

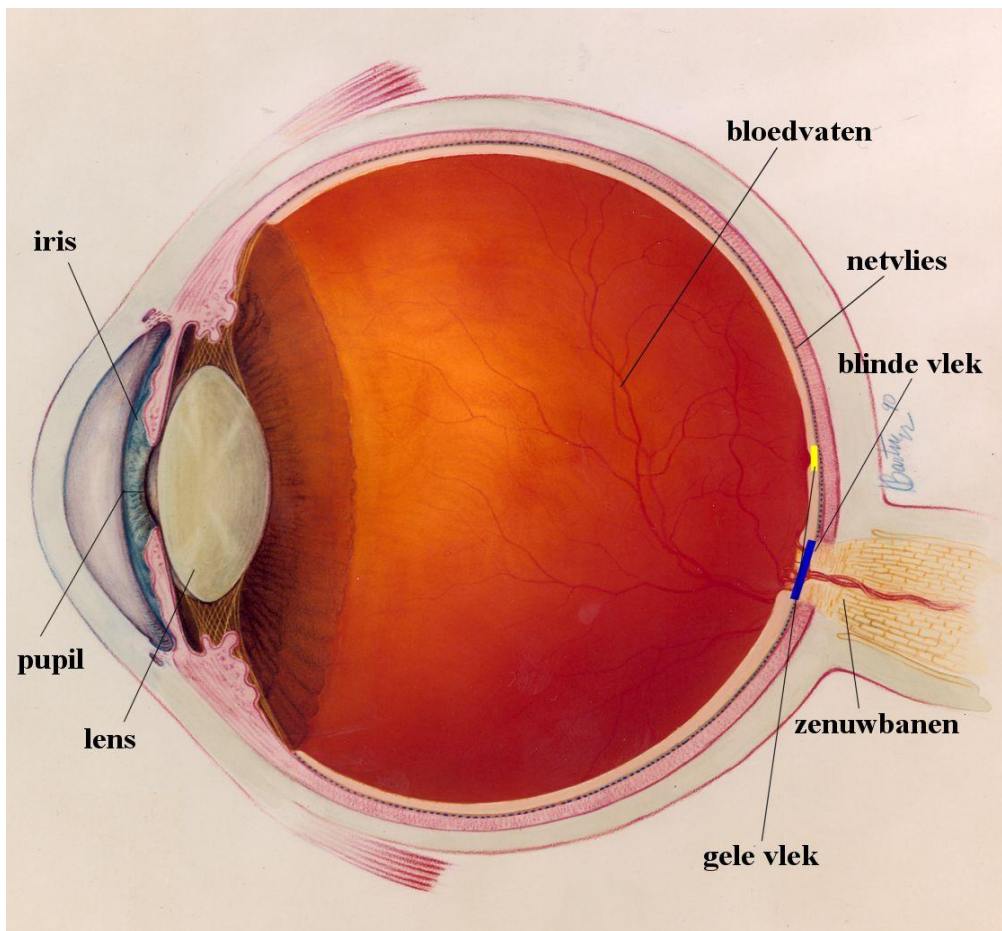
Het visueel waarnemen van deepskyobjecten IV: het oog en het brein.

(door Jan van Gastel)

De vorige artikelen over visueel waarnemen gingen over de invloed van de omstandigheden (met name de achtergrondhelderheid), kenmerken van de telescoop (grootte van het objectief, vergroting) en kenmerken van het waar te nemen object zelf (uitgebreid of 'puntbron' oppervlaktehelderheid, magnitude). Uiteindelijk komt bij het waarnemen alle informatie via ons oog in onze hersenen terecht, waar we ons bewust worden van hetgeen te zien is. Zoals hier en daar in vorige artikelen al terloops aan de orde kwam, is het belangrijk om zodanig van eigenschappen van oog en brein gebruik te maken, dat de kans op het waarnemen van een object of details in een object zo groot mogelijk is. Daarover gaat dit artikel.

