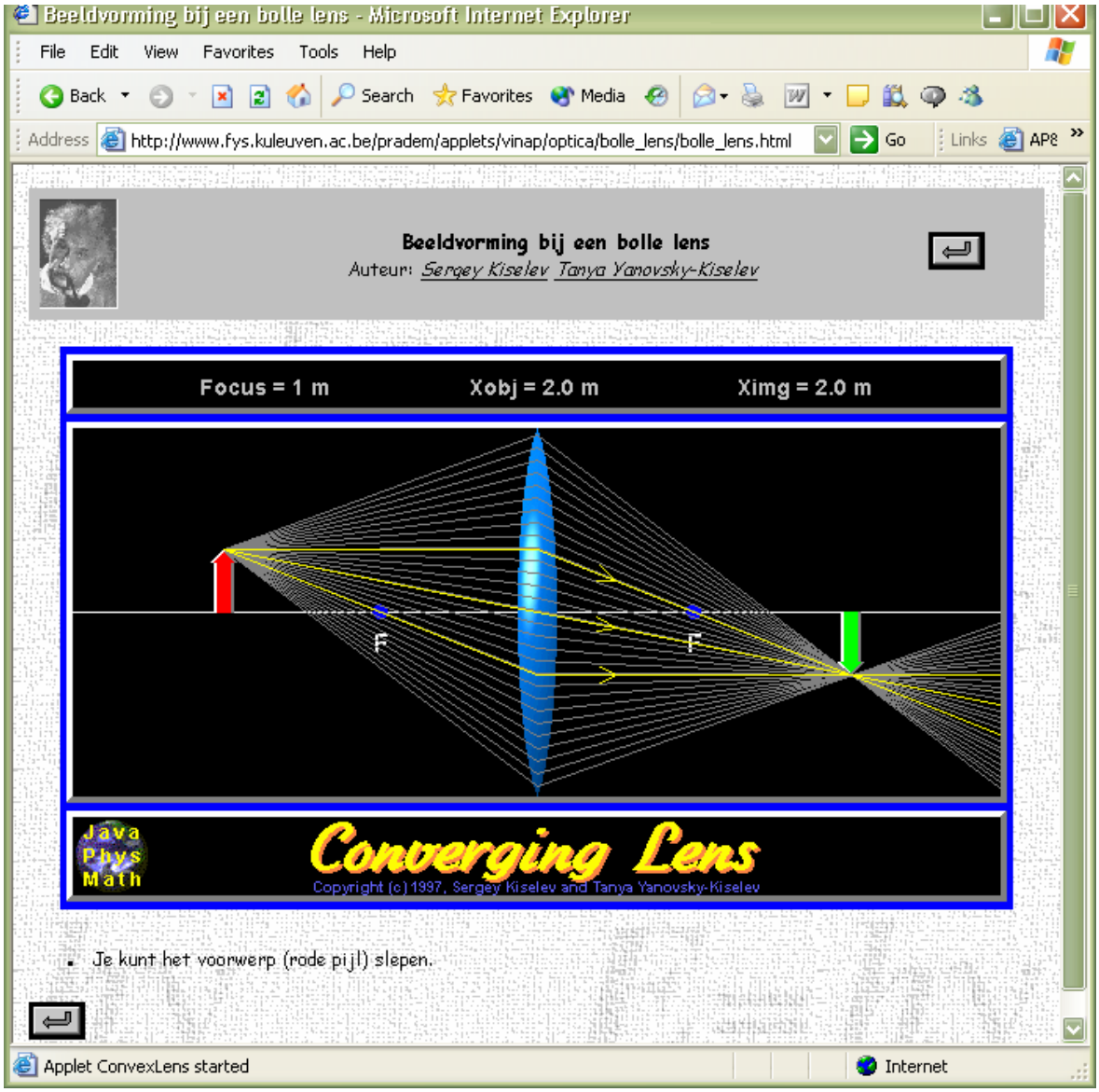
Wanneer licht overgaat van de ene materie (bijv. lucht) naar een andere (bijv. glas), dan wordt de lichtstraal volgens een bepaalde wetmatigheid gebroken: dit wil zeggen dat het licht zich dan in een andere richting voortplant. Dit fenomeen noemen we **refractie**. Naar gelang de materiesoort zal de lichtstraal meer of minder worden afgebogen. We zeggen dat iedere materiesoort een zekere **brekingsindex**, meestal genoteerd als *n*, heeft.



http://www.haycap.nl/app-c/lichtbreking/lichtbreking.htm
Deze JAVA applet illustreert heel goed wat er gebeurt wanneer een lichtstraal die zich in een bepaald milieu (bijv. lucht) bevindt, plotseling doorheen een ander milieu voortbeweegt: de golflengte van het licht blijft in principe gelijk, maar de lichtstraal zal lichtjes worden afgebogen. Dit principe noemt men refractie. De applet laat toe om verschillende materies te kiezen en aldus te bestuderen wat er in die verschillende gevallen gebeurt.

Concentreren van licht (bolle lenzen)

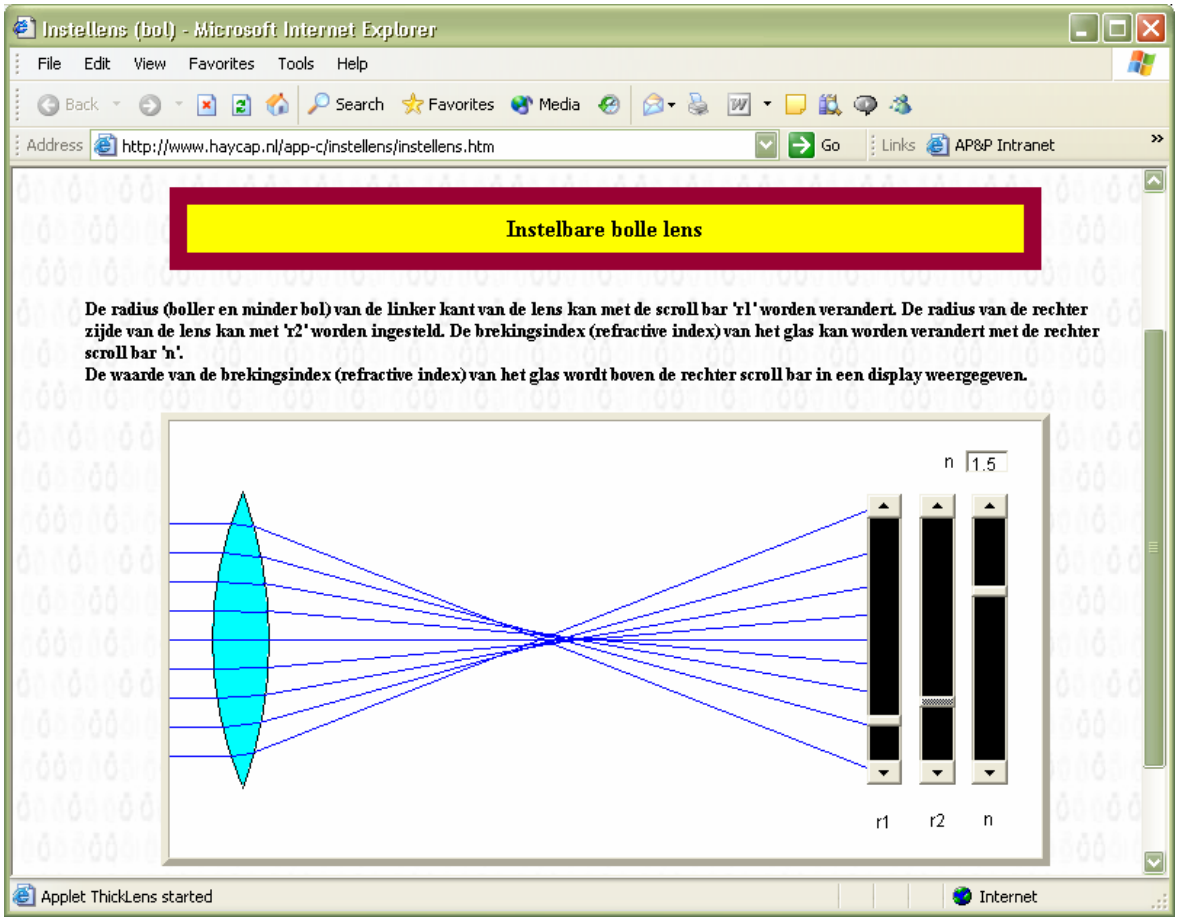
- ***Principe van de bolle lens***



http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/bolle_lens/bolle_lens.html
Deze JAVA applet laat toe te kijken wat er met de lichtstralengang gebeurt in het geval deze door een bolle lens gaat. Het brandpunt bevindt zich rechts van de bolle spiegel (het punt F). Alle lichtstralen die van het object, voorgesteld door de rode pijl links, afkomstig zijn komen in dit brandpunt samen. Verschuif je het rode object naar de bolle lens toe, dan zal het brandpunt naar rechts verschuiven (dichtere objecten hebben een brandpunt dat verder van de lens afliggen dan verder afgelegen objecten).

http://www.haycap.nl/app-c/bolle/bolle.htm

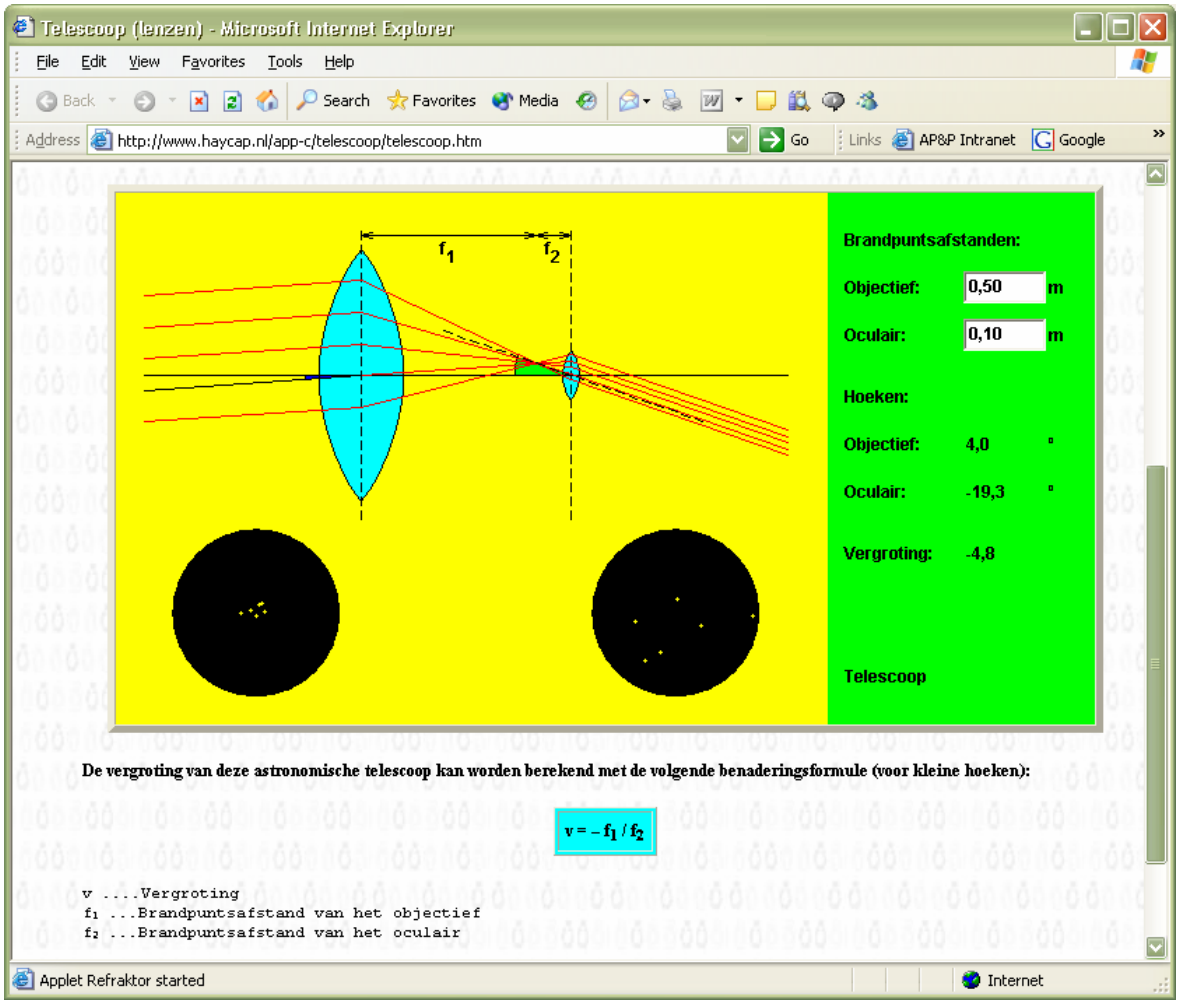
- ***Voornaamste parameters van een bolle lens***



http://www.haycap.nl/app-c/instellens/instellens.htm

Het beeld dat wordt gevormd met behulp van een bolle lens wordt bepaald door de brekingsindex n van het glas waaruit de lens bestaat, maar ook van de krommingsstralen r van de beide glas-luchtcontactoppervlakken. De kromtestraal bepaalt de mate van "bolheid" van een oppervlak. Deze JAVA applet laat toe deze drie parameters in te stellen. Merk op dat bij lagere brekingsindexen alle lichtstralen veel beter focuseren (allemaal in één en hetzelfde punt terecht komen) maar ook dat de brandpuntsafstand toeneemt.

- ***Toepassing: de Astronomische Telescoop (refractor)***

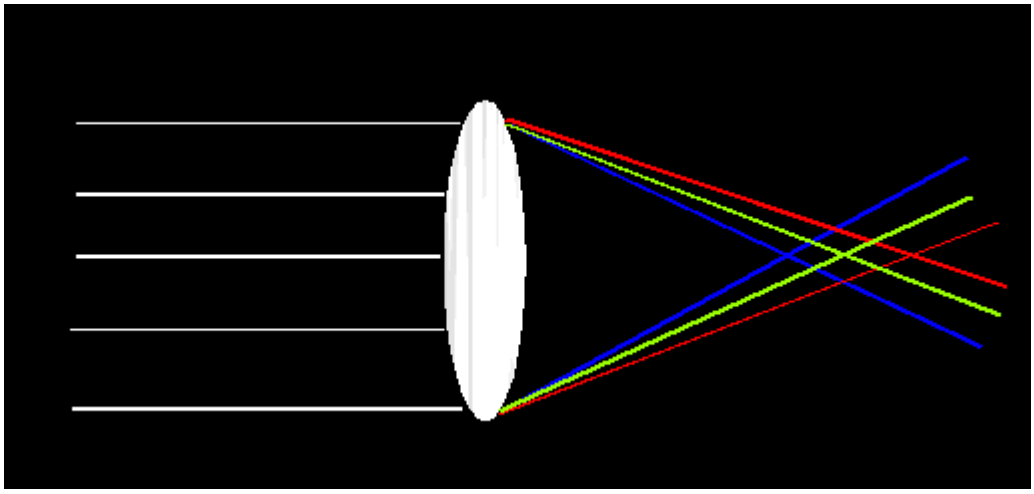


http://www.haycap.nl/app-c/telescoop/telescoop.htm

Deze JAVA applet toont op een overzichtelijke wijze het principe van een astronomische telescoop (sterrenkijker, refractor): de grootste lens links noemen we het **objectief**. Hoofdbedoeling van het objectief is zoveel mogelijk licht te verzamelen van het object die men waarneemt (planeten, sterren, sterrenstelsels, enz.). Achteraan de buis bevindt zich dan een tweede lens: het **oculair**. Met dit oculair wordt een uitvergroting gedaan van het beeld dat door het objectief in het brandpunt van de telescoop wordt gevormd. Het is deze uitvergroting die de waarnemer met zijn eigen oog bekijkt. Hoeveel er precies zal worden uitvergroot kun je berekenen aan de hand van de formule die onder de applet staat aangegeven. Onderaan zie je nog twee zwarte cirkels met daarin een aantal sterren getekend: links zie je hoe dit sterrenbeeldje er aan de hemel uitziet, rechts hoe je ditzelfde sterrenbeeld door het oculair ziet: het beeld is niet alleen vergroot (wat uiteraard de bedoeling was), maar ook gespiegeld (links en rechts zijn verwisseld) en omgekeerd (staat op zijn kop); en dat was natuurlijk niet echt de bedoeling.

- ***Chromatische aberratie***

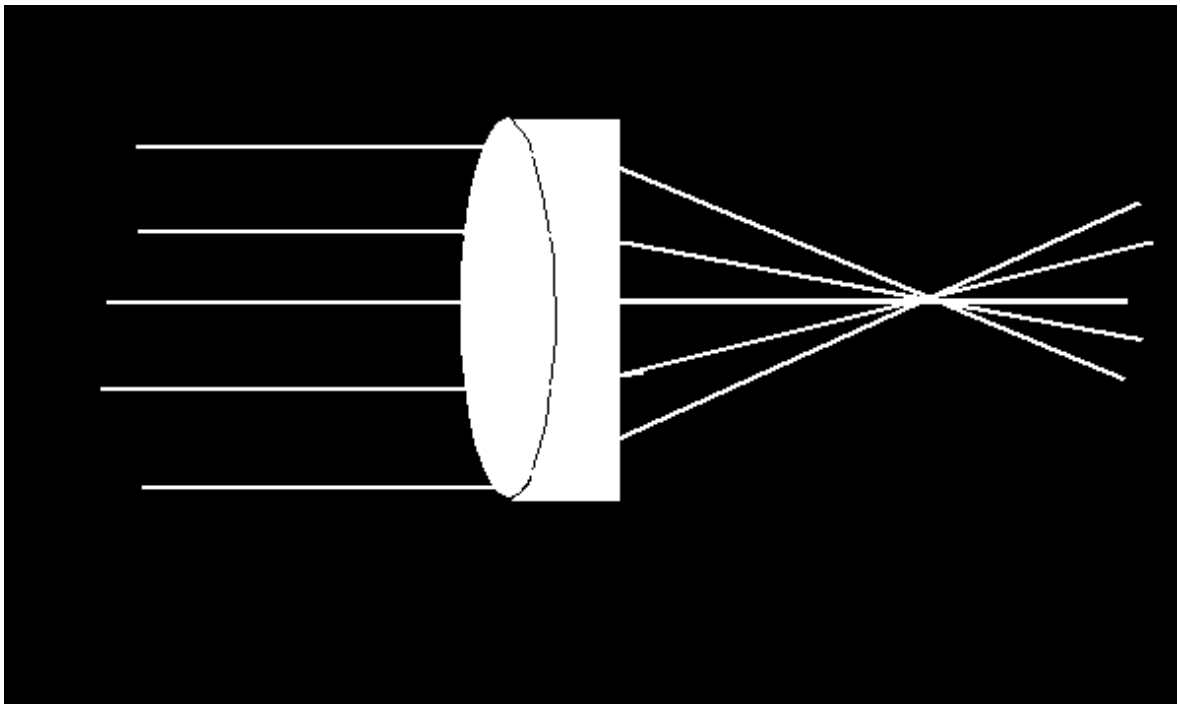
Lenzen breken iedere kleurcomponent waaruit een lichtbundel bestaat op een andere manier. Dit betekent dat het brandpunt van iedere kleurcomponent op een iets andere plaats ligt. Of nog: de brandpuntsafstand voor iedere kleur is dus iets verschillend.



Chromatische aberratie betekent dat alle kleuren niet in hetzelfde punt worden gefocuseerd. Een enkelvoudige bolle lens heeft veel last van deze lensfout.
(http://www.yorku.ca/eye/chroaber.htm)

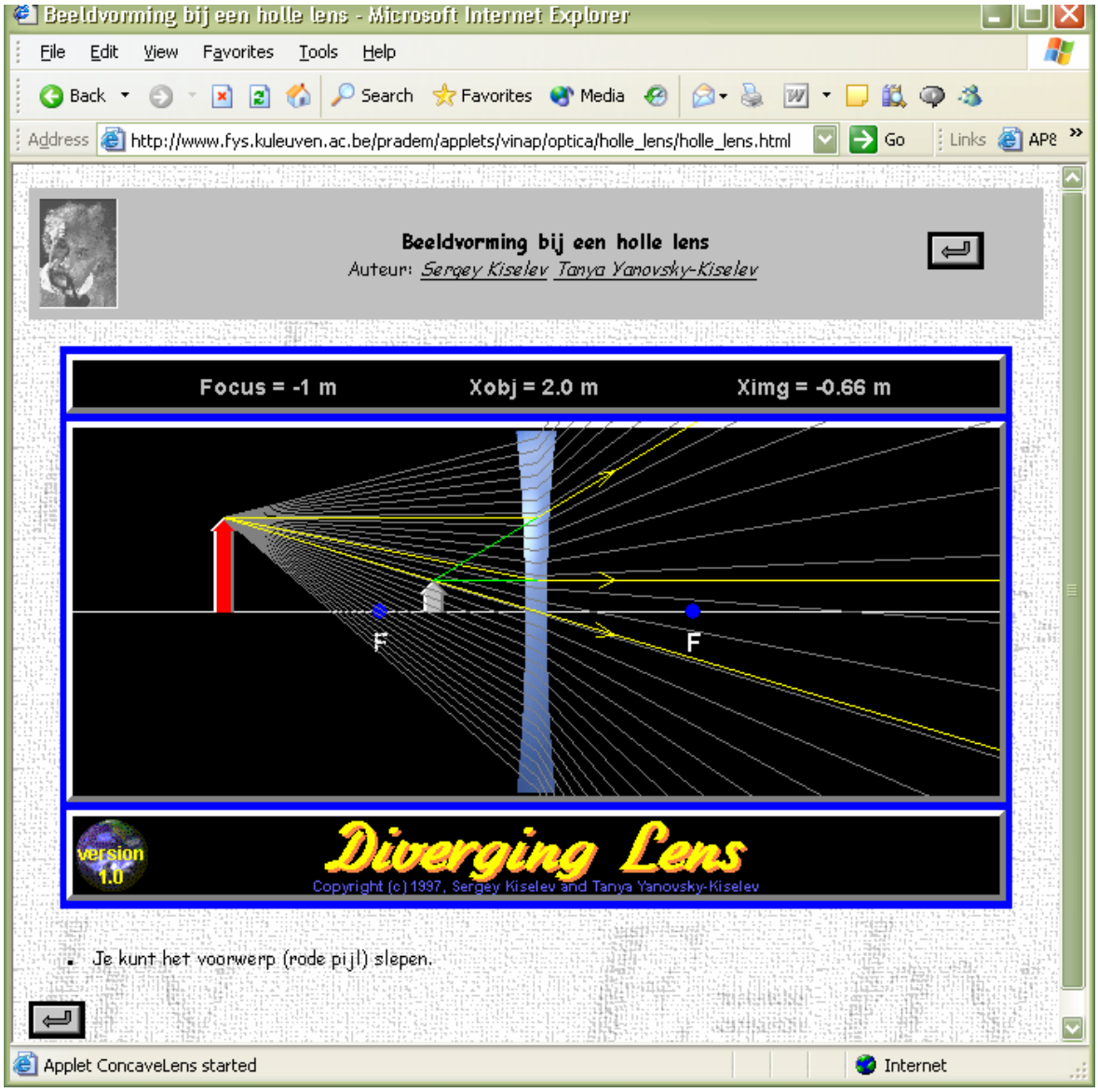
Dit heeft natuurlijk nare gevolgen voor kleurencamera's die in één kleur een scherp beeld willen opnemen (de zogeheten single-shot kleurencamera's). In principe is het bij deze eenvoudige optische systemen (bestaande uit slechts één enkele lens) onmogelijk om het beeld scherp te hebben in alle kleuren. Zwart/wit CCD-camera's hebben niet direct een probleem met chromatische aberratie aangezien men daar opnames maakt in één bepaalde kleursoort per keer. Men neemt één foto in het blauwe licht, één foto in het groene licht en één foto in het rood. Daarna worden deze drie foto's samengebracht tot één kleurenfoto. Bij dergelijke monochrome camera's zal men telkenmale men in een andere lichtsoort (kleur) fotografeert, iedere keer opnieuw scherpstellen.

Om chromatische aberratie tegen te gaan zal men in **achromatische systemen**, kortweg ook nog achromaten genoemd, gebruik maken van twee lenzen: de bolle lens wordt onmiddellijk gevolgd door een holle lens die er net oppast. Zo'n koppel lenzen noemt men een **doublet**. De lenzen bestaan uit glas met een andere brekingsindex. Op deze manier slaagt men er min of meer in (dus niet helemaal) alle kleuren in hetzelfde brandpunt te focuseren.



In een achromaat wordt een bolle en holle lens van een verschillende glassoort gecombineerd om de verschillende kleurencomponenten van een beeld toch min of meer in één en hetzelfde brandpunt te focuseren. (http://www.yorku.ca/eye/achromat.htm)

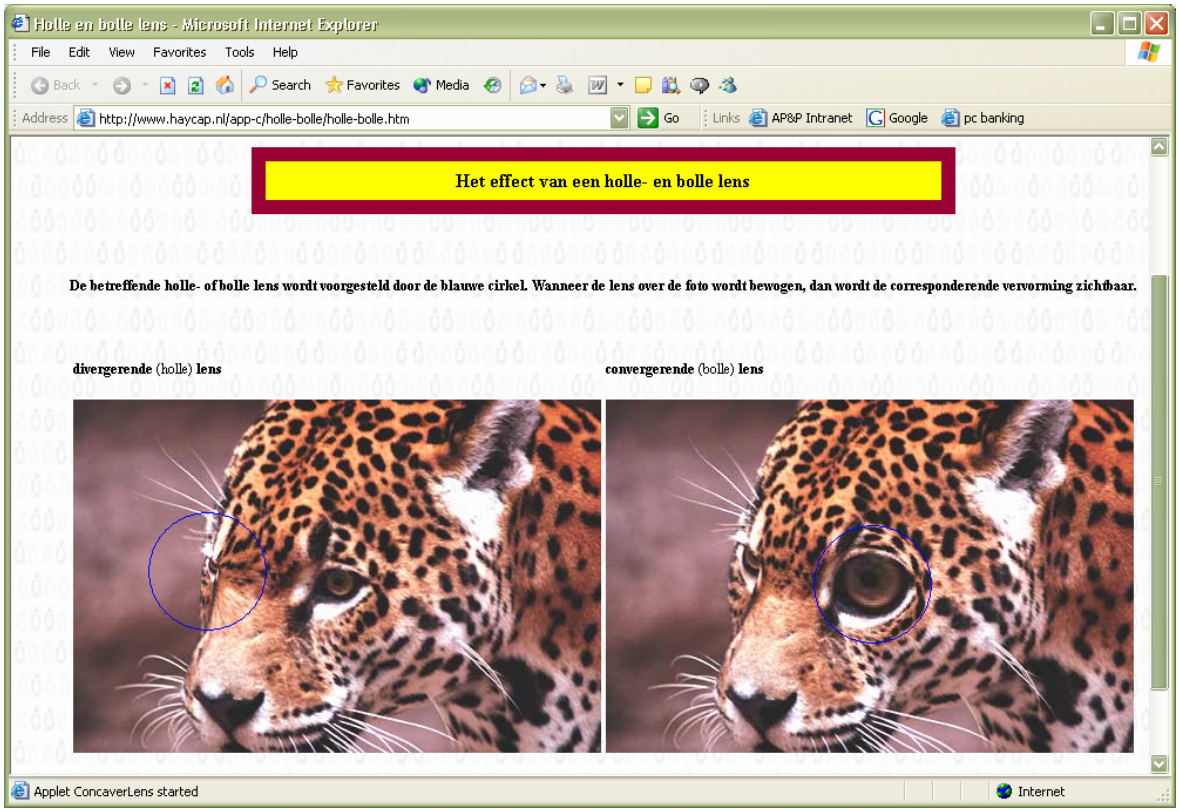
Divergeren van licht (holle lens)



http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/holle_lens/holle_lens.html
Deze JAVA applet laat toe te kijken wat er met de lichtstralengang gebeurt in het geval dat deze door een holle lens wordt gestuurd. Merk op dat in dit geval het brandpunt eigenlijk vóór de lens ligt. Dit is een **virtueel brandpunt**. We zien hier duidelijk dat de stralen, eenmaal ze de lens voorbij zijn, divergeren (de lichtstralen rechts van de lens waaien als het ware uit).

http://www.haycap.nl/app-c/holle/holle.htm

Wil je nog eens praktisch het verschil zien tussen een bolle en holle lens, experimenteer dan even met onderstaande JAVA applet.

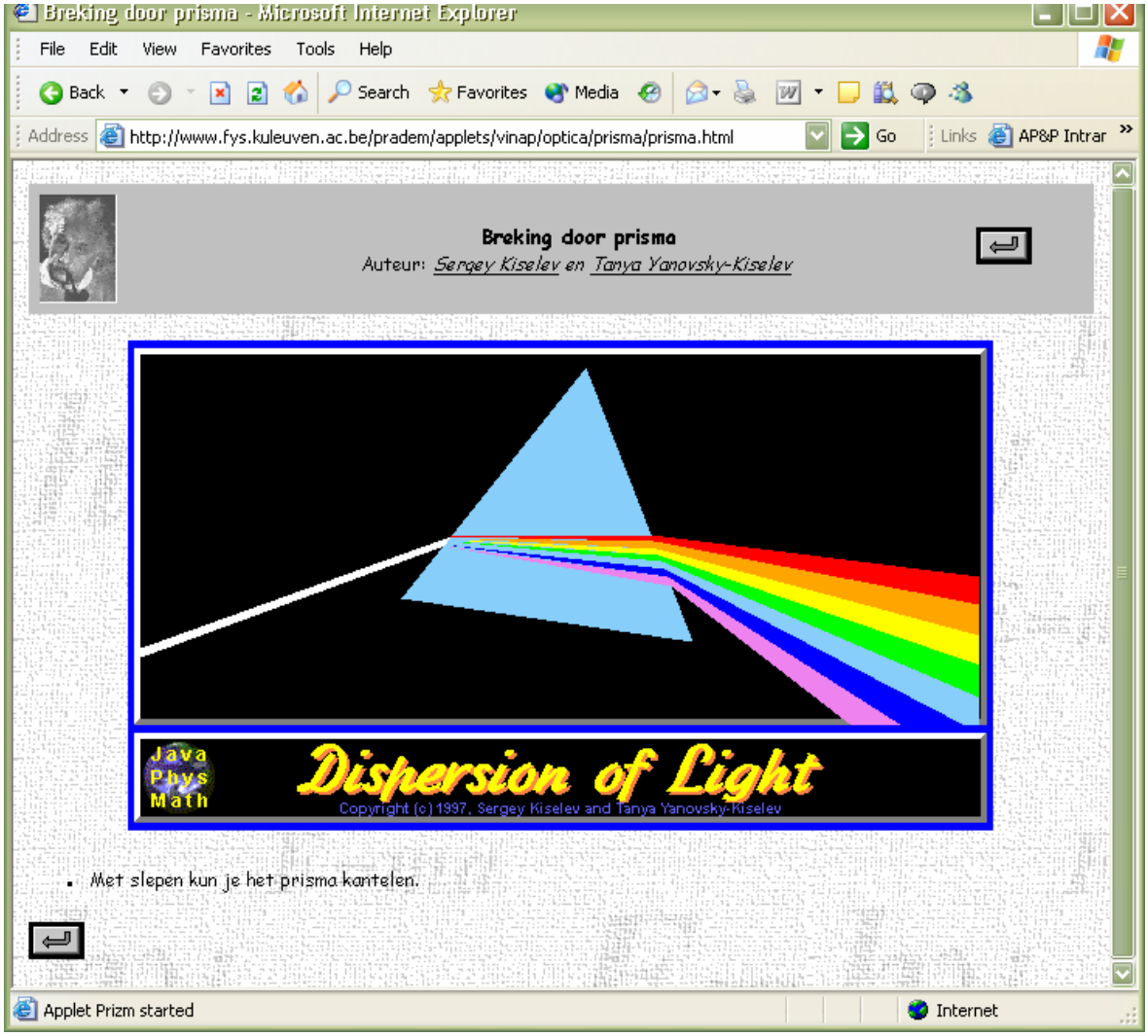


http://www.haycap.nl/app-c/holle-bolle/holle-bolle.htm

Opsplitsing in monochromatisch licht (prisma's)

Het principe waarbij licht wordt opgesplitst in haar componenten noemen we **dispersie**. Licht kan op verschillende manieren worden gebroken. Dit kan door het licht te laten invallen op driehoekige, vierkantige of zelfs vijfhoekige stukken glas (**prisma's** geheten).

- ***Driehoekige prisma's***



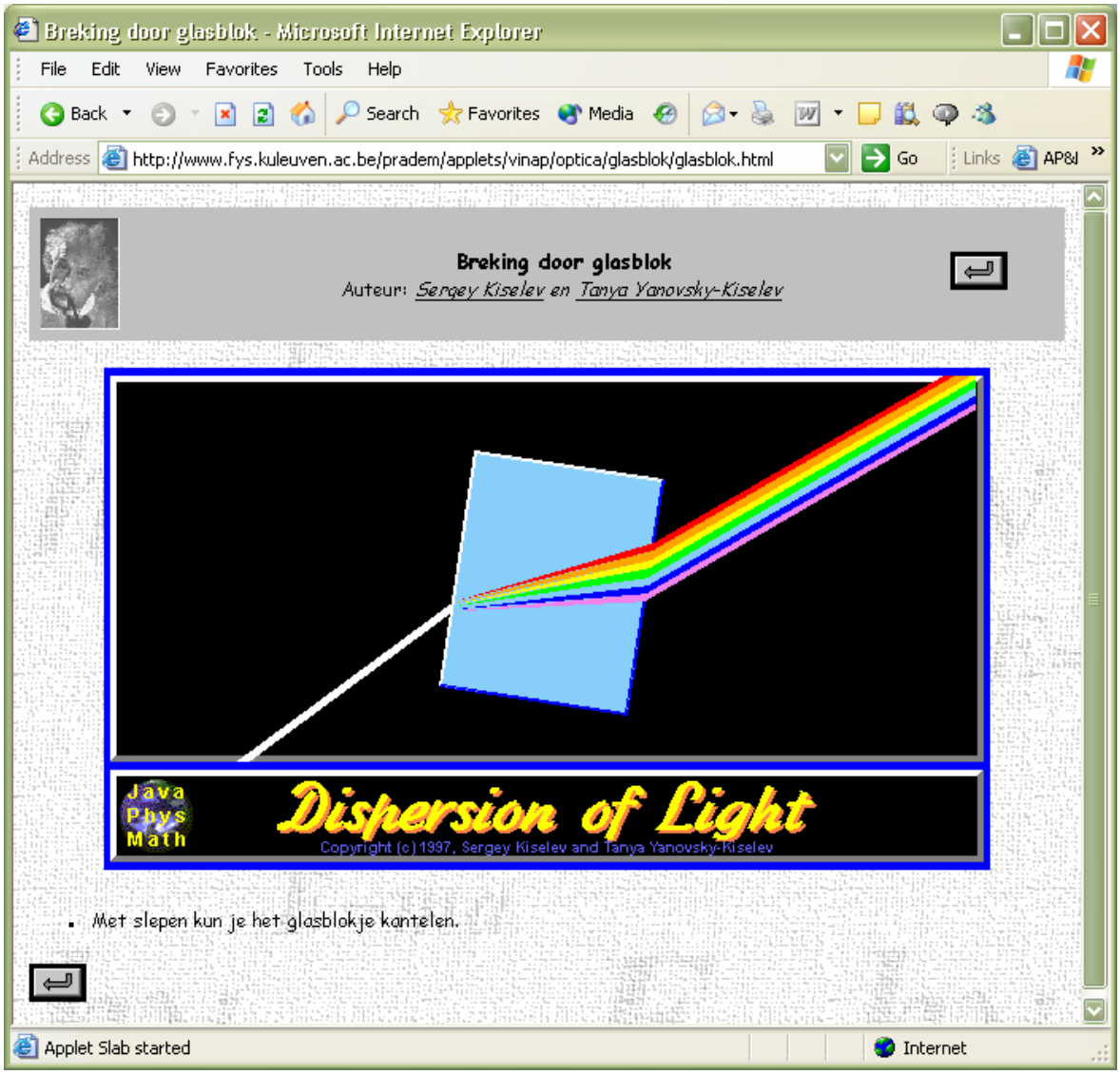
http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/prisma/prisma.html

Met een gewoon driehoekig prisma kun je een lichtstraal opsplitsen in haar kleurcomponenten. Mat deze JAVA applet kun je zien dat naargelang je de inkomende lichtbundel anders laat invallen op het prisma, je een smallere of bredere uitwaaiering krijgt van deze kleuren.

http://www.haycap.nl/app-c/prisma/prisma.htm

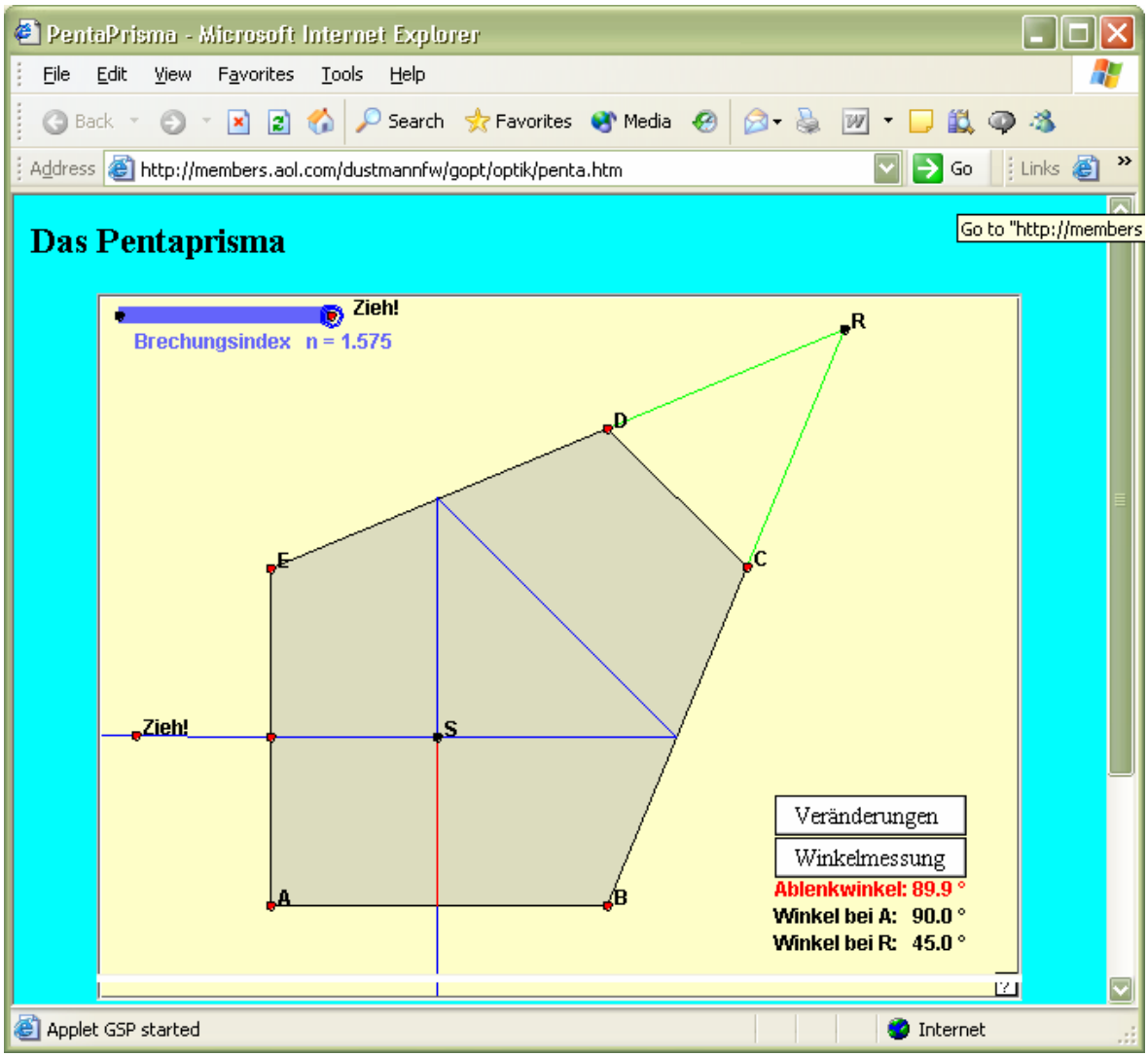
- ***Lichtbreking door een glasblok***

Zoals reeds gezegd zijn er diverse mogelijke vormen van glas te bedenken waardoor licht kan worden opgesplitst in haar componenten. Met een vierkantig stuk glas, een glasblok, kan men ook een spectrum bekomen.



http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/glasblok/glasblok.html

- ***Vijfhoekige prisma's (Pentaprisma's)***

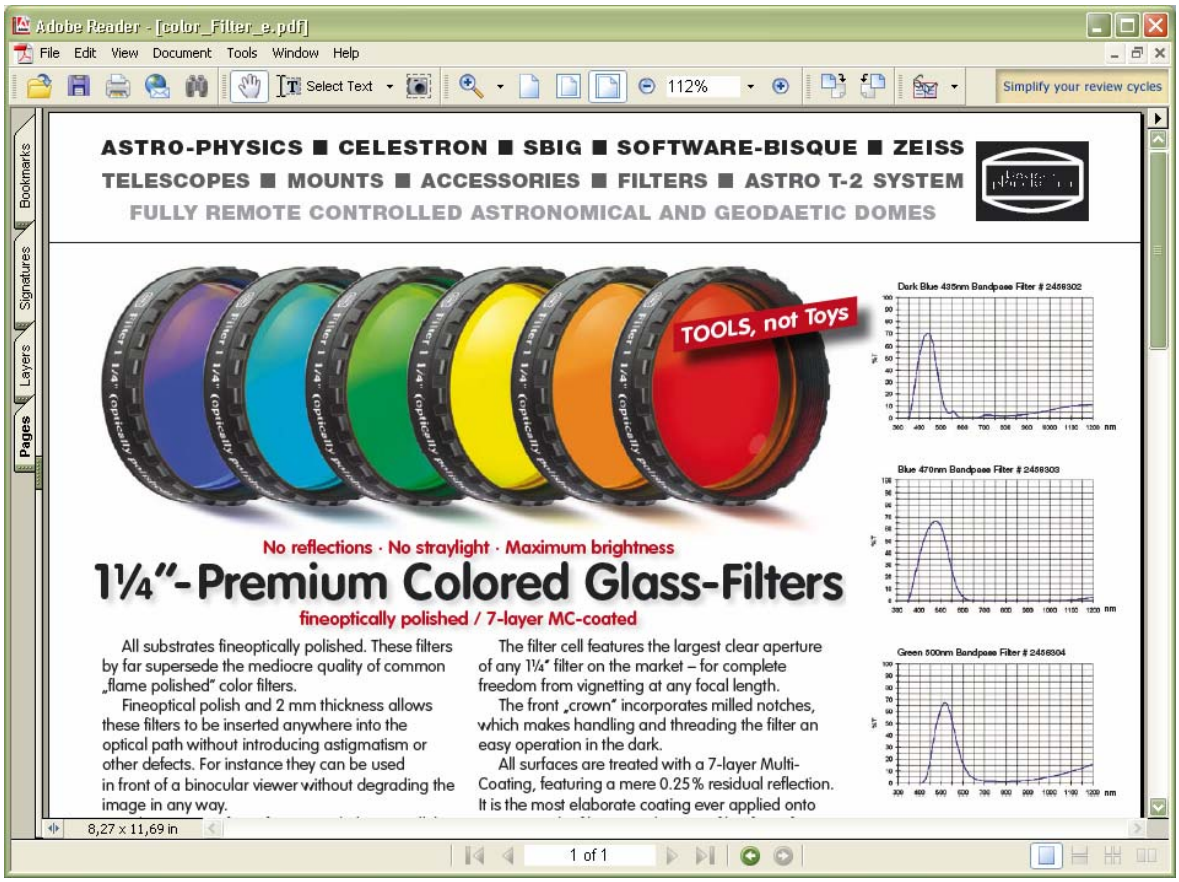


http://members.aol.com/dustmannfw/gopt/optik/penta.htm

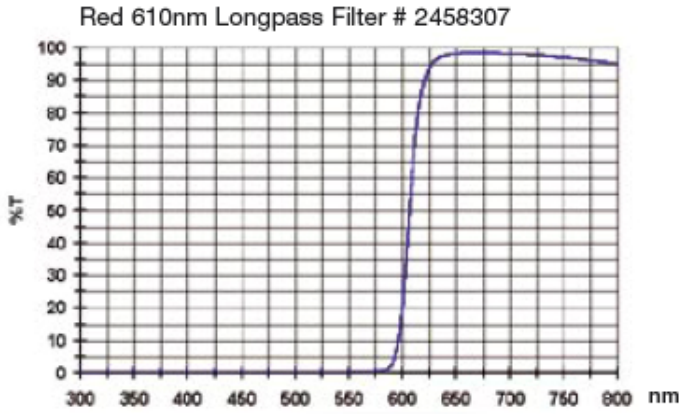
Selectie van bepaalde golflengtes (kleurfilters)

- ***Monochromatische kleurfilters***

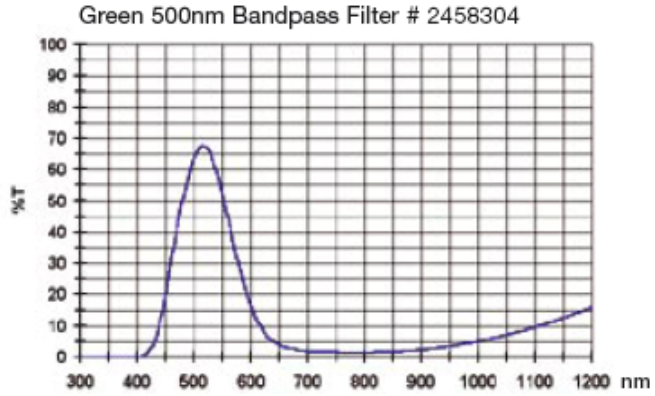
Licht dat slechts één bepaalde lichtsoort (kleur) bevat noemen we **monochromatisch licht**. Stukken glas waarvan de moleculen een of meerdere andere lichtsoorten opnemen om slechts één bepaalde kleur door te laten noemen we monochromatisch kleurfilters. Willen we bijvoorbeeld een geel beeld bekomen, dan moeten we een filter nemen die alle lichtsoorten, met uitzondering van het geel uiteraard, zoveel als mogelijk opneemt. We spreken soms ook van **dunbandige filters** omdat ze slechts een dunne band van het spectrum doorlaten.