1. Het oog

Licht komt via de cornea, de voorste oog kamer en de oogpupil ons oog binnen, gaat door de lens en valt dan door het vocht in de oogbol op de retina, het netvlies (figuur 1).

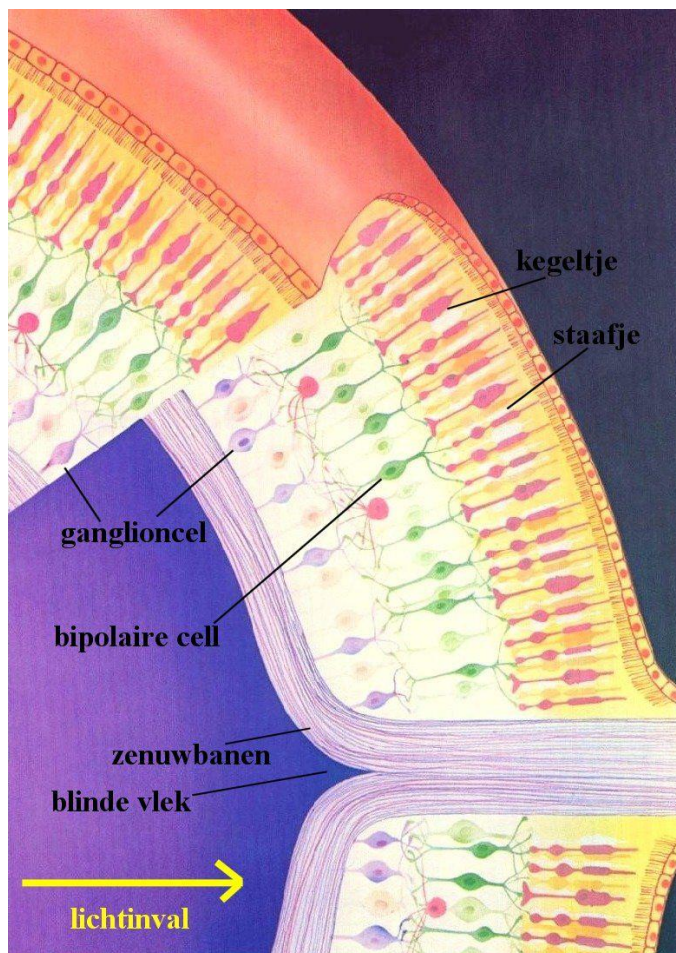


Figuur 1: Anatomie van het menselijk oog

In dat netvlies bevinden zich lichtgevoelige receptoren, naar hun vorm *kegeltjes* en *staafjes* genoemd. Deze kegeltjes en staafjes zijn via bipolaire en ganglioncellen¹ verbonden met

¹ Ganglioncellen zijn zenuwcellen

zenuwbanen (figuur 2), die de informatie doorgeven naar de hersenen, die voor ons de informatie begrijpelijk maken en ons aanzetten tot actie: het tekenen of beschrijven van het object waar we naar kijken, of doorgaan naar het volgende object.



Figuur 2; Doorsnede van het netvlies

Spiertjes in het ‘corpus ciliare’ zorgen er door het boller of minder bol maken van de lens voor, dat het beeld op het netvlies scherp wordt en de pupil en de kegeltjes en staafjes passen zich aan de hoeveelheid licht aan die het oog binnenkomt. We spreken daarbij van ‘*lichtaanpassing*’ als het oog zich aanpast aan meer licht dan waar het aan gewend was en van ‘*donkeraanpassing*’ als het oog zich aanpast aan minder licht. Tijdens een waarnemessie treden beide op. Naargelang het donkerder wordt, past het oog zich steeds meer aan het lagere lichtniveau aan. We hebben te maken met lichtaanpassing als we overdag van binnen naar buiten het zonlicht inlopen, als we met een aan het donker aangepast oog een lampje gebruiken om op zoekkaarten of naar een beeldscherm te kijken, of als we kijken in het licht van een naderende auto. Maar ook al als we achter het oculair vandaan komen nadat we daar een tijdje in gekeken hebben. Het komt er gewoonlijk op neer, dat het oog tijdens een waarnemessie steeds bezig is zich aan de actuele verlichtingssituatie aan te passen.