Heel wat amateur-sterrenkundigen kopen bij de Duitse firma Baader Planetarium hun kleurenfilters. Er bestaat zelfs een speciale set van 6 kleurenfilters. Voor elk van deze filters is de doorlaatgrafiek beschikbaar (zie http://www.baader-planetarium.de/zubehoer/okularseitiges_zubeh/info_farbfilter/infoseite-farbfilter.htm).



*Voorbeeld van een **breed doorlaatfilter** (Engels: Longpass Filter): het roodfilter (filter # 245 83 07) van Baader laat alle lichtstralen door boven de golflengte van 600 nm. Alle lange golflengtes worden hier dus doorgelaten.*



*Het groene kleurenfilter van Baader (filter # 245 83 04) is een typisch **breed<u>bandig</u> doorlaatfilter** (Engels: Bandpass filter): enkel de band van golflengtes tussen pakweg 450 en 550 nm worden doorgelaten. Dit is dus een ander soort van filter dan het roodfilter van hierboven. Merk op dat dit filter slechts 2/3 van het inkomende groene licht doorlaat. Bij het roodfilter was dit quasi 100%.*

- ***Terminologie voor filters***

Blocking
The degree of light attenuation at wavelengths outside the passband of the filter.

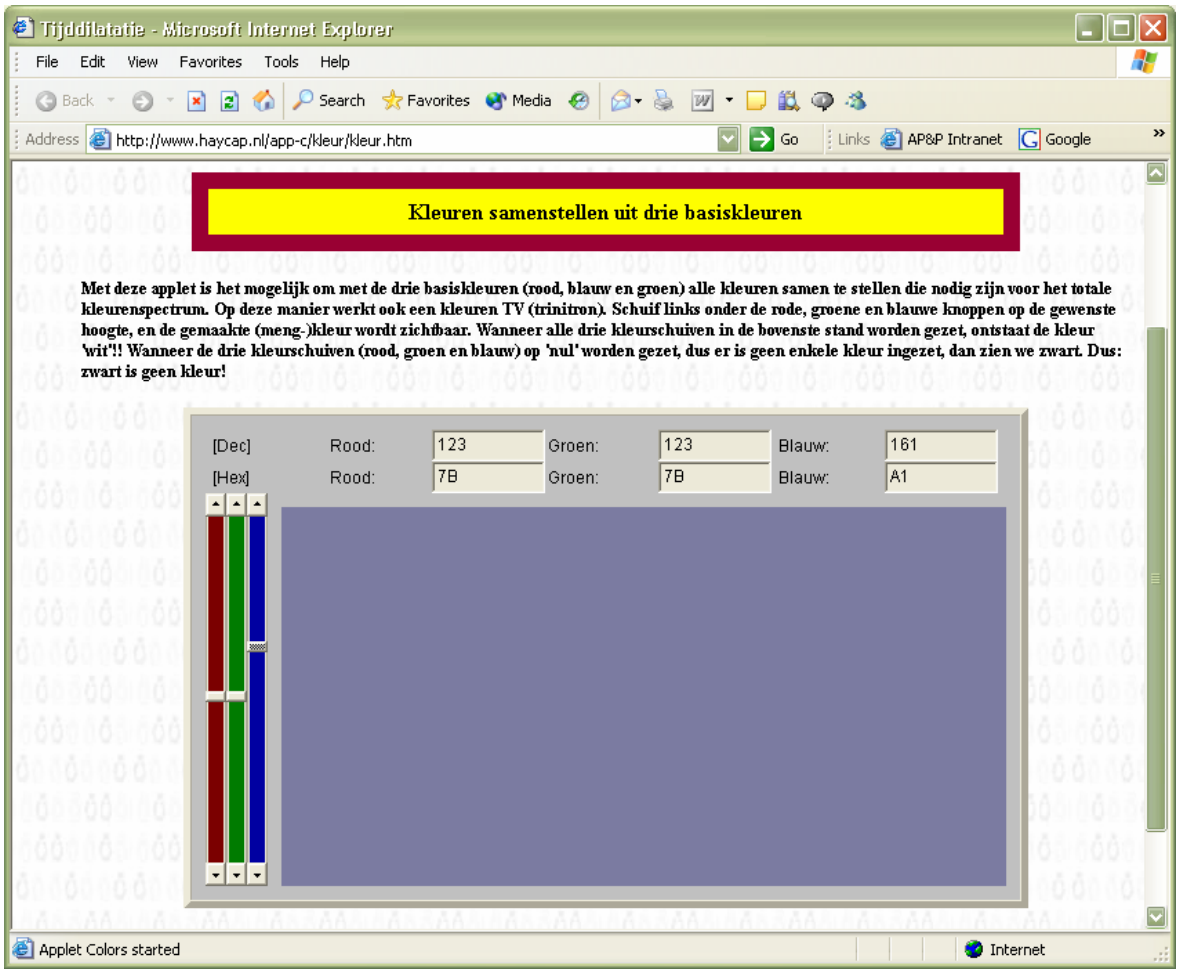
Center Wavelength (CWL)
The wavelength at the midpoint of the half power bandwidth (FWHM)

Full-width Half-Maximum (FWHM)
The width of the bandpass, in nanometers, at one-half of the maximum transmission. Filters can be designed with FWHM's of >100 nm.

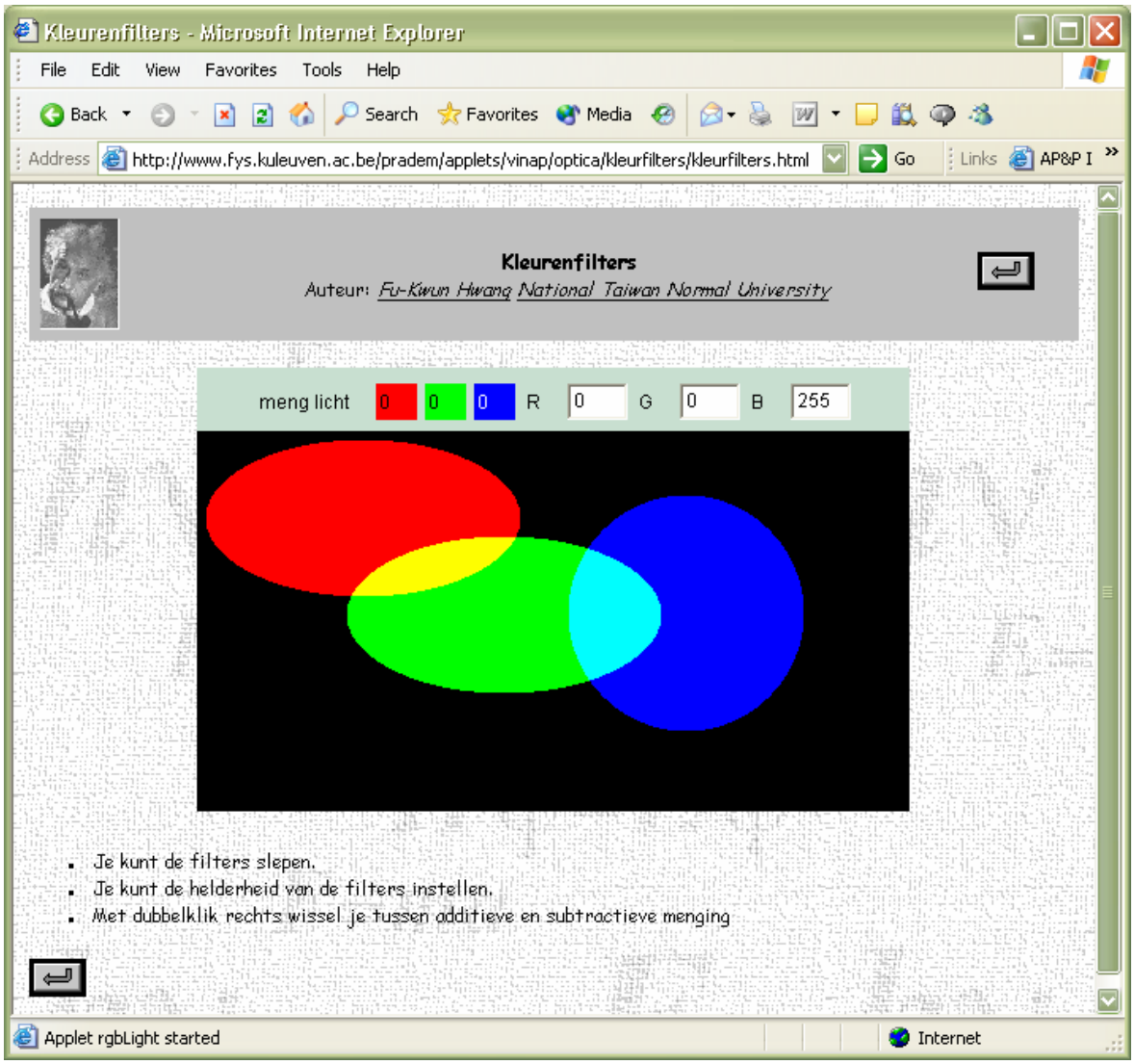
Peak Transmission
The maximum percentage transmission within the passband.

- ***Combineren van kleurenfilters***

Kleurenfilters kunnen ook worden gecombineerd om slechts licht in een bepaald golflengtegebied door te laten. Bekijk onderstaande JAVA applets even om te zien hoe je bepaalde kleurenfilters kan combineren en tot welk resultaat dit kan leiden.



http://www.haycap.nl/app-c/kleur/kleur.htm



http://www.haycap.nl/app-c/kleur/kleur.htm

- ***Een speciaal type roodfilters: H-alfa filters***

In principe zijn bovenstaande filters eigenlijk geen monochromatische filters: ze laten een relatief brede to zeer brede band van golflengtes door. Astronomen, zowel amateurs als professionelen, gebruiken echter ook een héél dunbandig roodfilter om de chromosfeer van de Zon te bestuderen. Dit speciale licht is het rode licht dat door waterstof wordt uitgestraald. Met dunbandig bedoelen we dan dat dit soort van filters een bandbreedte hebben dat kleiner is dan 1 Angström. Bij de allerbeste H-alfa filters is de bandbreedte slechts 0.4 of zelfs 0.2 Angström. Hoe smaller deze bandbreedte, hoe contrastrijker het beeld is dat wordt gevormd. Echter, hoe smalbandiger dit H-alfa filter is, hoe duurder. Voor een smalste H-alfa filters kan men gemakkelijk zo'n 5.000 € betalen.

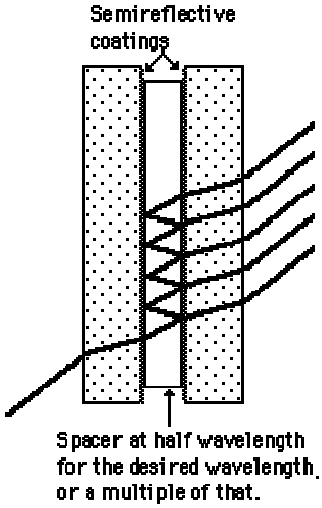
Op de Project- en Volkssterrenwachten AstroLAB *IRIS* beschikt men ook over dergelijke filters. Educatieve brochure nr. 1 "De Zon, Onze Dagster" bevat heel wat zonnefoto's die met dergelijke speciale filters werden genomen.

In de wereld zijn er twee zeer bekende fabrikanten van H-alfa filters: dit zijn de Amerikaanse firma's Daystar en Coronado. Hieronder vindt de lezer hun websites.

- http://www.coronadofilters.com
- http://www.daystarfilters.com

- ***Interferentiefilters***

Men kan zich de vraag stellen hoe men deze zeer dunbandige kleurenfilters kan fabriceren. Een van de mogelijkheden die men heeft is te werken met het principe van interferentie. Hierbij plaatst men twee halfdoorlatende stukjes materie op een bijzonder dunne afstand van elkaar. Deze afstand is in principe gelijk aan de halve golflengte (of een veelvoud) van het licht dat men probeert af te zonderen.



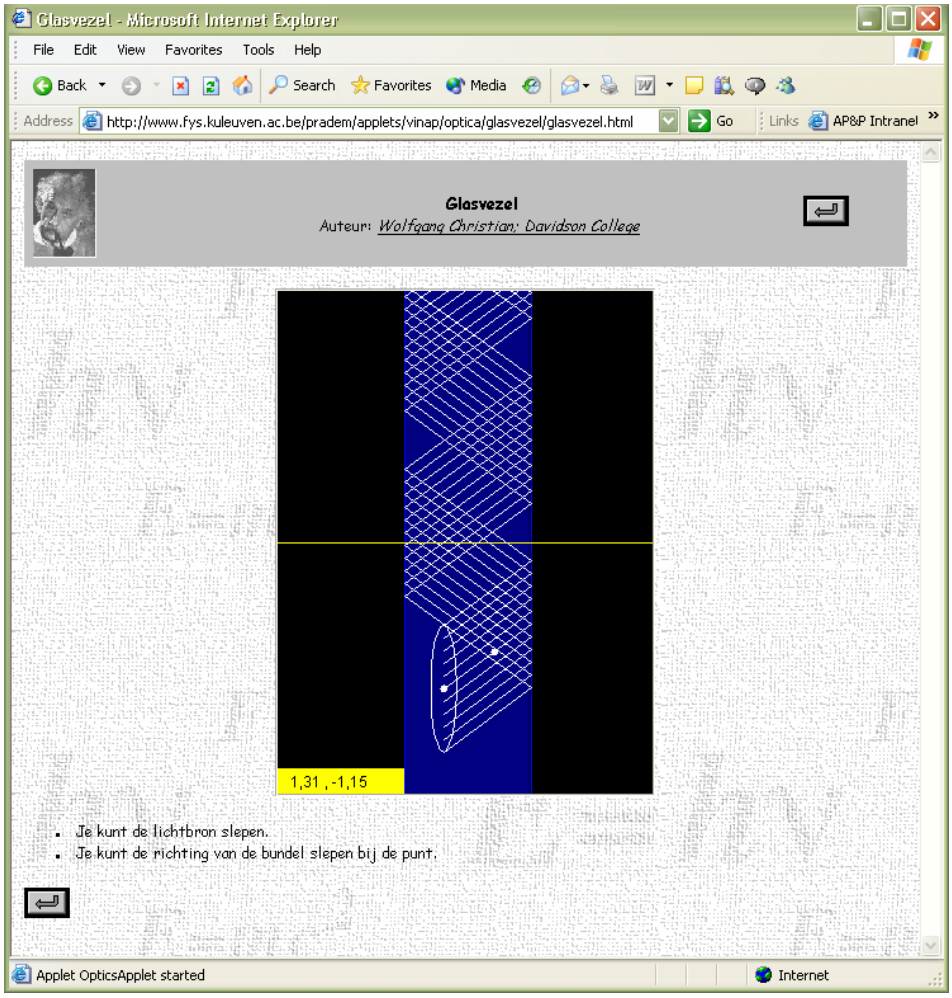
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html

Tussen de twee plaatjes treedt interferentie op en hetgeen dat uiteindelijk vrijkomt via het tweede plaatje zijn allemaal lichtstralen met golflengtes die zéér dicht bij elkaar liggen: dus een bijzonder dunne band uit het spectrum. Op http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html vindt de lezer wat meer uitleg over dit type van filter. Het is van belang in te zien dat het interferentiefilter pas goed werkt wanneer de lichtstralen loodrecht op het filter invallen. Wanneer het licht onder een bepaalde hoek invalt, dan kan men aantonen dat niet de verwachte golflengte wordt gefilterd uit dit licht, maar wel een lagere (er treedt dus een blauwverschuiving op). Op bovenstaande internet link vindt de lezer een berekeningswijze terug die dit aantoont.

Dit laatste heeft gevolgen voor de sterrenkunde. Neemt men de Zon waar, dat een relatief uitgestrekt object aan onze hemel is (de Zon is immers ongeveer een halve graad groot), dan zullen de stralen die van de rand van de Zon komen onder een bepaalde hoek, en dus niet loodrecht, het H-alfa filter bereiken. En zoals net besproken doet het H-alfa filter dan minder goed zijn werk. Vooral in telescopen met een korte brandpuntsafstand moet men oppassen omdat in zo'n geval de stralen sterk(er) worden afgebogen en aldus er voor kan zorgen dat men niet de juiste golflengtes te zien krijgt in beeld: in plaats van de H-alfa lijn bekomen we dan bijvoorbeeld een oranje beeld.

Het transporteren van licht (glasvezel)

Licht kan relatief eenvoudig worden getransporteerd door middel van glasvezel. Op vandaag maakt de digitale wereld veel gebruik van dit medium. Hierbij worden de electronische nulletjes en eentjes van de computers omgezet naar lichtpulsen. Deze lichtpulsen kunnen dan vervolgens via de glasvezel over zeer grote afstanden zonder kwaliteitsverlies worden getransporteerd. In computer- en communicatietoepassingen worden uiteindelijk deze getransporteerde lichtpulsen opnieuw omgezet in electronische nullen en eentjes.



http://www.fys.kuleuven.ac.be/pradem/applets/vinap/optica/glasvezel/glasvezel.html

Bij een glasvezel wordt een lichtbundel onder een welbepaalde hoek geinjecteerd in de kabel. Door interne reflectie kan het licht dan aan de gebruikelijke snelheid van 300.000 km/s worden getransporteerd. Met deze JAVA applet kan de lezer wat experimenteren met de hoek waaronder men de lichtbundel moeten plaatsen en zien wat er vervolgens gebeurt. De hoek moet een zekere minimale waarde hebben wil men tot interne reflectie komen.

2. Teleskooptypes

http://www.seds.org/~spider/spider/Misc/scopetypes.html

2.1. Terminologie

Optische systemen die enkel en alleen bestaan uit lenzen noemt men **dioptrische systemen**. Maakt men enkel en alleen gebruik van spiegels, dan spreekt men van een **catoptrisch systeem**. In sommige telescopen maakt men zowel van lenzen als van spiegels gebruik. Zo'n systeem noemen we een **catadioptrisch systeem**.

2.2. Basisfuncties van een telescoop

Een sterrenkijker of telescoop heeft 3 basisfuncties :

1) een telescoop dient om zoveel mogelijk licht te verzamelen;
Het aantal fotonen die van een hemelobject wordt verzameld door een telescoop is rechtstreeks afhankelijk van de oppervlakte van diens objectief of hoofdspiegel:

2) een telescoop dient om een beeld uit te vergroten;

$$m = F_{objectief} / F_{oculair}$$

De vergroting van een telescoop berekent men door diens brandpuntsafstand te delen door de brandpuntsafstand van het oculair.

3) een telescoop dient om meer detail te zien (scheidend vermogen).
Een telescoop met een objectief van diameter D heeft een scheidend vermogen θ van:

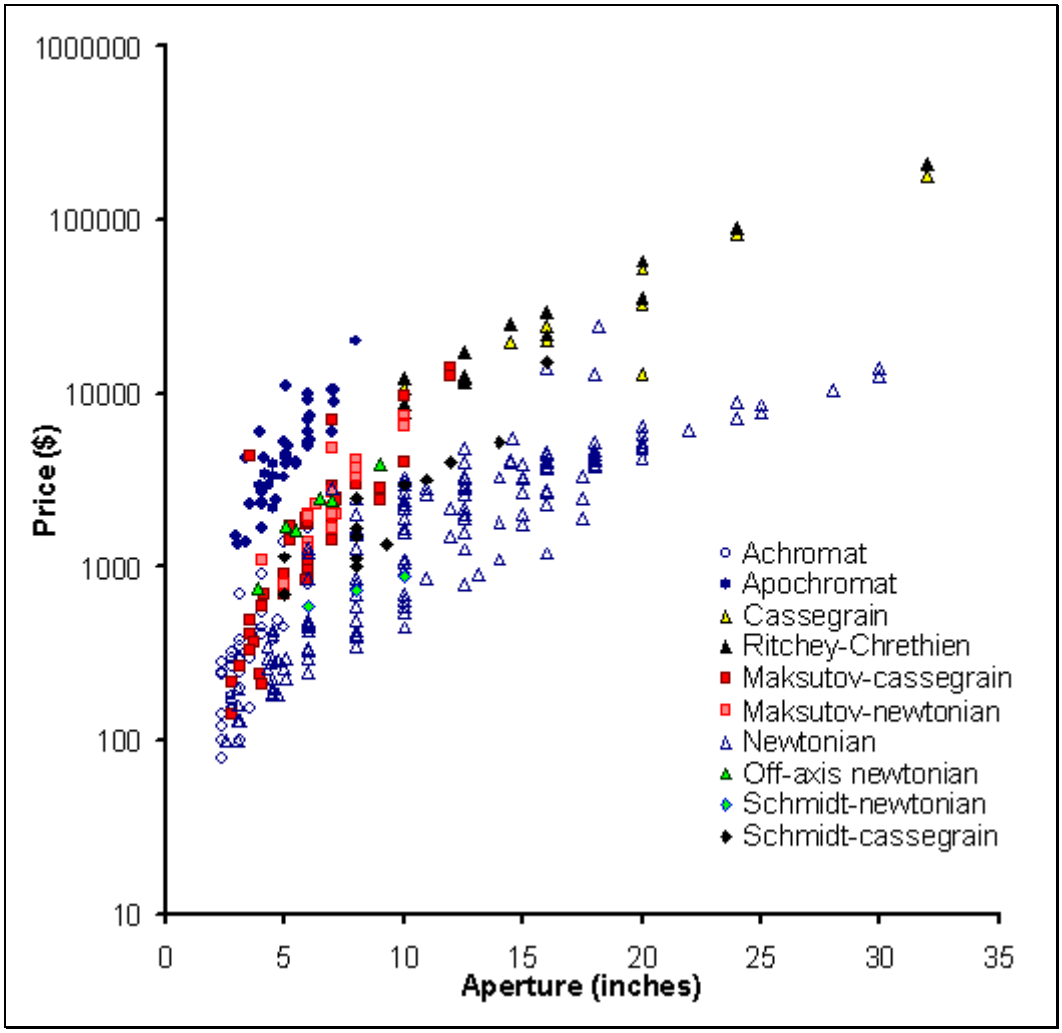
$$\theta = 1.22 \lambda / D$$

Merk op dat het scheidend vermogen afhankelijk is van de golflengte. Hoe groter de golflengte, hoe kleiner het scheidend vermogen. Of nog anders gezegd: een telescoop ziet altijd het scherpst in het blauw, en het minst scherp in het rood.

2.3. Kostprijs van een telescoop

Onderstaand schema toont heel duidelijk aan dat de kostprijs van een telescoop zeer afhankelijk is van:

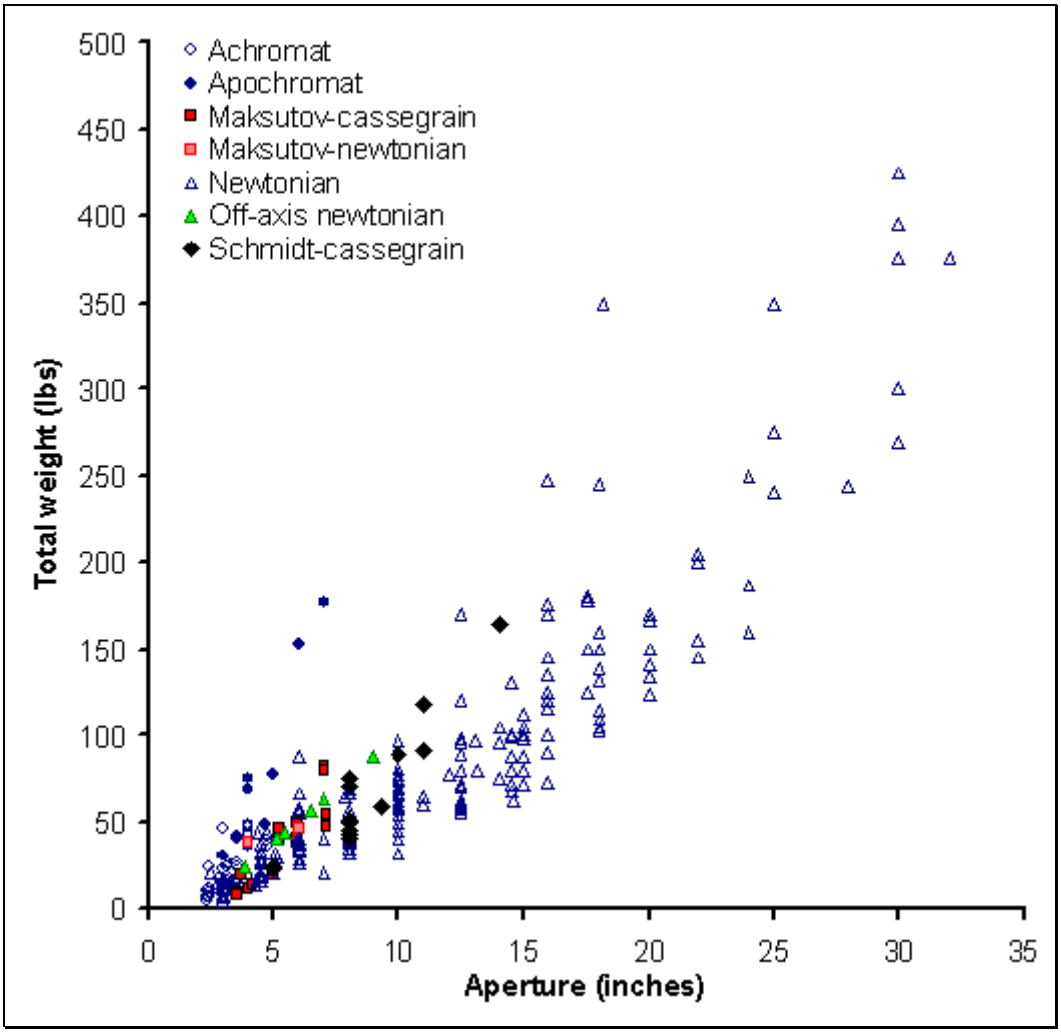
1) de doormeter van de kijker
2) het type kijker.



http://home.no.net/jonbent/telescope.html

2.4. Gewicht van een telescoop

Het gewicht van een telescoop neemt exponentieel toe met de doormeter er van. Onderstaande grafiek geeft dit verband treffend weer.

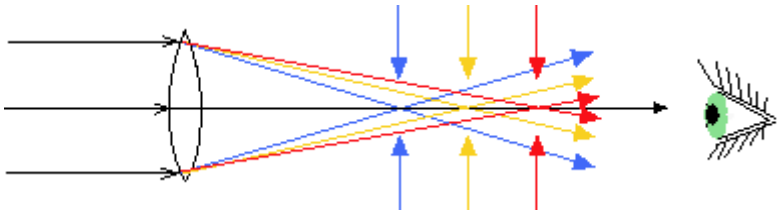


http://home.no.net/jonbent/telescope.html

2.5. Refractor

- ***Chromaat***

Chromaten zijn enkelvoudige lenzenkijkers. In principe worden deze niet meer verkocht aangezien ze last hebben van ernstige kleurenfouten.



Het voornaamste nadeel van een gewone refractor: chromatische aberratie. We zien dat de verschillende kleuren samenkomen in een ander brandpunt. Of nog: we zien het beeld slechts scherp in één bepaalde kleur met een keer.

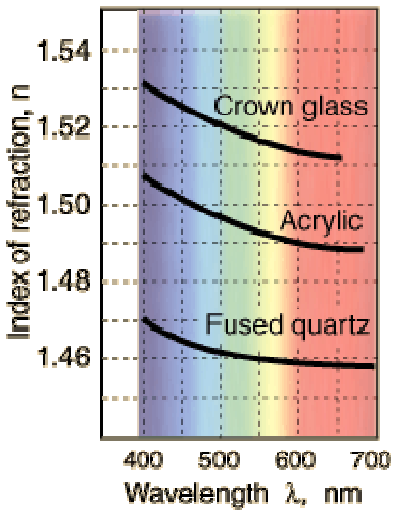
De reden van deze kleurfout is simpelweg omdat de refractie-index van glas afhankelijk is van de golflengte van het licht. De dispersie van iedere glassoort, uitgedrukt als **het getal van Abbe**, wordt bepaald aan de hand van onderstaande formule:

$$\nu = \frac{(n_D - 1)}{(n_F - n_C)}$$

(n_D: sodium yellow; n_F: hydrogen blue; n_C: hydrogen red)

Glasses where $\nu \geq 55$ (low dispersion) are called crowns
where $\nu < 50$ (high dispersion) are called flints.

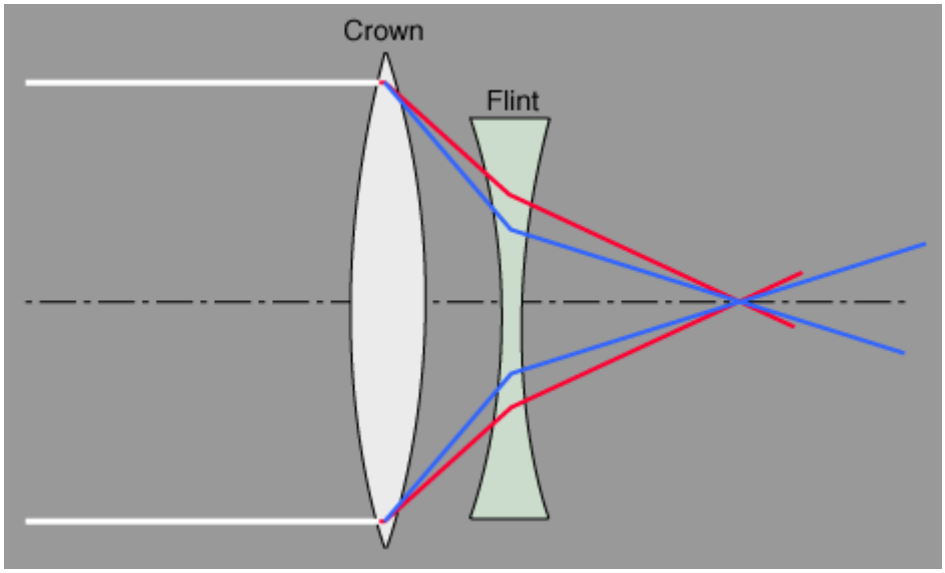
De mate van dispersie van iedere glassoort wordt bepaald aan de hand van de refractie-indexen van waterstof blauw (486,1 nm), waterstof rood(656,3 nm) en natrium geel(589,3 nm) licht. Hoe groter het Abbe getal, hoe kleiner de dispersie. Besluit: in een telescoop gebruik je best crown-glas en geen flint-glas.
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/dispersion.html



Deze grafiek toont aan dat bij iedere materiaalsoort de refractie-index afhankelijk is van de golflengte van het licht dat men er doorheen stuurt.
http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/dispersion.html

- ***Achromaat***

Een achromaat is een lenzenkijker die over een objectief beschikt dat bestaat uit 2 lenzen (een zogheten **doublet**). Beide lenzen zijn uit glas opgebouwd die een verschillende refractie-index n hebben ($n_{lens\ 1} \neq n_{lens\ 2}$). Meestal worden beide lenzen aan elkaar gecementeerd en is de combinatie die men neemt als volgt: een sterke positieve lens uit crown-glas (met een lage dispersie – zeg maar kleurenschifting) gevolgd door een zwakke negatieve lens uit flint-glas (met hogere dispersie). Dé kunst voor telescoopontwerpers is dus de juiste glassoorten te kiezen zodanig dat de tweede lens de fouten van de eerste zoveel als mogelijk opheft. Met zo'n doublet kunnen de ergste kleurenfouten van een chromaat weggewerkt: meestal kan dit ontwerp van telescoop enkel er voor zorgen dat er geen kleurfouten meer zijn voor het rood en het blauw bijvoorbeeld. Groen scoort dan bijvoorbeeld minder goed.



http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/geoopt/aber2.html#c1



Refractor type

http://www.geocities.com/angolano/Astronomy/Telescopes.html

- ***Apochromaat***

Met een doublet refractor is het dus eigenlijk onmogelijk àlle kleurfouten weg te werken. Indien men quasi alle kleurfouten uit een refractor wil weghalen, dan dient men te kiezen voor een zogeheten **apochromaat**. Deze systemen bestaan uit minstens een drietal (soms viertal) lenzen. Een systeem met drie lenzen noemt en een **triplet**. Men kiest opnieuw zodanig de glassoorten dat voor de golflengtes van rood, groen en blauw men dezelfde brandpuntsafstand bekomt. Eén van de lenzen bestaat (meestal) uit **fluoriet**. Men kent zowel **lucht-gescheiden** als **olie-gescheiden** aprochromaten. In AstroLAB *IRIS* II bijvoorbeeld staat een 20 cm olie-gescheiden triplet aprochromaat (een Lichtenknecker VAF 200/2400).



TMB heeft wereldwijde erkenning gekregen als leverancier van high-quality apochromaten.
(© 2004 by Philippe Vercoutter, Belgium)

Foto's genomen met de 20 cm apochromaat van AstroLAB IRIS
http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=VAF

Foto's genomen met de TMB apochromaten
http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=TMB

Foto's genomen met gewone refractoren
http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=refractor&search_level=1

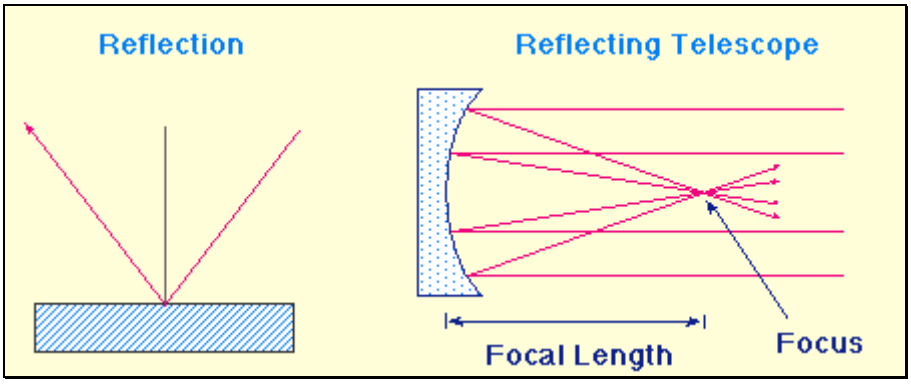
Website over TMB apochromaten
http://www.teleskop-service.de/TMB/tmb.htm

- "*A Survey of Refractive Systems for Astronomical Telescopes*"
by Roger Ceragioli http://alice.as.arizona.edu/~rogerc/

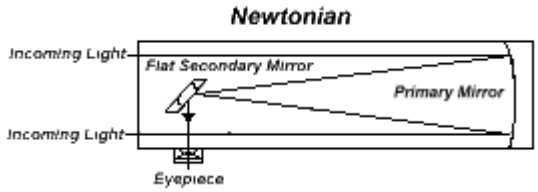
- Website van de grootste refractor ter wereld
http://astro.uchicago.edu/vtour/40inch/

2.6. Newton

Een Newton telescoop gebruikt het principe van de reflectie van lichtstralen. Op een vlakke spiegel wordt de inkomende lichtstraal onder een analoge maar tegengestelde hoek teruggestraald. In een Newton telescoop gebruikt men een gebogen spiegeloppervlak. Het spiegeloppervlak is in dit geval een paraboloïde. Dit heeft als gevolg dat alle lichtstralen samenkomen in één punt: het **brandpunt** (ook nog de **focus** genoemd).



Een van de problemen die men heeft bij het werken met spiegels is dat het beeld wordt gevormd vóór het spiegeloppervlak. Dit betekent dat men ergens een manier zal moeten vinden om dit beeld *naar buiten te brengen*, dit wil zeggen buiten de stralengang van het invallende licht van het hemelobject dat men aan het waarnemen is. In het geval van een gewone telescoop plaatst men een klein beetje voor het focus een vangspiegel. Deze vangspiegel kaatst het gevormde beeld onder een hoek van 90° naar buiten.



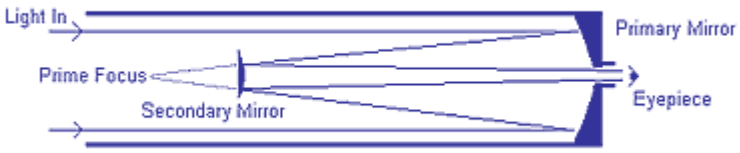
Principe van een Newton telescoop: het licht valt op een parabolische spiegel waar het wordt teruggekaatst op een vangspiegel. Deze vangspiegel kaatst het gevormde beeld naar buiten in het oculair.



http://www.geocities.com/angolano/Astronomy/Telescopes.html

ASTRID: Foto's genomen met een newton
(http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=newton)

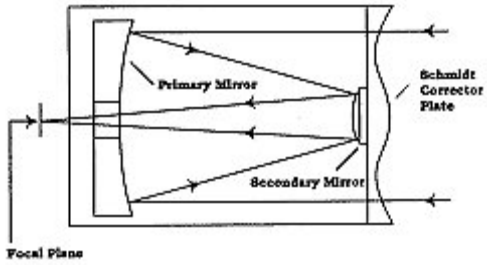
2.7. De klassieke Cassegrain



http://www.nmm.ac.uk/uploads/gif/cassegrain.gif

2.8. Schmidt-Cassegrain

Bij een Schmidt-Cassegrain probeert men het beeld naar buiten te brengen door een gat in de **sferische hoofdspiegel**. Hiervoor brengt men een secundaire vangspiegel aan op de grote correctorplaat die zich vooraan de telescooptubus bevindt. We spreken hier over een **catadioptrisch systeem**: dit is een systeem dat gebruik maakt van een combinatie van spiegelende oppervlakken en lenzen.



Principeschema van een Schmidt-Cassegrain.
http://www.celestron.com/tb-2ref.htm



http://www.geocities.com/angolano/Astronomy/Telescopes.html

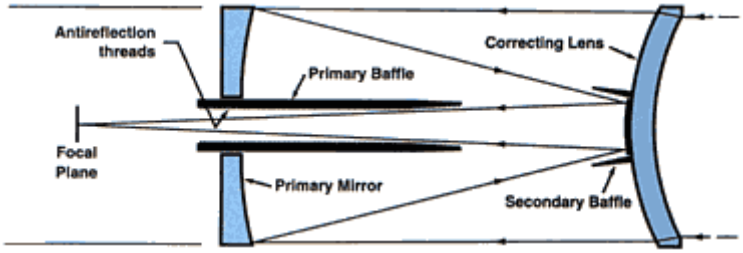
ASTRID: Foto’s genomen met een C8
(http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=C8)

ASTRID: Foto’s genomen met een C11
(http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=C11)

ASTRID: Foto’s genomen met een C14
(http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=C14)

2.9. Maksutov-Cassegrain

De Maksutov-Cassegrain is in grote lijnen gelijk aan een Schmidt-Cassegrain. Hier wordt echter gebruik gemaakt van een grote **meniscus** lens: een dikke lens dat sterk gebogen is. De secundaire spiegel bestaat uit een stukje van de achterzijde van de meniscus-lens dat veraluminiseerd is. Doordat de secundaire vangspiegel een ietsjes kleiner is dan het geval is bij een Schmidt-Cassegrain, levert dit type van telescoop een ietsjes hoger contrast en scherpte (resolutie).



Principeschema van een Maksutov Cassegrain
http://www.teleskop-service.de/Intes/intespreisliste.htm



http://www.geocities.com/angolano/Astronomy/Telescopes.html



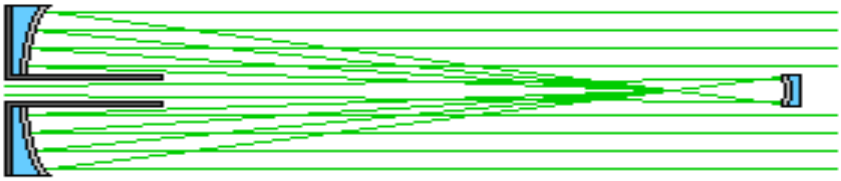
De INTES MK66 is een voorbeeld van commercieel beschikbare Maksutov-Cassegrain.
http://www.teleskop-service.de/Intes/intespreisliste.htm

ASTRID: Foto's genomen met een maksutov
(http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=maksutov)

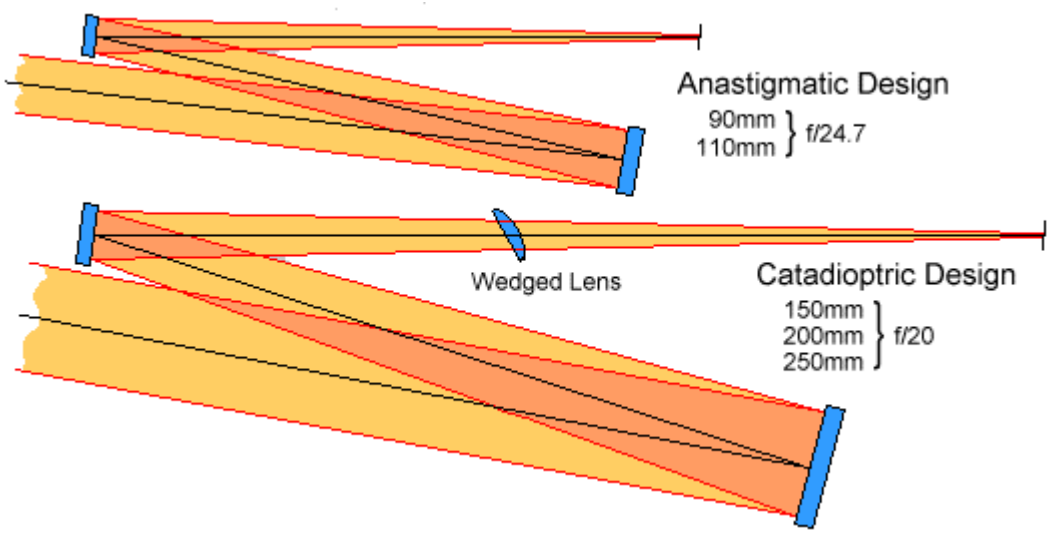
2.10. Ritchey-Chrétien

Moet nog uitgewerkt worden.

2.11. Gregory



2.12. Kutter Schiefspiegler



http://www.aokswiss.ch/e/tel/kutter.html

De voordelen van een Kutter systeem zijn als volgt :

1) Geen enkele kleurfout. Er kan moeilijk sprake zijn van chromatische aberraties aangezien we niet werken met lenzen.
2) Er is geen enkele centrale obstructie. Er is immers geen enkele vangspiegel die wordt gebruikt. Het contrast is dus ideaal.
3) Een schiefspiegler is relatief gemakkelijk te bouwen. Er worden 2 sferische spiegels gebruikt met dezelfde kromtestraal.
4) In vergelijking met een refractor met eenzelfde objectiefdoormeter is een schiefspiegler goedkoper.

ASTRID: Foto's genomen met een kutter
(http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=Kutter)

2.13. Fotografische lenzen

Fotografische lenzen kunnen ook als kleine telescoopjes worden gezien en er kunnen, mits een aantal randvoorwaarden goed in het oog te houden, ook mooie astrofotografische opname's mee gemaakt worden.