De oogpupil

Onze iris zorgt er door zich te vernauwen of verwijden² voor, dat onze oogpupil groter of kleiner wordt. Het bereik van de diameter van de oogpupil, ligt tussen de 2 (bij zonlicht overdag) en 7 millimeter (als het goed donker is). Bij ouderen wordt de pupil vaak niet groter

² Vernauwen door samentrekking van de ‘circulaire spier’, verwijden door samentrekking van de ‘radiale spier’.

dan 5 millimeter, bij kinderen zijn uitschieters naar wel 9 millimeter gemeten. Naargelang de pupil wijder wordt kan meer licht ons netvlies bereiken, waardoor we meer zien in het donker. Een pupil van 7 millimeter laat $(7/2)^2 = 12.25$ maal zoveel licht ons oog binnen als een van 2 millimeter. Dat is een verschil van $2.5 * \log(12.25) = 2.7$ magnituden³. Hoewel de eerste aanpassing erg snel gaat, kan het wel 30 minuten duren voordat onze oogpupil zich geheel aan het donker heeft aangepast (lit.22). Dit zal het geval zijn als we van fel licht naar heel donker gaan. Hoe kleiner het verschil in verlichting, hoe korter het duurt voordat de volledige aanpassing een feit is. Wat levert een grotere pupil ons op als we waarnemen? Tijdens waarnemen met het blote oog maximaal de winst van 2.7 magnituden die hierboven is berekend. Bij gebruik van een verrekijker of telescoop levert een grotere oogpupil alleen winst op als de uittreepupil van het instrument even groot is als de oogpupil. De vergroting waarbij dit het geval is, is tegelijk de laagst zinvolle vergroting. Bij lagere vergroting is de uittreepupil groter dan de diameter van de oogpupil en zal er licht verloren gaan omdat het niet in de oogpupil terechtkomt. Bij hogere vergroting en dus kleine uittreepupil, valt al het licht in de oogpupil en maakt het niet uit hoe groot die is. Voor waarnemen met een telescoop heeft een grote oogpupil dus alleen betekenis, als we waarnemen met zo laag mogelijke vergrotingen.

De kegeltjes en de staafjes

De belangrijkste 'orgaantjes'⁴ in ons oog voor aanpassing aan donker en licht zijn de kegeltjes en de staafjes in het netvlies. In één oog zitten ongeveer zes miljoen kegeltjes en honderdtwintig miljoen staafjes. Het aantal staafjes per mm² is echter nergens groter dan de grootste dichtheid van de kegeltjes. De kegeltjes werken vooral als er relatief veel licht is. Ze reageren, aldus Schaefer (lit.21) zolang de luminantie⁵ van een voorwerp of de hemel hoger is dan ongeveer 4.7 millicandela's per vierkante meter, hetgeen overeenkomt met ongeveer 19.2 magnituden per vierkante boogseconde (mag/bs²)⁶. Is er nog minder licht, dan nemen de staafjes het over⁷. De werking van de staafjes houdt pas op bij een lichtniveau van bijna 10⁻⁶ candela's per vierkante meter (cd/m²), ofwel zo'n 27 mag/bs². Is er nog minder licht, dan wordt dat niet meer geregistreerd. Iemand wiens ogen volledig aan het donker zijn aangepast is in staat is om slechts vijf tot tien⁸ fotonen te detecteren, zolang die binnen korte tijd binnen een gebied van zo'n 10.000 staafjes⁹ terechtkomen (lit. 4 en 5). De staafjes zijn dus *veel lichtgevoeliger* dan de kegeltjes, waardoor we er lichtzwakkere objecten mee kunnen waarnemen. Die grote gevoeligheid heeft te maken met het feit, dat er (1) zo'n 20-50 staafjes verbonden zijn met één bipolaire cel en (2) ongeveer 125 bipolaire cellen met één ganglioncel, dus met één zenuwbaan (lit. 19)¹⁰. Daardoor wordt het licht van een groot aantal

³ Dit is niet het verschil dat we gewoonlijk waarnemen als we 's nachts van een verlichte huiskamer naar buiten lopen. De oogpupil in een 'normaal' verlichte huiskamer is namelijk eerder rond de 3-5 mm (individuele verschillen daargelaten) dan rond de 2 mm in doorsnee.