Over de resolutie van fotografische lenzen

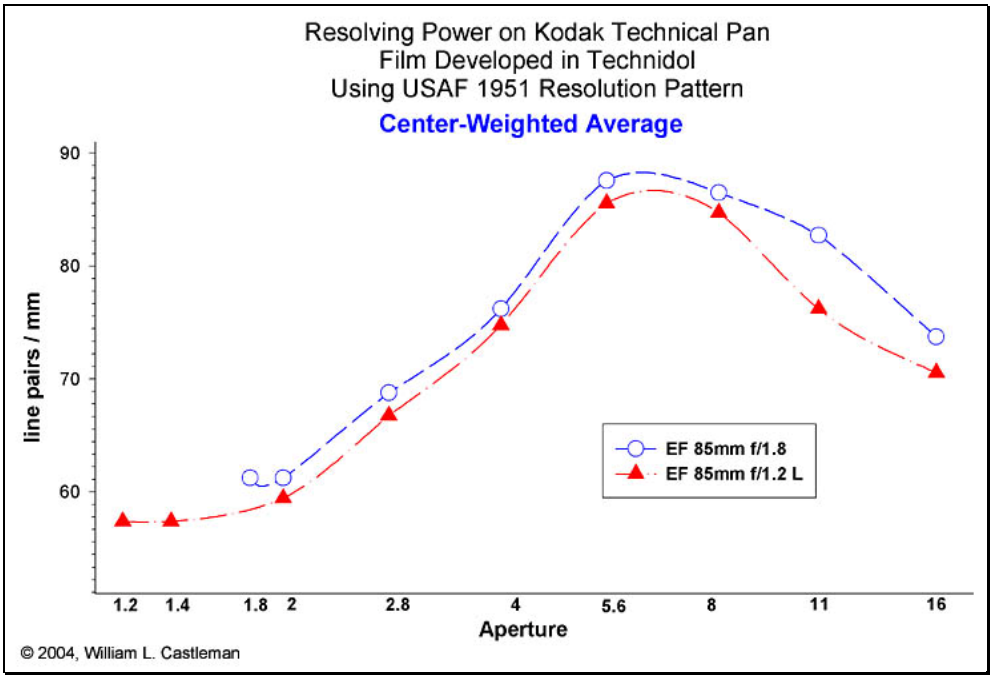
Je kunt hier best rekening houden met de volgende twee vuistregels:

1) In het algemeen presteren zoomlenzen minder dan fotografische lenzen met een vaste brandpuntsafstand.

2) In het algemeen verhoogt de resolutie met het meer diafragmeren van de lens.

Wanneer je een lens koopt van bij f/1.2, dan is het best mogelijk dat je die moet afdiafragmeren tot op bijvoorbeeld f/4 of f/5.6 wil je de maximale scherpte (meestal uitgedrukt in aantal lijnenparen per mm) halen. Dit afdiafragmeren zal er ook voor zorgen dat bepaalde lensfouten ook minder (of helemaal niet meer) tot uiting komen: coma-vorming in de hoeken van de opname is hiervan een typisch voorbeeld.

Bekijk onderstaand voorbeeld van de CANON EOS EF 85mm lenzen. Naargelang we voor f/1.2 of f/5.6 kiezen zien we dat de resolutie varieert van iets onder de 60 lijnenparen per mm tot zo'n 90 lijnenparen per mm. Of nog anders gesteld: bij f/5.6 zie je tot de helft scherper.



http://www.wlcastleman.com/equip/reviews/85mm/graphs/85cenweight.jpg

Merk op dat de resolutie ook niet zomaar blijft toenemen naarmate je voor kleinere diafragma's kiest. In het bovenstaande voorbeeld zie je duidelijk dat meer afdiafragmeren dan f/5.6 geen enkele zin meer heeft!

Toepassing in de sterrenkunde

Voor astrofotografische doeleinden zul je omzeggens steeds moeten ver genoeg afdiafragmeren om een voldoende zuiver en scherp beeld te bekomen. Langs de andere kant mag je ook weer niet tè fel afdiafragmeren omdat de belichtingstijden anders tè hoog worden wil je toch nog iets op je detector registeren. Het is dus een compromis.

Indien je lenzen gebruikt om astrofoto's te maken, probeer een resolutiegrafiek er voor te vinden. Op die manier leer je je materiaal kennen en weet je gewoon bij welk diafragma je best fotografeert. Beschik je niet over zo'n grafiek, maak dan zelf enkele testopname's van een sterrenveld bij verschillend diafragma-waarden en vergelijk de foto's kwalitatief (of kwantitatief – maar das beduidend moeilijker).

3. Beelddetectoren

3.1. Het menselijk oog

De bouw van het menselijk oog

Het menselijk oog bevat een **positieve lens**: dit wil zeggen een lens dat het inkomende licht concentreert. Het speciale van deze lens is dat ze zich kan instellen. Het kan zich aanpassen (de **accomodatie** van het oog noemen we dit ook nog): spiertjes rond ons oog kunnen de vorm van de lens bijstellen. Bij jonge mensen is de inhoud van de lens helder en zeer elastisch. Vanaf zo'n 45 jaar begint deze elasticiteit terug te vallen en dit is de reden waarom mensen vanaf die leeftijd zowat een bril beginnen te dragen. Het fenomeen waarbij de lens niet meer helder is noemen we **cataract**. Als de cataract zeer slecht is wordt de lens vervangen door een arificiële lens. Deze lens kan zich dan niet automatisch aanpassen. Bij het verouderen, laten we zeggen vanaf zo'n 50 jaar, zal de lens wat geler worden en zal de gevoeligheid voor kortere golflengtes (zeg maar de blauwachtige kleuren) afnemen.

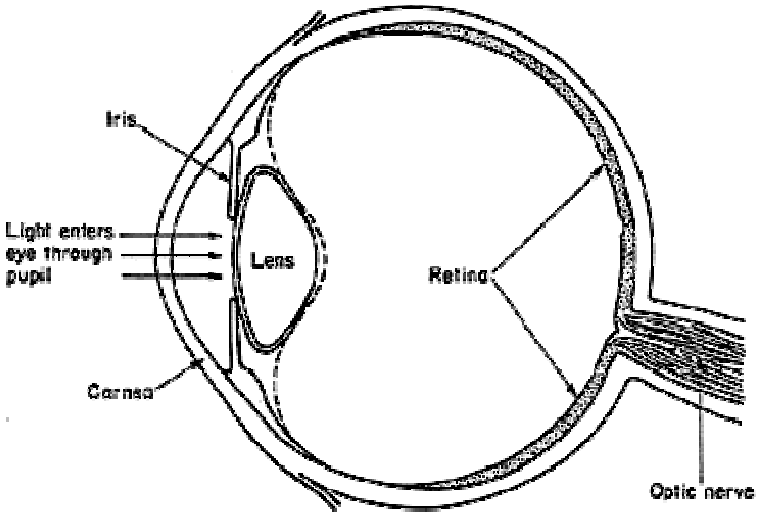
De stof die onze gehele oogbol vult wordt **vitreus** genoemd. Het geconcentreerde licht valt het op **netvlies** (**retina**) achteraan in het oog. Voor de lens zit nog een diafragma dat **iris** wordt genoemd. Deze iris sluit zich wanneer de intensiteit van het inkomende licht te groot is.



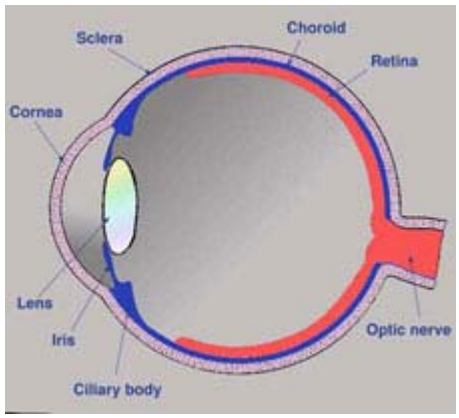
In lichtzwakke omstandigheden gaat het iris sterk open: de pupil is groot . (© 2004, Philippe Vercoutter)



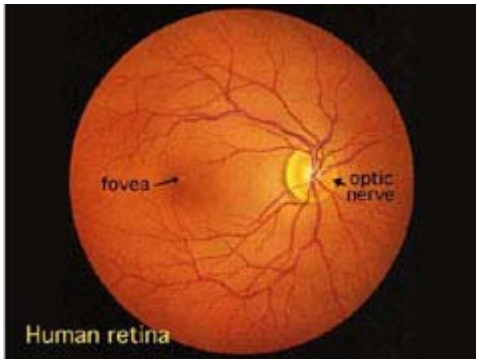
Bij heldere lichtomstandigheden sluit het iris zich; de pupil is klein. (© 2004, Philippe Vercoutter)



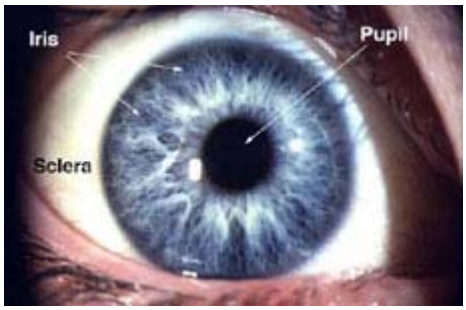
http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/color/color.shtml



http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm

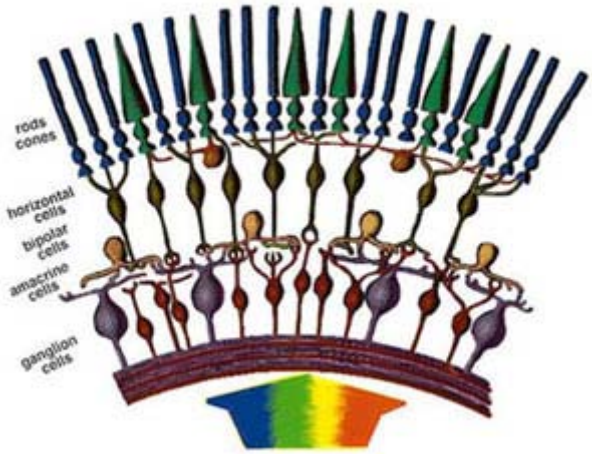


http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm

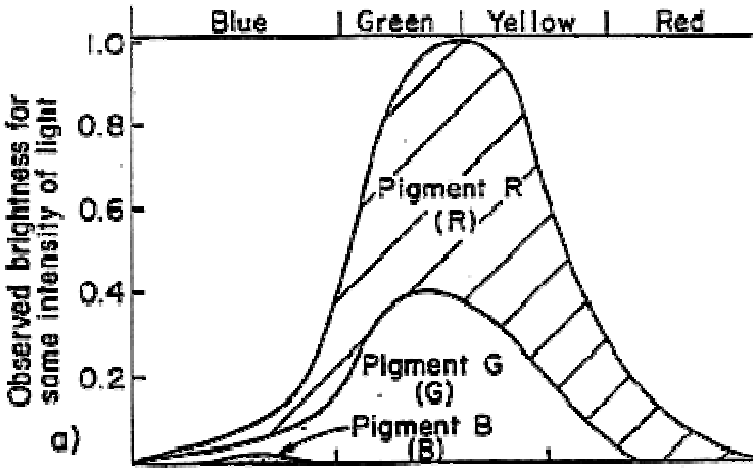


http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm

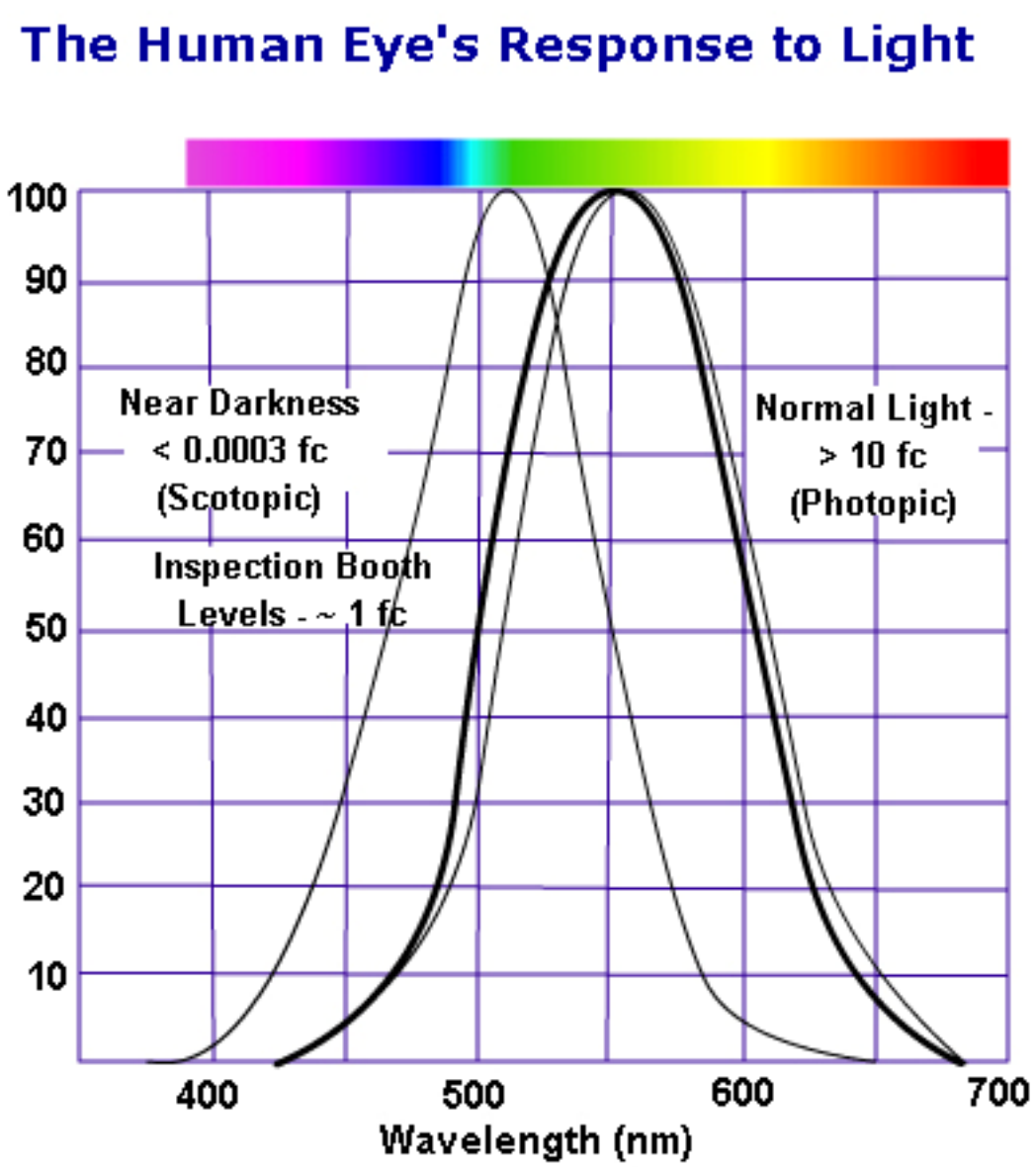
Het netvlies bevat lichtgevoelige elementen (**staafjes** en **kegeltjes**, Engels: **rods** en **cones**). De staafjes, zo'n 75 à 150 miljoen in aantal, registreren lichtvariaties maar niet de kleur. In zeer lichtarme situaties, wanneer enkel de staafjes actief zijn, zien we dus geen kleuren. Het zijn de kegeltjes (zo'n 6 à 7 miljoen in aantal) die de kleuren registreren. Er bestaan drie soorten van kegeltjes en elk registreren ze een welbepaalde kleurenrange. Deze drie kleurengebieden zijn ook lichtjes overlappend.



http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm

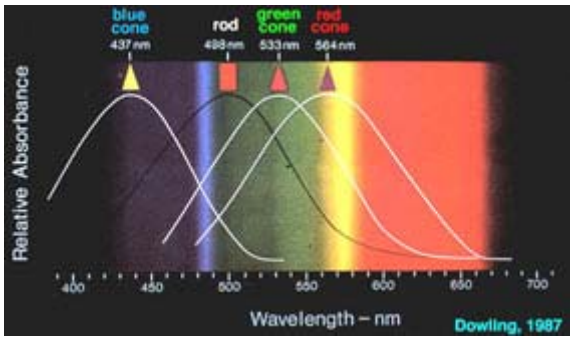


http://acept.la.asu.edu/PiN/rdg/color/color.shtml

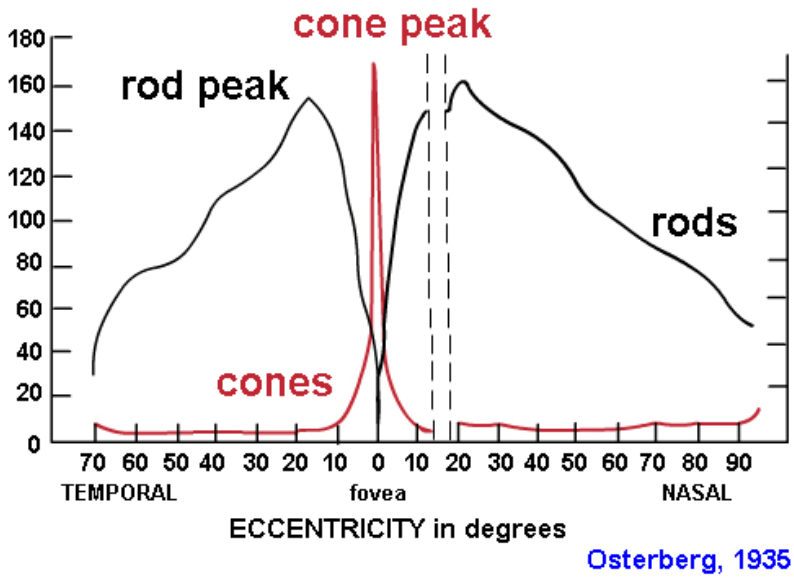


Indien er weinig licht aanwezig is, dan zijn vooral de staafjes actief en wordt het blauw, het violet en het UV beter waargenomen. Of, nog anders gezegd: naarmate het donkerder wordt treedt er een blauwverschuiving op. In normale lichtomstandigheden zijn het vooral de kegeltjes die actief zijn en is het oog het gevoeligst op 555 nm (groen-geel licht dus).

http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/lightresponse.htm

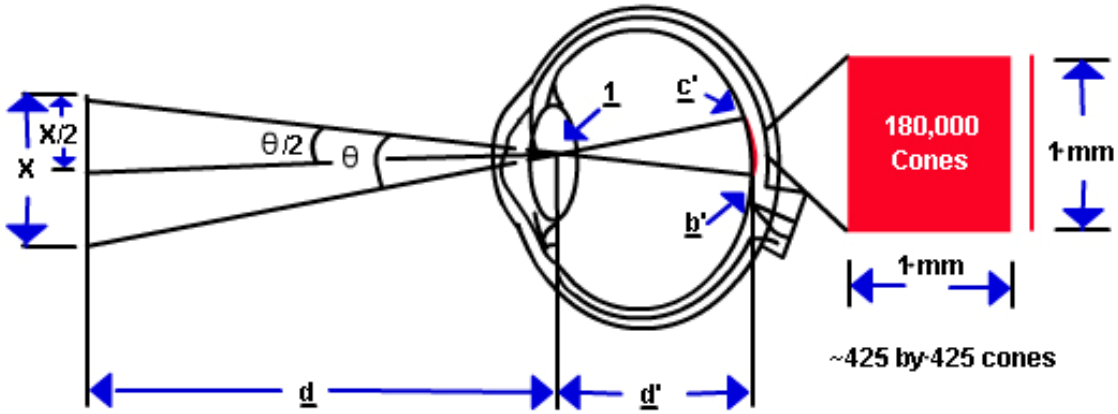


http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm



Verdeling van de staafjes en kegeltjes. In het fovea-gebied komen er maar liefst 180.000 kegeltjes voor per vierkante mm. Deze concentratie daalt heel snel naar slechts 5.000 kegeltjes per vierkante mm. Merk ook de zogheten "blinde vlek" op: in dit gebied komen géén kegeltjes of staafjes voor aangezien op die plaats de oogzenuw zit.

http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm



Wanneer iemand een zicht heeft van 20/20, dan kan die persoon zaken onderscheiden die slechts 1 boogminuut groot is. Eén graad aan de hemel wordt geprojecteerd op een gebied van 288 µm op het netvlies. In die 288 µm komen 120 kleurgevoelige kegeltjes voor. Indien er per graad aan de hemel meer dan 120 zwart/witte patronen voorkomen dan kan het menselijk oog dit niet meer onderscheiden: we zien grijs in plaats van de patronen. Deze 120 zwart/wit omschakelingen komen overeen met 1/60-e deel van een booggraad, vandaar dus de resolutie van 1 boogminuut (= 1/60-e van een graad).
http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/visualacuity.htm

De beperkingen van het menselijk oog

Het menselijk oog kent de volgende beperkingen:

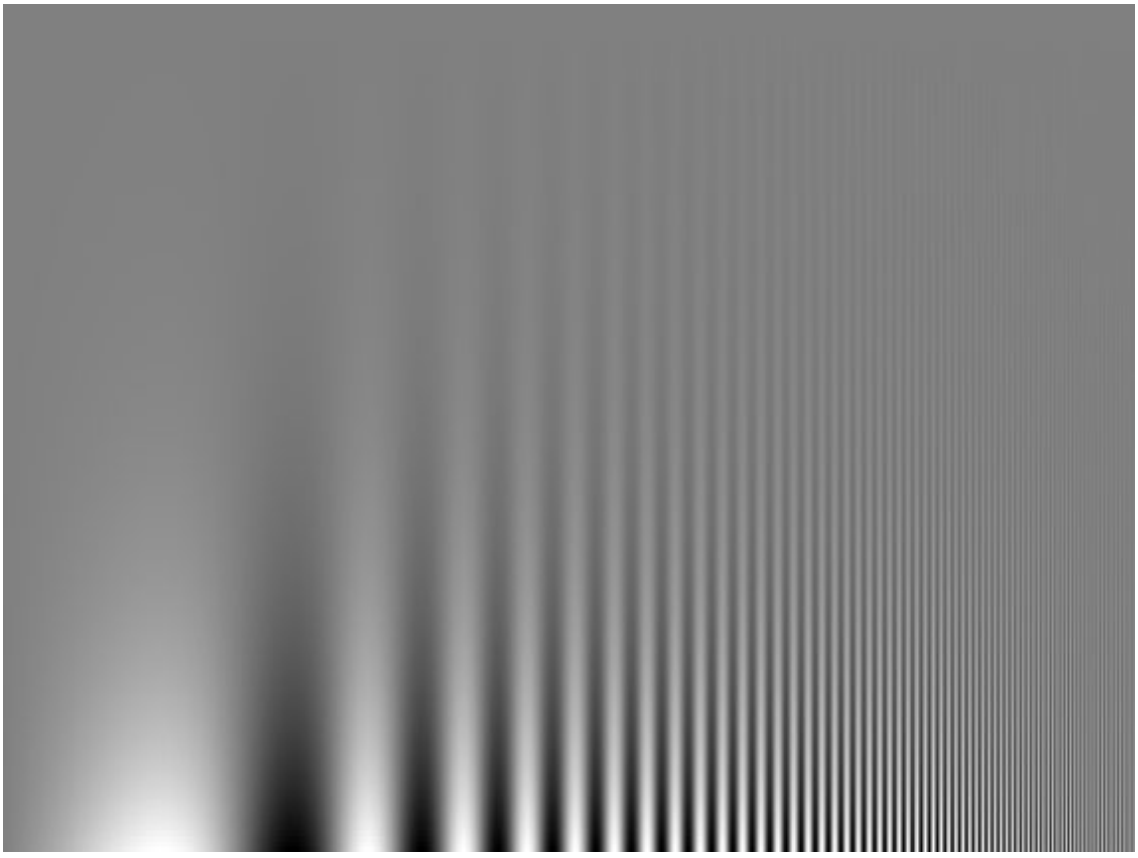
1) de lens in ons oog is relatief klein en is daarom niet in staat lichtzwakke objecten waar te nemen;
2) het kan slechts een beperkt gebied van het spectrum detecteren (de kleuren);
3) bij lichtzwakke omstandigheden ziet het oog zelfs geen kleuren;
4) het oog kan beeldjes niet zo goed integreren: een paar keren per seconde *ziet* ons oog een nieuw beeld (we kunnen dus niet gedurende bijvoorbeeld 5 seconden fotonen verzamelen en pas dan ht beeldje bekijken);
5) ons oog kan geen beeld vasthouden zodanig dat we het verder kunnen distribueren, of er herbekijken.

Het is vanwege deze tekortkomingen dat men diverse hulpmiddelen heeft ontwikkeld om ze te omzeilen: telescopen om licht te verzamelen, film en digitale camera's om beelden in een breed gebied van het spectrum vast te leggen, enzovoort.

De contrastgevoeligheid van het menselijk oog

Experimenten hebben aangetoond dat het menselijk oog contrastvariaties van 2% ten opzichte van een bepaalde maximale helderheid kan detecteren. We moeten hier echter mee oppassen: deze contrastgevoeligheid is afhankelijk van de grootte van de details van het beeld (in technische termen: afhankelijk van de spatiale frekwentie). En zelfs hier moeten we mee oppassen: het is niet omdat een bepaald detail groter is, dat men het daarom ook beter ziet: kleinere, contrastrijkere dingen kan men soms beter zien dan grotere contrastloze zaken.

De onderstaande foto verduidelijkt het een en het ander: in de foto werd de lichtintensiteit horizontaal sinusoïdaal gevarieerd: vandaar dat we afwisselend witte en zwarte strepen zien: we zeggen dat de spatiale frekwentie toeneemt naarmate we naar rechts gaan op de foto. In dit specifiek geval neemt deze frekwentie zelfs exponentiëel toe. We zouden kunnen stellen dat de foto links grovere details en rechts fijnere details vertoont. Verticaal is er echter ook een variatie toegepast: deze gaat van een contrast van 100% onderaan de foto naar 0,5% bovenaan de foto. Ook hier werd een logaritmische schaal toegepast. Wat merken we nu op deze foto op ? De helderheid van de pieken en dalen op één horizontale lijn is constant. Indien nu de detectie van contrast door het oog enkel en alleen zou afhankelijk zijn van het contrast van het beeld, dan zouden de hoogtes van de zwarte balken in het beeld overal moeten gelijk zijn. Dit is echter niet het geval: in het midden zien de zwarte balkjes er duidelijk hoger uit.



Campbell, F. W. and Robson, J. G. (1968) Application of Fourier analysis to the visibility of gratings. Journal of Physiology (London)
Image Courtesy of Izumi Ohzawa, Ph.D. University of California School of Optometry
http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/Introduction/contrastsensitivity.htm

3.2. Artificiële ogen voor stilstaande beelden

Analoge systemen: Film-emulsies

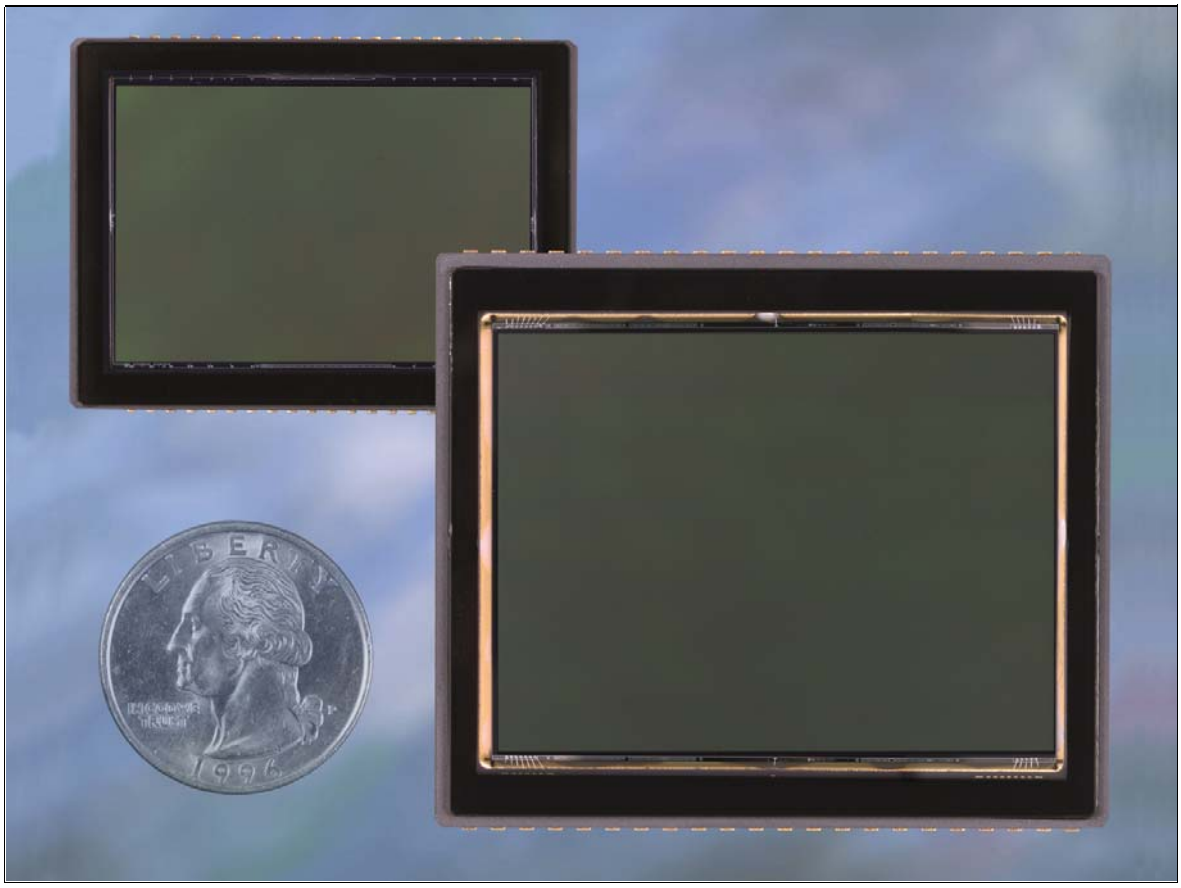
Beelden kunnen worden vastgelegd aan de hand van fotografische film. Dit is al gekend sedert het eind van de 19e eeuw. Meer dan 100 jaar lang was film hét middel om beelden vast te leggen. Vandaag komt dit medium wel meer onder druk door de digitale fotografie. Het ligt in de lijn van de verwachtingen dat dit medium zelfs binnen afzienbare tijd grotendeels, zoniet volledig, zal verdwijnen.

In deze tekst gaan we niet verder in op film-emulsies.

Digitale systemen: CCD's

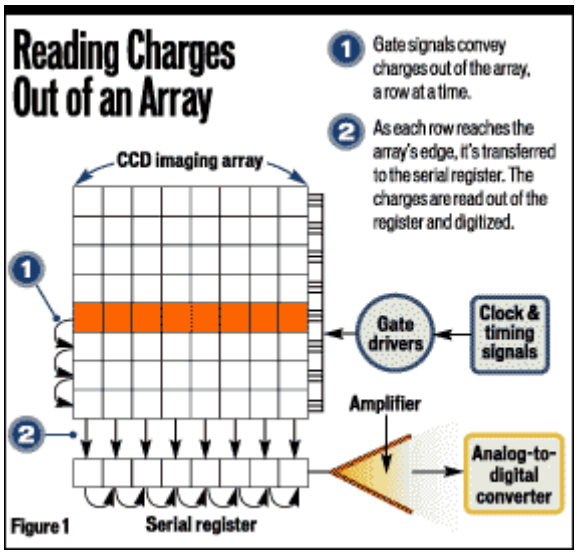
- ***Basiswerking van een CCD***

CCD's, Charged-Coupled Devices, [en **CMOS's** (Complementary Metal-Oxide Semiconductor)**]** zijn electronische chips die bestaan uit honderdduizenden dan wel miljoenen beeldelementen, **pixels** geheten, die lichtgevoelig zijn en in een rechthoekige of vierkante **matrix** (Engels: **array**) worden geplaatst.

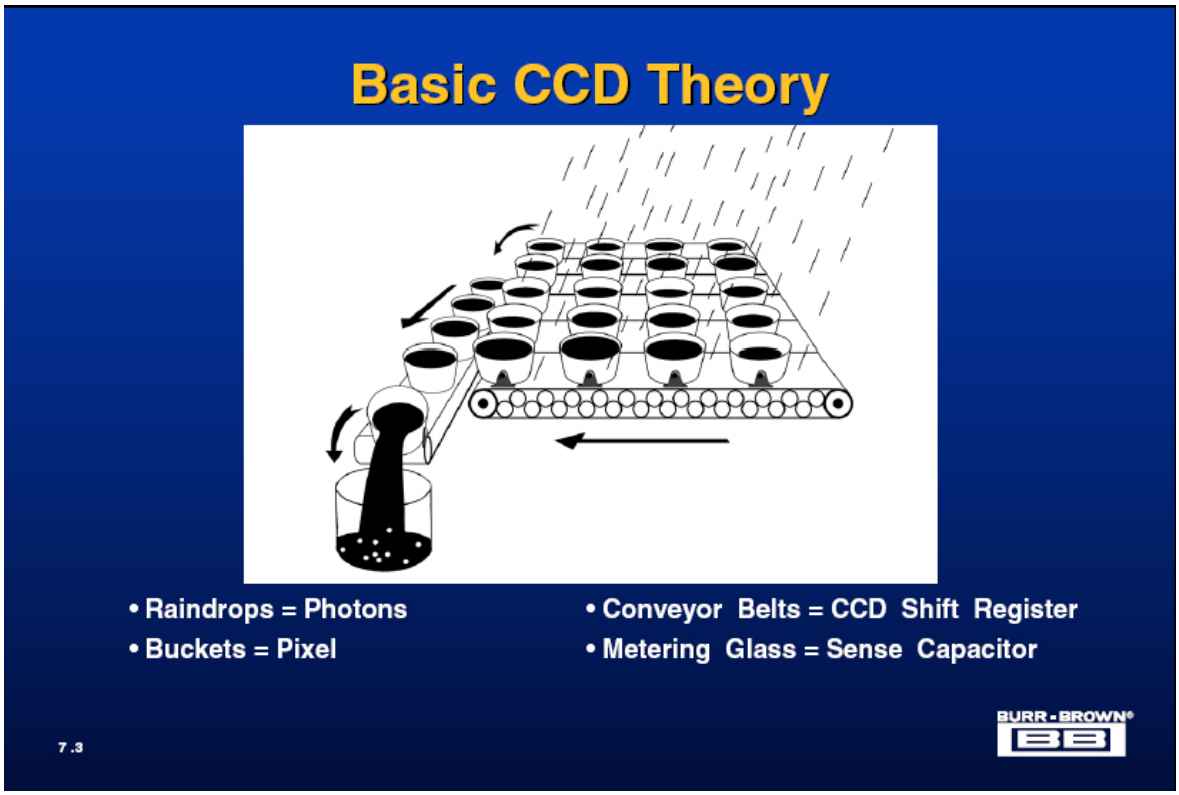


Voorbeeld van een relatief grote CCD-chip: KAI-11000CM (Color).
http://wwwjp.kodak.com/JP/ja/corp/news/02061iss.shtml

CCD's bestaan uit halfgeleidermateriaal die als eigenschap heeft dat er electronen worden gevormd wanneer er licht op valt. Eenvoudig kan worden gesteld dat voor iedere foton dat op het halfgeleidermateriaal valt precies één electron wordt vrijgemaakt. Al deze vrijgekomen electronen (lading) worden een tijdje vastgehouden in het pixelelement waarin ze worden gevormd. Als de belichtingstijd afgelopen is worden deze electronen via een versterker (Engels: amplifier) vrijgelaten en doorgestuurd naar bijvoorbeeld een computer voor verdere electronische verwerking.



*Een CCD-matrix wordt, op een bepaald klokritme, lijn per lijn naar een seriëel register gestuurd. Daar worden de gegenereerde ladingen eerst versterkt (amplifier) en nadien omgezet naar een getal (via een Analoog-Digitaal-Convertor **ADC**) zodanig dat een computer verder met die digitale informatie kan werken.*
http://www.computerworld.com/softwaretopics/software/multimedia/story/0,10801,62778,00.html



Een CCD-chip kan worden gezien als een tapijt van emmertjes. Ieder emmertje stemt overeen met één pixel. Elk emmertje kan worden gevuld met water. Een regendruppel kan worden gezien als een foton. De fotonen worden opgevangen in de pixels (de druppels worden opgevangen in de emmertjes). Op gezette tijdstippen (na de belichtingstijd) worden de emmertjes op een eerste transportband gezet. Er wordt één rij met emmers per keer op een tweede transportband (de CCD Shift Register) gezet. Daar worden de emmertjes één per één uitgegoten in een maatglas. Daar wordt dan gemeten hoeveel water er in de emmer zit. Dit getal wordt dan doorgegeven aan een computer die het dan naar believen kan opslaan of verder verwerken.
http://www.astro.helsinki.fi/opetus/kurssit/ccd/CCD_details1.pdf

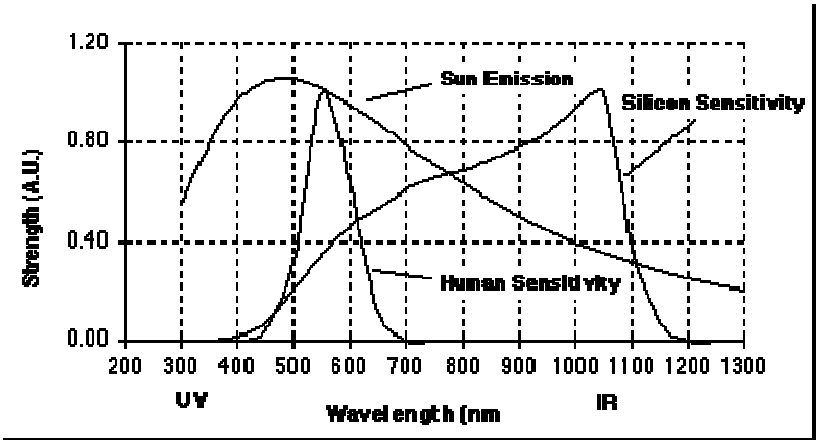
- ***Basiseigenschappen van een CCD-chip***

CCD's verschillen onderling van elkaar door volgende eigenschappen:

1) het aantal beeldelementen (= aantal rijen x aantal kolommen van de CCD-matrix);
2) de grootte van een beeldelement (5, 7, 9 µm bijvoorbeeld);
3) de capaciteit van een beeldelement (dit wil zeggen: hoeveel fotonen er kunnen worden opgeslagen per pixel);
4) Blooming of Anti-Blooming (aangeduid door **ABG**): wat gebeurt er als er téveel fotonen worden gecapteerd: lopen die over in de aangrenzende pixels (dit fenomeen noemen we **Blooming**), of worden die door een speciaal circuit afgevoerd (**Anti-Blooming** faciliteit);
5) de efficiëntie waarmee fotonen effectief worden omgezet in electronen; we noemen dit de **Quantum-efficientie**;
6) de ruis die ze genereren;
7) de spectrale gevoeligheid van de chip.

- ***De spectrale gevoeligheid van een CCD chip***

Onderstaande figuur geeft mooi weer wat de spectrale gevoeligheid is van silicium ten opzichte van de spectrake gevoeligheid van het menselijk oog. Ook het spectrum zoals het door de Zon wordt uitgestraald staat op de figuur weergegeven.



http://www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP/noframes/fip-Spectral.html

Uit de figuur leiden we af dat halfgeleidermateriaal (silicium) zeer Infra-Rood (IR) gevoelig is. Voor sommige toepassingen kan deze gevoeligheid té groot zijn, vandaar dat men dan voorstelt om een zogeheten IR-blokkeerfilter te gebruiken.

Sterrenkundige toepassing: IR-blokkeerfilters in digitale camera's

In de meeste digitale camera's gaat men vóór de chip een IR-blokkeerfilter standaard inbouwen. Voor sommige sterrenkundige toepassingen is dit ongewenst, vandaar dat een aantal firma's zich specialiseren in het verwijderen van deze blokkeerfilters in sommige courante digitale fototoestellen.

Voorbeeld: de firma Hutech in de Verenigde Staten levert een gemodificeerde CANON 300D Rebel digitaal fototoestel. Zie http://www.sciencecenter.net/hutech/canon/index.htm .

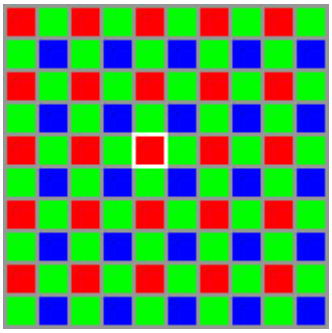
- ***Leveranciers van CCD-chips***

Volgende electronicabedrijven produceren CCD-chips:

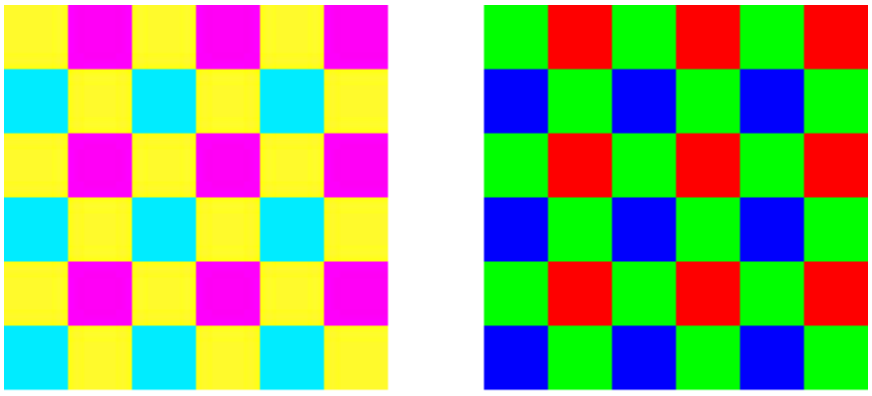
1) SONY (http://products.sel.sony.com/semi/ccd.html)
2) PHILIPS (http://www.semiconductors.philips.com/)
3) KODAK (http://www.kodak.com)

- ***Kleurenchips***

In principe kunnen de beeldelementen op een CCD-chip eigenlijk geen onderscheid maken tussen kleuren. Daarom plaatst men voor de beeldelementen een masker dat wél kleurgevoelig is. Zo'n masker noemt men een **Bayer-masker**. Dr. Bayer was een wetenschapper die bij KODAK werkte (zo'n 20 jaar geleden). Hierbij worden kleurgevoelige materialen volgens een welbepaald patroon aangebracht bovenop de eigenlijke beeldelementen. Er bestaan verschillende soorten van dergelijke patronen.



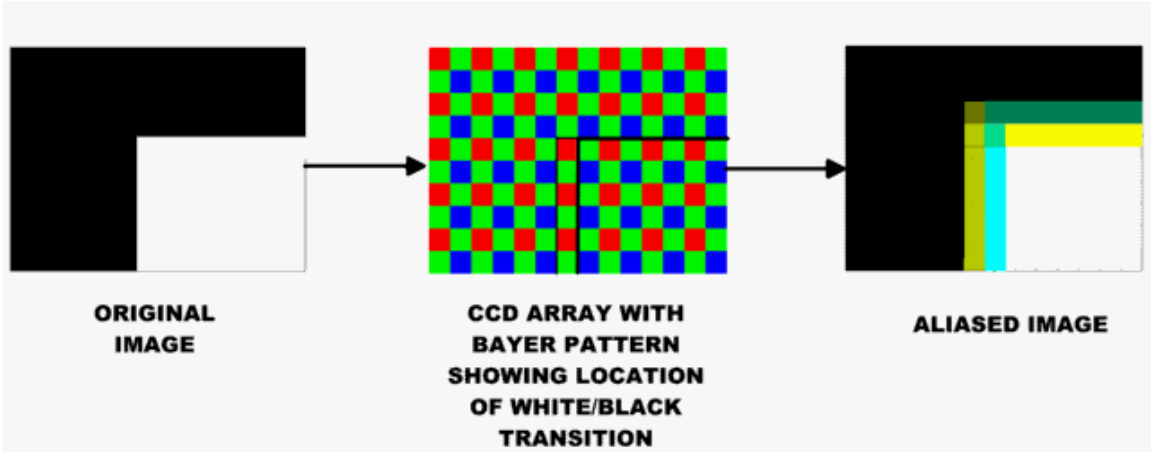
Een Bayer-masker bekijk je best in stukjes van 2 op 2 pixels: in één zo'n Bayer-vierkantje komen 2 groene, één rode en één blauw masker voor. Merk dus op dat zo'n kleurenchip dus 2 x zo gevoelig is in groen licht in vergelijking met blauw en rood licht.
http://www.peter-cockerell.net:8080/Bayer/bayer.html



In principe bestaat een Bayer masker uit Rode, Groene en Blauwe elementen (RGB Bayer masker). Niets weerhoudt er een chipfabrikant echter van om een Cyaan, Magenta en Geel (CMY) Bayer masker te gebruiken.
http://www.modernimaging.com/Kodak_DCS-620x_Technology.htm

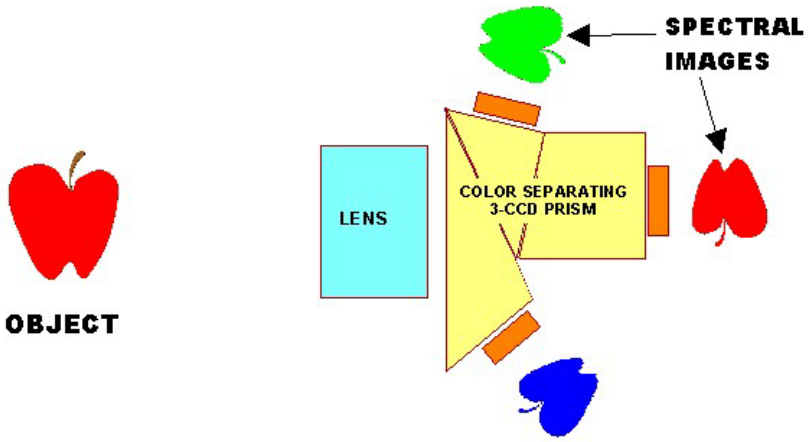
Aliasing

Een typisch probleem die kleuren CCD camera's, die werken op basis van een Bayer-masker, hebben is de zogeheten **color aliasing**. Onderstaand voorbeeld maakt duidelijk wat dit betekent: het originele beeld heeft een perfect zwart/witte aflijning maar door het bayer-patroon is het bekomen beeld een beetje onscherper geworden en zien we eigenlijk een gekleurde overgang ontstaan waar die eigenlijk niet zou mogen zijn: er ontstaat geel, blauw, enz. . Besluit: een kleurencamera dat werkt op basis van een Bayer-masker is altijd wat onscherper dan een monochrome camera waarvan de CCD-chip even groot is maar zonder Bayer-masker werkt.



http://www.duncantech.com/Dig_Camera_OV.htm#3CCD%20Camera

Wil men een foutloos kleurenbeeld opnemen, dan moet men het beeld dat binnenkomt opsplitsen in haar 3 basiscomponenten (rood, groen en blauw) en met 3 CCD-chips werken die in parallel elk in één kleur opnemen. Onderstaand schema maakt dit duidelijk. Doordat het werken met 3 chips nogal duur is wordt deze manier van werken niet veel toegepast (behalve voor professionele toepassingen).



http://www.duncantech.com/Dig_Camera_OV.htm#3CCD%20Camera

- ***Bit-diepte***

In CCD-camera's worden in principe het aantal electronen geteld die op ieder beeldelement (pixel) vallen. Ze doen dit met een welbepaalde nauwkeurigheid. Sommige CCD-camera's zullen de hoeveelheid licht dat op een pixel valt voorstellen als een waarde tussen 0 en 255, terwijl anderen dat dan weer doen met een waarde tussen 0 en 4095. Geavanceerdere CCD-camera's geven zelfs tot 65.536 mogelijke lichtwaardes terug. In deze 3 geciteerde voorbeelden spreken we respectievelijk van een 8-bit-, 12-bit- en 16-bit-camera. In het vakjargon wordt er gesproken van **bit-diepte** (Engels: **bit depth**). Men kan dus een CCD-camera kopen met een bitdiepte van 8, 12 of 16 bits. Naarmate de bitdiepte toeneemt kan de camera alsmaar meer schakeringen van zwart naar wit weergeven.

In digitale kleurencamera's zal men *per kleurkanaal* een bit-diepte van 8, 12 of 16 hanteren. Zo spreken we van een 24 bit-, 36 bit- of 48 bit-camera en een **kleurendiepte** van respectievelijk 8, 12 of 16. Wanneer een dergelijke camera het gecapteerde beeld doorstuurt naar een computer dan moet op de computer een beeldverwerkingsprogramma worden gebruikt die 24 bit-, 36-bit- of 48-bit beeldverwerking toelaat. Doet men dit niet dan gaat bepaalde informatie die in het beeld aanwezig is onherroepelijk verloren. Onnodig te preciseren dat dergelijke 48-bits beeldbewerkingssoftware aanzienlijk duurder is dan de gebruikelijke 24-bits versies. De bestandsgrootte van een 16-bit foto zal aanzienlijk groter zijn dan van een 8-bit foto.

Voorbeeld: De CANON EOS-10D camera is een digitale kleurencamera met een kleurendiepte van 12 bits. Wil men effectief de beeldjes in 12-bit kleurendiepte op de computer krijgen dan moet men werken in het zogenaamde RAW formaat. Speciale beeldbewerkingssoftware zal dit RAW bestandsformaat omzetten naar het populairdere 16-bit TIFF formaat. Standaard stuurt deze camera echter zijn beelden door in JPEG-formaat en dit is altijd met een kleurendiepte van 8 (dit zijn *slechts* 24 bits kleurenfoto's).

▪ ***Ruis in CCD's***

Een belangrijke kwaliteitsfactor van een CCD-chip is de hoeveelheid ruis (Engels: **noise**) die er in ontstaat. Hoe minder ruis er ontstaat, hoe beter. Ruis verstoort het beeld.

In een CCD-chip kan op volgende manieren ruis ontstaan:

3) ruis dat ontstaat in de eindversterker
4) ruis dat ontstaat in het halfgeleidermateriaal
    i. shot
    ii. flicker
    iii. white noise (thermal noise)
5) ruis dat ontstaat door warmte in weerstanden
6) ruis dat ontstaat in de Analoog/Digital omzetter (ADC quantisation noise)
7) ruis dat ontstaat door de lijnfrekwentie van het electrische net (50 of 60 Hz).

Hoe hoger de ruis, hoe minder dynamisch bereik een CCD-chip heeft. Van alle opgesomde ruisbronnen is de thermische ruis (puntje 1 hierboven) dé belangrijkste. Deze ruis, de zogeheten kT/C ruis, ontstaat in een hoogfrekwente schakelaar (FET) die in de eindtrap van de CCD aanwezig is.

Wanneer er helemaal geen licht wordt gedetecteerd, bijvoorbeeld omdat we de CCD-chip hebben afgedekt, zal er enkel en alleen door de omgevingswarmte toch electronen loskomen in het halfgeleidermateriaal. Er ontstaat dus een stroom alhoewel het nog donker is. We noemen dit derhalve de **donkere stroom** (Engels: **dark current**).

Aangezien niet iedereen ingenieur is gaan we op de meeste van de ruisbronnen niet verder in. Wat wel belangrijk te weten is is dat een CCD het minst ruis opwekt als die het koudst is. Hoe kouder, hoe minder electronen vrijkomen. Het probleem met deze *zo* maar vrijgekomen electronen is dat men ze niet kan onderscheiden van de *nuttige* electronen die zijn vrijgekomen omdat er daadwerkelijk fotonen afkomstig van het hemelobject zijn gevallen op het halfgeleidermateriaal. Dit is de voornaamste reden waarom CCD-camera's, zeker voor astronomische doeleinden, worden gekoeld. Wordt een CCD-chip gekoeld dan komen dus minder ongewenste electronen vrij en worden enkel de nuttige electronen geteld.

- ***Vergelijking van de CCD-chip & de CMOS***

CCD

Voordelen:

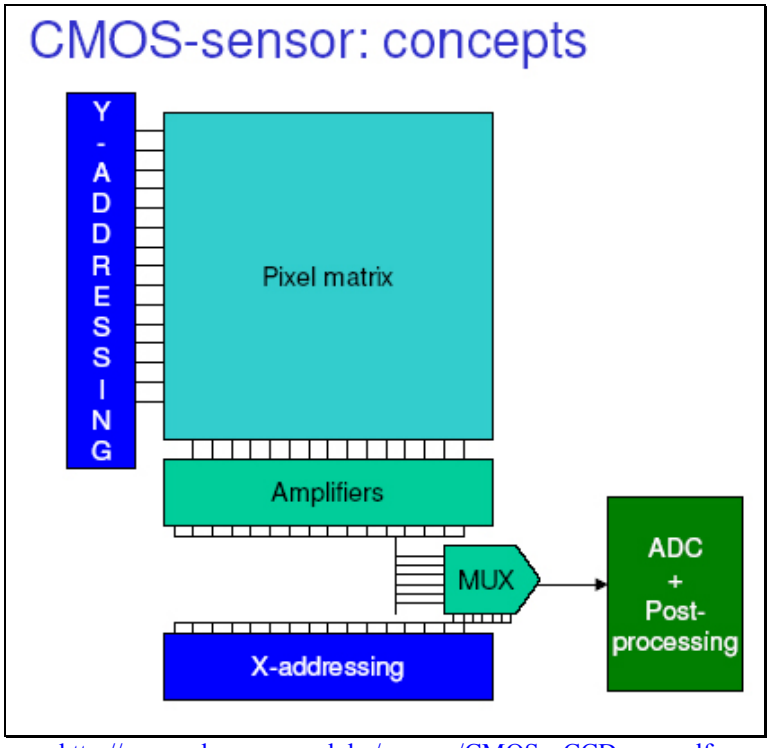
1) Hoge Signaal/Ruis verhouding
2) Goed gebruik van de beschikbare oppervlakte (omzeggens alle ruimte kan worden gebruikt om fotonen op te vangen)
3) Zéér lage donkere stroom

Nadelen:

1) Hoog stroomverbruik
2) Vergt een speciaal productieproces, dus duur(der)
3) Er is geen extra logica beschikbaar op de chip

CMOS

Bij een CCD meet men een lading, in een CMOS gebruikt men de gegenereerde stroom die doorheen de fotodiode loopt. Deze stromen worden in de pixel zelf versterkt. We spreken hier over **actieve pixels**. De meeste digitale camera's gebruiken een CMOS-chip.



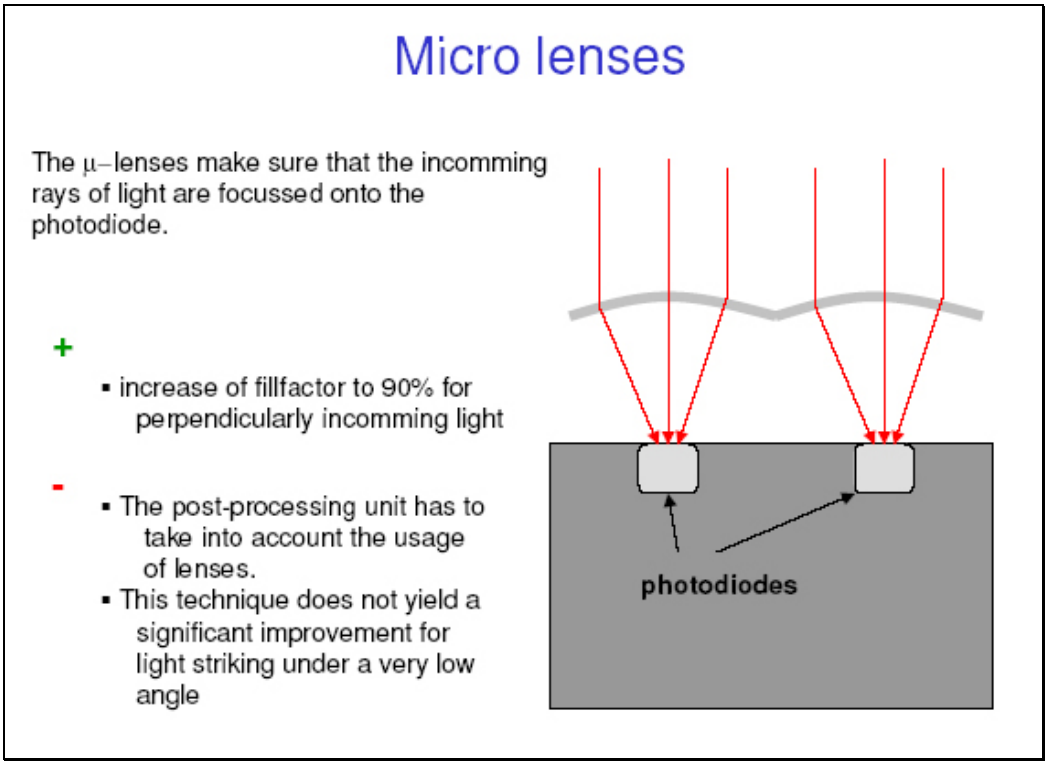
http://emsys.denayer.wenk.be/emcam/CMOSvsCCD_eng.pdf

Voordelen:

1) Een CMOS verbruikt weinig stroom en daarom bijzonder geschikt voor mobiele toepassingen
2) Een CMOS kan worden geproduceerd zoals andere *gewone* chips (is dus goedkoper)
3) Gemakkelijke integratie met andere electronische componenten

Nadelen:

1) De Signaal/Ruis verhouding is slechter dan bij CCD's (door de aanwezigheid van de vele transistoren)
2) De beschikbare oppervlake wordt minder goed benut aangezien de stuurlogica om de pixels actief te maken ook plaats inneemt; CMOS's hebben dus een lagere sensitiviteit dan een in oppervlak vergelijkbare CCD (men zegt dat de ***fillfactor*** bij een CMOS laag is). Om dit nadeel te verminderen maakt men nu gebruik van **microlensjes**. Door deze lensjes geleidt men het inkomende licht naar de echt lichtgevoelige gebieden op de chips (de **fotodiodes**).

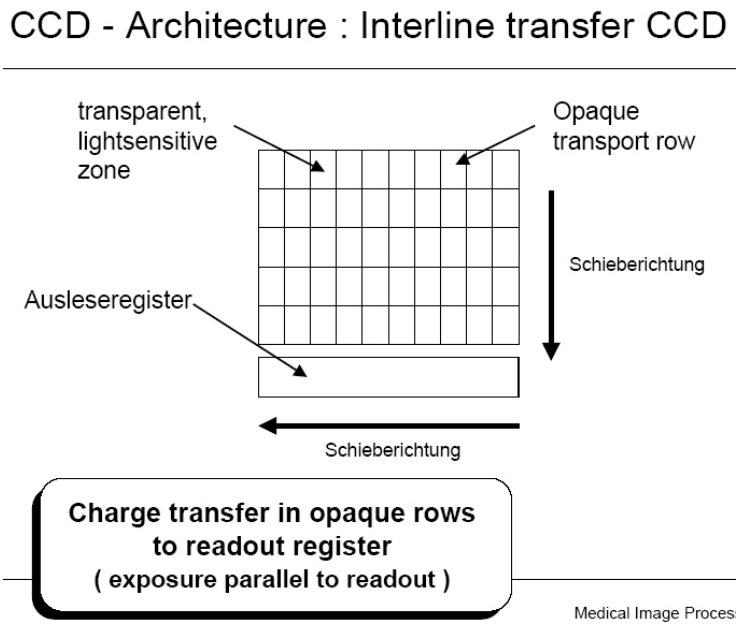


http://emsys.denayer.wenk.be/emcam/CMOSvsCCD_eng.pdf

3) De donkere stroom is hoger (bijv. 1 nA/cm^2)
4) CMOS-technologie is nieuw(er dan CCD-technologie).

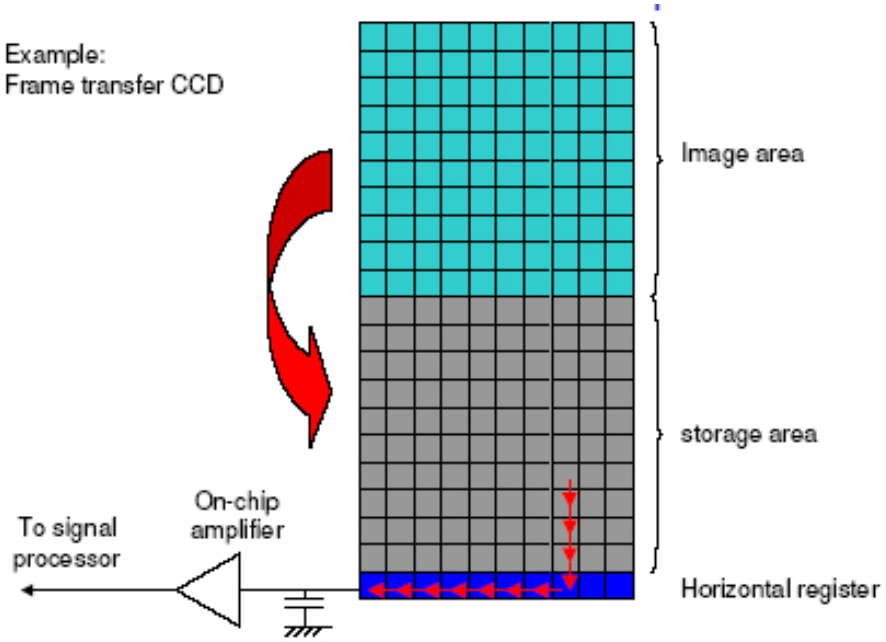
- ***Types van CCD-chips***

Interline Transfer CCD



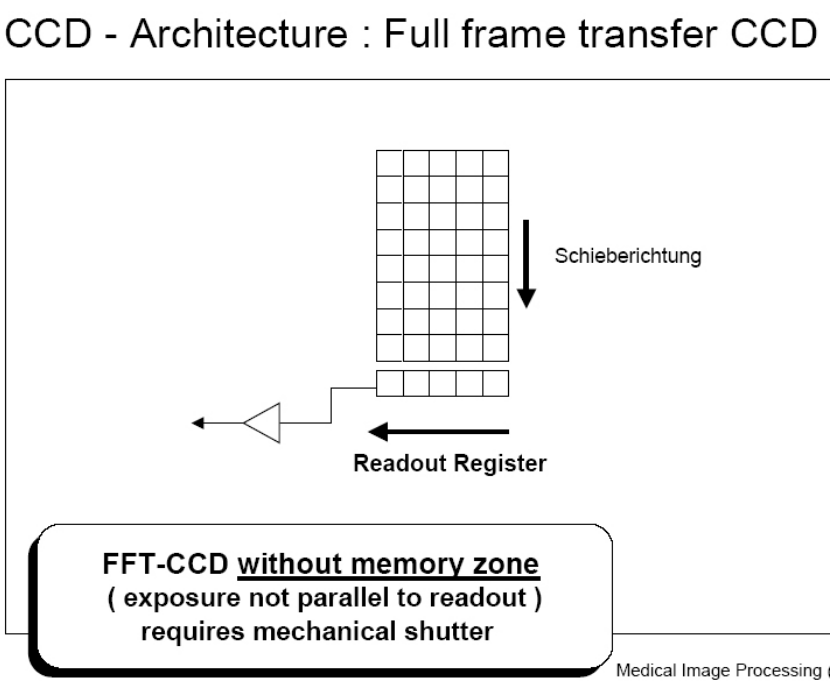
http://www.medizinischeinformatik.fh-aachen.de/downloads/master/1_Img_Aqu_printer.pdf

Frame Transfer CCD



http://emsys.denayer.wenk.be/emcam/CMOSvsCCD_eng.pdf

Full Frame Transfer CCD



http://www.medizinischeinformatik.fh-aachen.de/downloads/master/1_Img_Aqu_printer.pdf

Thinned CCD's

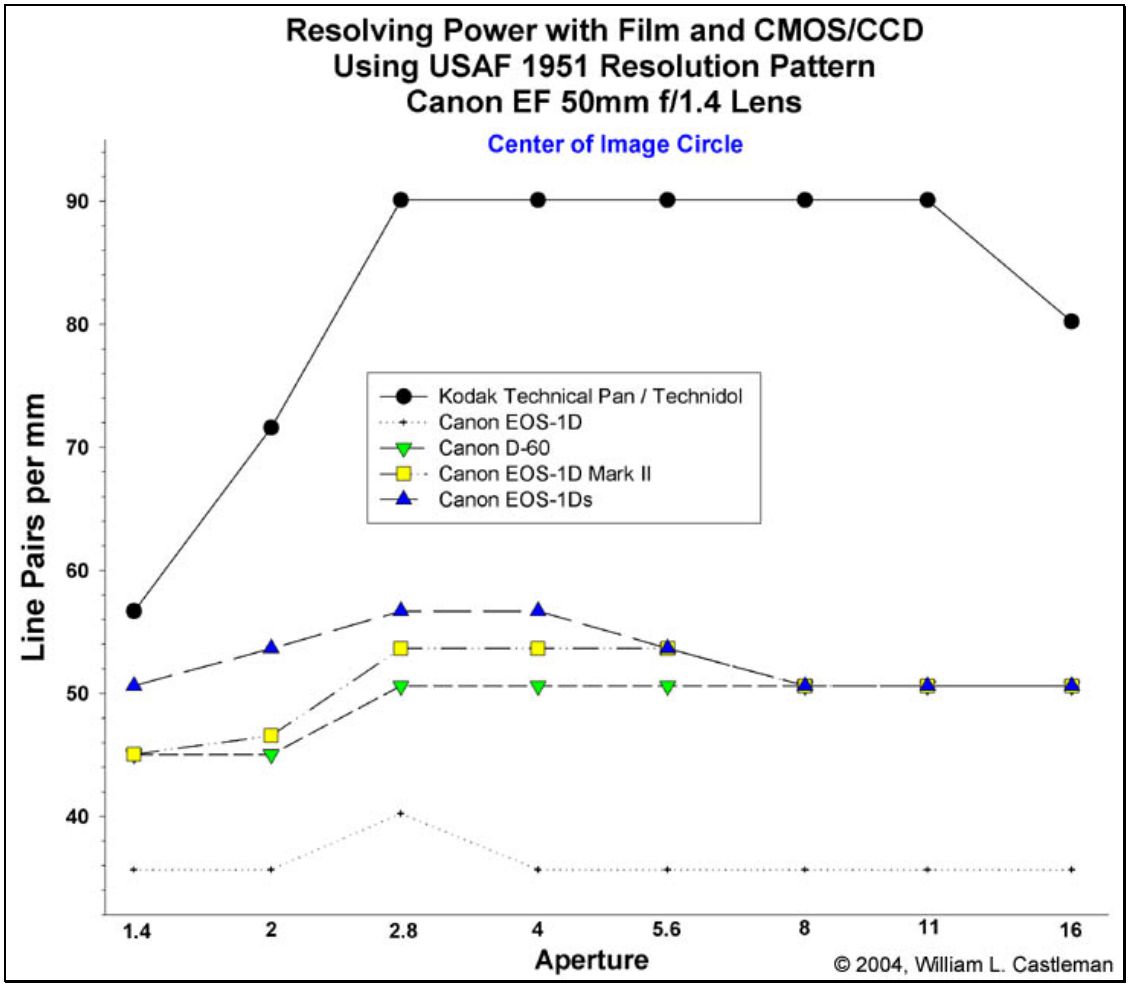
Nog uit te werken.

Back Illuminated CCD's

Nog uit te werken.

- ***Vergelijking resolutie tussen digitale sensors & film***

In het overgrote gedeelte van de gevallen is het tot op vandaag nog steeds niet zo dat de digitale sensors de resolutie halen van een *goede* analoge film. Op het internet zijn diverse testen hierover te vinden. In het onderstaande schema wordt de resolutie van een Kodak Technical Pan (25 ASA) vergeleken met enkele recente digitale camera's van CANON nl. de CANON EOS-1D, D-60, EOS-1D Mark II en de EOS-1Ds. We kunnen opmerken dat in het geval een standaard lens wordt gebruikt (in deze test de EF 50mm f/1.4), we digitaal nauwelijks 60% van het oplossend vermogen van de Technical Pan halen: zo'n 40 à 55 lijnen per mm ipv 90 lijnen per mm.



http://www.wlcastleman.com/equip/reviews/Eos1Dm2/markIIresolution.jpg

Hier wordt ook nog eens een vergelijking gemaakt met een Fuji Provia 100F film: http://www.wlcastleman.com/equip/reviews/film_ccd/filmdig2.jpg .

Als er voldoende licht is en je kunt fotograferen met een film van slechts 25 ASA (in een fotostudio bijvoorbeeld), dan zal de film het duidelijk winnen van de digitale camera. Wanneer er, voor astrofotografische doeleinden bijvoorbeeld, moet gewerkt worden op 400, 800 of zelfs 1600 ASA, dan zullen die verschillen in resolutie drastisch verminderen: je moet dan immers overschakelen op grofkorreliger films die een beduidend lagere resolutie geven.

- ***Leveranciers***

Leveranciers van Astronomische CCD camera's

Apogee Instruments (http://www.ccd.com)
SBIG (http://www.sbig.com)
Starlight-Xpress (http://www.starlight-xpress.co.uk)

Leveranciers van (Astronomische ?) CMOS camera's

CANON (http://www.canon.com)
☞ CANON EOS-10D, EOS-1D, D60, EOS-300, EOS-1D Mark II
FUJI
NIKON (http://www.nikon.com)
☞ NIKON D100, D70, Coolpix reeks
PENTAX (http://www.pentax.com)
MINOLTA

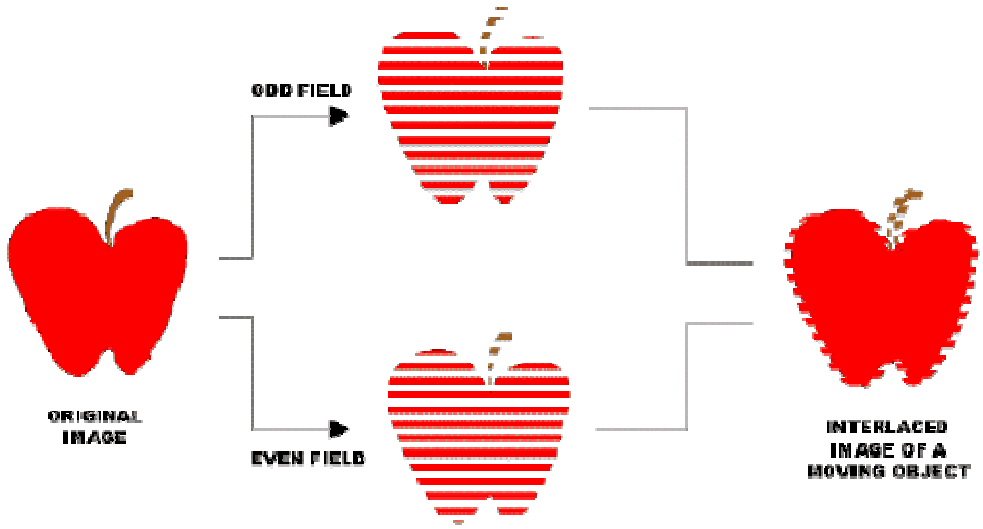
3.3. Artificiële ogen voor bewegende beelden

Analoge systemen: TV & video

Video en TV bestaat ook al enkele tientallen jaren. Aan de hand van electronische componenten slaagt men er in om bewegende beelden op te slaan op bijvoorbeeld magnetische band.

- ***Basisconcepten***

Interlaced beeld versus Progressive Scan

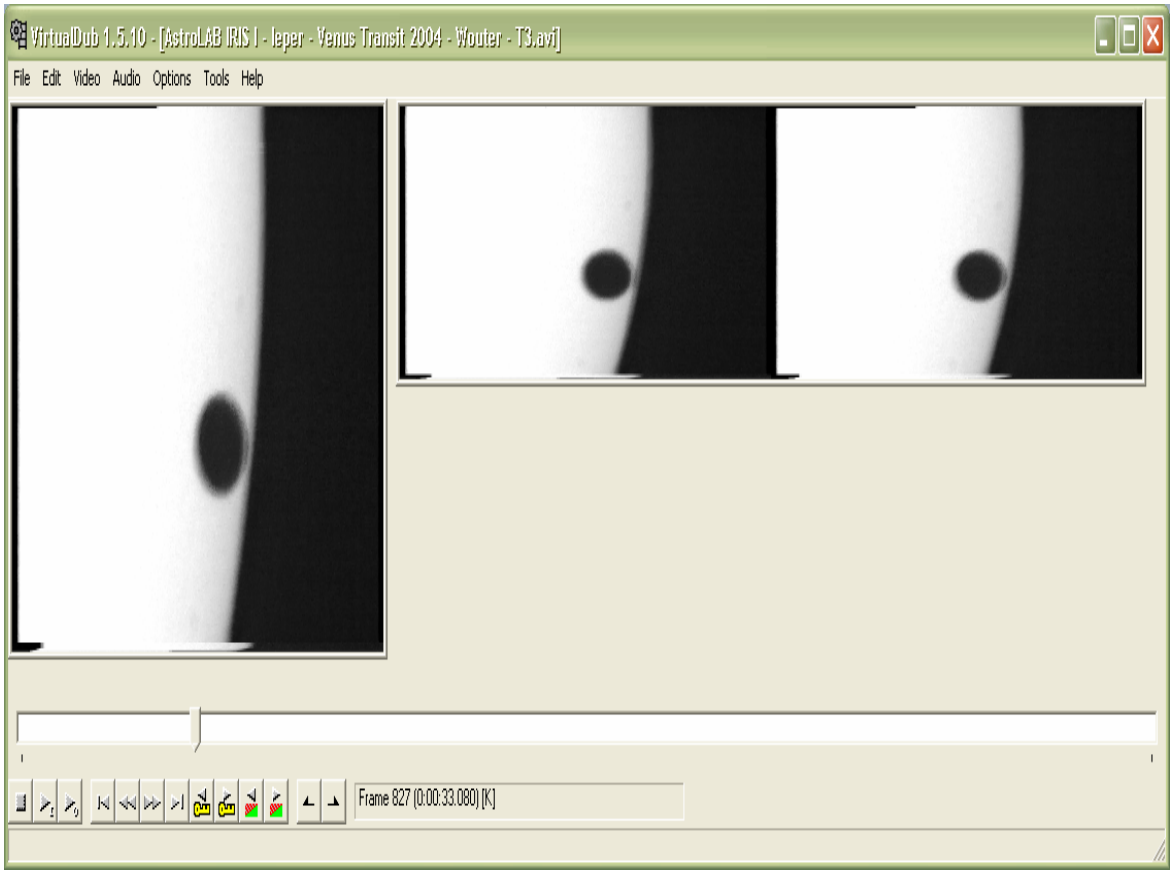


http://www.duncantech.com/Dig_Camera_OV.htm#3CCD%20Camera

Bij de *interlaced* beeldopnametechniek worden eigenlijk twee foto's na elkaar genomen. Deze twee opnames worden dan gemixt: eerst komt een eerste lijn van de eerste foto, dan de eerste lijn van de tweede foto, dan de tweede lijn van de eerste foto, de tweede lijn van de tweede foto, enzovoort. Alle lijnen samen vormen één beeld (een **frame** geheten). Bij sterk bewegende beelden zal men bij de interlaced beeldopnametechniek enige onscherpte merken (vooral in de contouren).

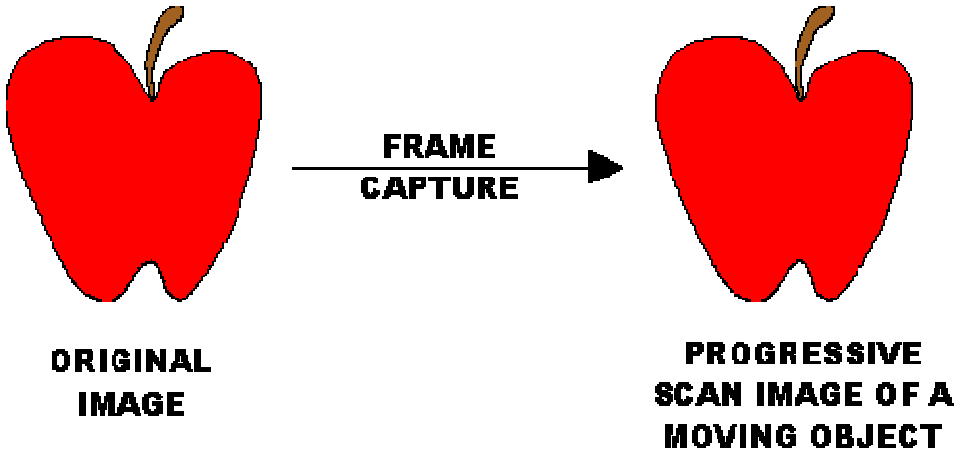
Dé reden waarom men de interlacing techniek gebruikt is om **flikkering** tegen te gaan wanneer men met beeldverversingsfrekwenties zit onder de 60 beelden per seconde. Wanneer de frekwentie hoger is dan 60 frames per seconde werkt men niet langer met interlacing.

Toepassing in de sterrenkunde:



Tijdens de Venus Transit van 8 Juni 2004 nam Wouter Devers een videofilm op van het T3/T4 contactmomenten. Deze video werd gemaakt met behulp van de SONY 2005 XA EXView Low Light CCD camera. Deze camera werkt met de de interlaced beeldopnametechniek (zie het document in de AstroLAB IRIS databank: http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=EXView+Manual : er staat *Scanning System: 1:2 Interlace*).

In het gratis softwarepakket *Virtual Dub* kun je met filters werken. Met de *deinterlace* filter kun je de oorspronkelijke frame (links hierboven te zien) splitsen in de twee oorspronkelijke *fields*: de even en de oneven fields. Die twee zie je rechts hierboven afgebeeld. De lezer zal onmiddellijk opmerken dat de zogeheten fields (rechts) maar de helft zoveel lijnen bevatten als de uiteindelijke frame (links).



http://www.duncantech.com/Dig_Camera_OV.htm#3CCD%20Camera

De zogeheten *progressieve* beeldopnametechniek geeft veel nauwkeuriger resultaten: daar wordt het bewegende object in één beweging afgescand. Iedere scancyclus resulteert in precies één frame. Wanneer je een camera koopt let je er dus best op of het gaat over een Interlaced of Progressive Scan camera.

- ***Standaarden***

De TV standaarden: PAL, NTSC en andere

In de VS is interlaced video dé standaard en deze wordt gedefinieerd door de **National Television Systems Committee** (**NTSC**). In het overgrote gedeelte van Europe is **PAL**, de **Phase Alteration Line**, dé standaard. PAL werkt met 625 lijnen en een ritme van 25 frames per seconde. NTSC daarentegen werkt met 525-lijnen (30 frames per seconde) maar waarvan er slechts 485 lijnen echt worden getoond.

Een volledig overzicht van TV-standaarden vind je in onderstaande tabel terug.

The Main Video Signal Standards			
Name	**Frame/Field rate**	**Aspect Ratio**	**Scan Lines**
	TV standard	**Colour System**	**Subcarrier Freq**
NTSC	29.97/59.94	4:3	525
	EIA	NTSC	3.58MHz
PAL-M	29.97/59.94	4:3	525
	EIA	PAL	3.58MHz
SECAM-M	29.97/59.94	4:3	525
	EIA	SECAM	?.??MHz

PAL	25/50	4:3	625
	CCIR	PAL	4.43MHz
SECAM	25/50	4:3	625
	CCIR	SECAM	4.25/4.40MHz
D-MAC	25/50	4:3 or 16:9	625
	D-MAC	D-MAC	N/A
PALplus	25/50	16:9	625
	CCIR	PAL	4.43MHz
HiVision	60/120	16:9	1125
	HiVision	MUSE	Unknown

http://www.ee.surrey.ac.uk/Contrib/WorldTV/compare.html

☞ Wanneer je een videocassette koopt, bijvoorbeeld via het internet, dan bekijk je best of de video is opgenomen in PAL/SECAM formaat. Meestal worden filmtitels zowel in NTSC als in PAL/SECAM signaal verdeeld. Zorg dat je de juiste versie bestelt want anders kun je ze niet afspelen op de bij ons verkrijgbare PAL/SECAM video-afspeelapparatuur.

De Video Standaarden

Onderstaande tabel geeft een overzicht van de diverse formaten die bestaan in de wereld van opgenomen beelden (**video**).

Format	Scan Lines /Colour	Speed	Max Playing Time/Tape
VHS	525/NTSC	SP	160 mins/T-160
		LP	320 mins/T-160
		EP	480 mins/T-160
	625/PAL	SP	300 mins/E-300
		LP	600 mins/E-300
	625/SECAM	SP	300 mins/E-300
		LP	600 mins/E-300
SuperVHS	525/NTSC	SP	160 mins/ST-160
		EP	480 mins/ST-160
	625/PAL	SP	240 mins/SE-240
		LP	480 mins/SE-240
D-VHS	525/NTSC	N/A	Varies
DVC	525/NTSC	miniDV	60 mins
		DVC	180 mins

	625/PAL	miniDV	60 mins
		DVC	180 mins
Video 8	525/NTSC	SP	120 mins/P6-120
		LP	240 mins/P6-120
	625/PAL	SP	90 mins/P5-90
		LP	180 mins/P5-90
	625/SECAM	SP	90 mins/P5-90
		LP	180 mins/P5-90
Hi-8	525/NTSC	SP	120 mins/P6-120ME
		LP	240 mins/P6-120ME
	625/PAL	SP	90 mins/P5-90ME
		LP	180 mins/P5-90ME
LaserDisc	525/NTSC	CAV	30 mins per side
		CLV	60 mins per side
	625/PAL	CAV	37 mins per side
		CLV	72 mins per side
DVD	525/NTSC	Single Layer	Varies (4.7GB)
		Dual Layer	Varies (8.6GB)
	625/NTSC	Single Layer	Varies (4.7GB)
		Dual Layer	Varies (8.6GB)

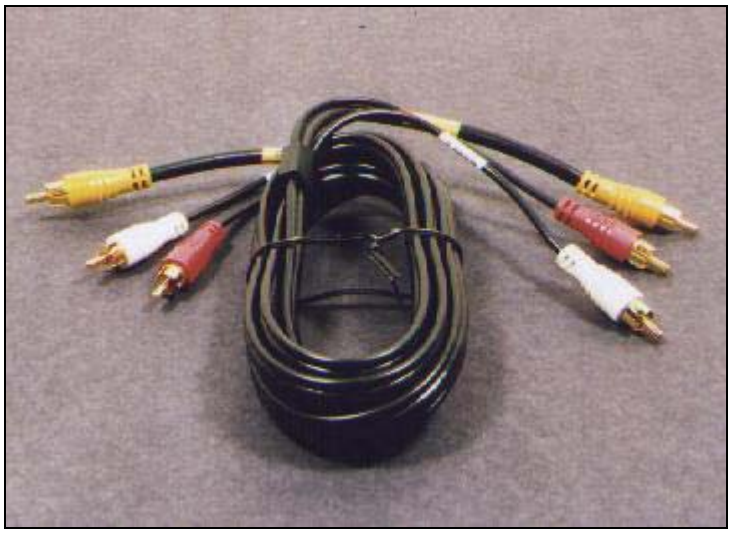
http://www.ee.surrey.ac.uk/Contrib/WorldTV/video.html

Het verschil tussen Video en Super-Video

Een standaard videosignaal bevat drie soorten informatie:

1) Helderheden
2) Kleuren
3) Tijdsinformatie .

Zo'n videosignaal noemen we daarom een **composietsignaal**. Omzeggens alle TV en videoapparatuur ondersteunt dit standaard signaal. Meestal is dit een gele plug op deze apparatuur. De audio wordt dan meestal via aparte RCA-pluggen doorgestuurd (wit en rode om de linker- en rechteraudio door te sturen).



Voorbeeld van een RCA-video (gele connectoren) en –audiokabel (witte en rode connectoren).
http://www.datapro.net/products/1183.html

Er bestaat echter nog een ander videosysteem: we noemen dit **Super Video** (S-Video). In dit geval worden twee signaalparen gebruikt: één voor de helderheden (het Y-signaal) en één voor de kleuren (het C-signaal). We spreken daarom van een **Y/C-signaal** of **Y/C-video**. Hi-8 is ook een voorbeeld van zo'n Y/C-videosignaal. Door helderheden- en kleurinformatie strict van elkaar te scheiden is het mogelijk om scherpere beelden te bekomen. Om zo'n type van videosignaal door te sturen dienen dus andere kabels en connectoren gebruikt te worden dan wat normaal gebruikelijk is.



Voorbeeld van een S-VHS kabel.
http://www.datapro.net/products/1165.html

Veelal wordt er gewoon ook over S-VHS gesproken. In principe is S-VHS eigenlijk een opnamestandaard. Om met S-Video signalen te kunnen werken moet de apparatuur, bijvoorbeeld een camera of videorecorder, daar speciaal op voorzien zijn. S-Video of S-VHS apparatuur is (behoorlijk) duurder dan standaard VHS apparatuur.

SDTV

SDTV is de afkorting van **Standard Definition Television**, en refereert naar de digitale overdracht van gewone (analoge) TV signalen. In feite komt het er op neer dat wanneer men standaard TV beelden digitaliseert (SDTV), men de volgende resoluties hanteert:

Standard Dimensions

525 line systems 480x720

625 line systems 576x720

http://www.ee.surrey.ac.uk/Contrib/WorldTV/digital.html

Sterrenkundige toepassing: Digitalisatie van videobeelden van de Venus Transit 2004

Tijdens de Venus Transit van 8 Juni 2004 werden door twee verschillende waarnemingsteams van AstroLAB IRIS video's opgenomen doorheen diverse telescopen. Deze videotapes werden door AP&P, een informaticabedrijf uit Ieper (België), gedigitaliseerd. Aangezien het oorspronkelijk signaal was opgenomen in de gebruikelijke Europese PAL standaard, een 625 lijnsysteem dus, is de resolutie die werd gehanteerd bij de conversie 576 x 720 pixels.

HDTV

HDTV staat voor **High-Definition TV**. Dit is een nieuwe TV standaard die volop in ontwikkeling is en als bedoeling heeft de tamelijk lage resolutie van de huidige TV-beelden op te krikken. HDTV is nog maar beperkt beschikbaar en dan nog meestal maar voor professionele toepassingen.

Digitale systemen: Digital Video (DV)

Nog uit te werken.

Digitale systemen: Webcam

Webcams zijn, ongetwijfeld een beetje tegen de verwachtingen in, nogal populair geworden in astronomische middens. Ze worden vooral met succes toegepast voor het maken van planeetopnames. Vooral de Philips webcams, de Vesta Pro en ToUCam reeksen, hebben meer dan voldoende hun sporen al verdiend.



Voorbeeld van een webcam: de Philips Vesta Pro.
http://home.socal.rr.com/hotweb/vesta/

Webcams zijn eigenlijk CCD chips met een chipresolutie van meestal 640 op 480 pixels die filmpjes afleveren in AVI of MPEG formaat; dus direct bruikbaar op de computer. De webcam wordt rechtstreeks aangesloten op de computer: vroeger gebeurde dit vooral via de parallelle poort, tegenwoordig gebeurt dit meestal via de USB poort.

Standaard kunnen webcams bijvoorbeeld werken tussen de 5 à 60 beeldjes per seconde. Voor veel deep-sky objecten is dit uiteraard te snel omdat er in die tijdspanne té weinig licht van het object kan worden verzameld. Verschillende mensen ter wereld houden zich bezig met het veranderen van parameters in de software van zo'n webcams, of herontwikkelen electronica waarmee het mogelijk wordt het standaard gedrag van zo'n webcam te veranderen (om er bijvoorbeeld lange belichtingsopnames mee mogelijk te maken). Hieronder vindt U een aantal interessante websites die U het een en het ander hieromtrent toelichten.

Om een webcam op een telescoop aan te sluiten heb je een **webcam adapter** nodig. Deze adapter wordt in de plaats gebracht van de lens die met de webcam standaard wordt meegeleverd. Een voorbeeld van zo'n webcamadapter zie je hieronder. Je kunt ze op verschillende plaatsen aankopen. Er bestaan ook wat gesofisticeerdere modellen, onder andere met ingebouwde focal reducers (brandpuntverkorters): zie bijvoorbeeld de website van de Australiër Steven Mogg: http://webcaddy.com.au/ .



Voorbeeld van een webcam adapter. Zo'n adapter komt in de plaats van de lens die normaal op de webcam zit en levert een 1,25" vatting op zodanig dat die in een standaard oculairvatting op een telescoop kan worden geplaatst. (http://www.pk3.org/Astro/Images/Equipment/photo_mogg01.jpg *)*

Wilt U meer weten over het gebruik van webcams in sterrenkundige middens, bezoek dan volgende websites:

- ASTRID – de Astronomische beeldendatabank
  *** Verzameling mooie foto's genomen met een Philips ToUCam
  http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=toucam
  *** Verzameling mooie foto's genomen met een Philips Vesta
  http://astrid.astrolab.be/jsp/zoek.jsp?arg=vesta

- QuickCam and Unconventional Imaging Astronomy Group
  http://www.qcuiag.co.uk/

- Poor Meadow Dyke Observatory – website van Steve Chambers (Groot-Brittanië)
  http://www.pmdo.com/wintro.htm

- Website van Etienne Bonduelle (Frankrijk)
  http://www.astrosurf.com/astrobond/
  Zie de rubriek : *Trucs et Astuces !!!*

- Website van Erik Bryssinck (België)
  *** Modification of a Philips Vesta 680 for astro-photography
  http://www.eisystems.be/astronomy/menu_project.html
  *** Webcam Frequently Asked Questions
  http://www.eisystems.be/astronomy/faq_webcam.html

- Website van Peter Katreniak (maker van de *K3CCDTools* software)
  http://www.pk3.org/Astro/index.htm

4. Appendix : Interessante Websites

1) The Joy of Visual Perception: A Web Book
   http://www.yorku.ca/eye
2) ASTRID: Astronomische Beeldendatabank
   http://www.astrolab.be/astrid
3) AstroLAB's Digitale Astrofotografie VGV (FAQ)
   http://www.astrolab.be/html/acg_astrofotografie_nl.html
4) Astronomy 162: Stars, Galaxies, and Cosmology
   http://csep10.phys.utk.edu/astr162/lect/index.html
5) HyperPhysics
   http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html
6) Patterns in Nature
   http://acept.la.asu.edu/PiN/info/patt.html
7) Color Science
   http://www.cox-internet.com/ast305/color.html
8) Worldwide TV Standards - A Web Guide
   http://www.ee.surrey.ac.uk/Contrib/WorldTV/
9) Image Processing Fundamentals
   http://www.ph.tn.tudelft.nl/Courses/FIP/noframes/fip-Contents.html
10) Visual Quantum Mechanics
   http://phys.educ.ksu.edu/

■