⁴ Medisch gezien zijn het strikt genomen geen organen.

⁵ De luminantie geeft aan hoe helder een voorwerp of de hemel wordt waargenomen. De eenheid van luminantie is candela's per vierkante meter (cd/m²). Een computerbeeld scherm heeft een luminantie van ongeveer 150 – 300 cd/m². De volle maan heeft bij een hoogte van 60 graden een luminantie van ongeveer 4000 cd/m². De natuurlijke hemelhelderheid op een niet met lichtverontreinigde donkere locatie is ongeveer 0,25 mcd/m².

⁶ Omrekening (een goede benadering) van cd/m² naar mag/bs² kan met formule $M = -2.5 * \log(C) + 13.39$, waarin M het aantal mag/bs² is en C het aantal cd/m². Het omgekeerde, berekening van C uit M gaat met formule $C = 10^{-0.4(M-13.39)}$.

⁷ Er is ook een overgangsgebied, waarin zowel kegeltjes als staafjes actief zijn, het gebied van 'mesopic vision' (figuur 6).

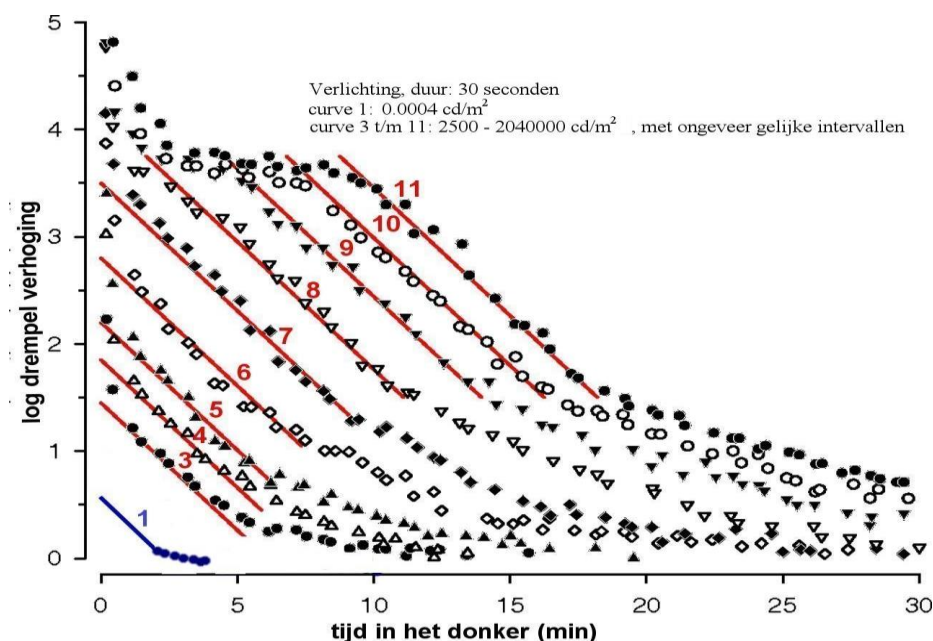
⁸ Er zijn zelfs experimenten waarin de reactie op slechts één enkel foton is geregistreerd.

⁹ Hetgeen overeenkomt met een gebied van ongeveer een graad.

¹⁰ De uitlopers van alle ganglioncellen samen vormen een bundel van ongeveer een miljoen zenuwen, die vanuit het oog naar de hersenen gaan

staafjes ‘gebundeld’. Dit is er tegelijk de oorzaak van dat waarnemen met de staafjes een *lage resolutie* oplevert. De kegeltjes zijn voor een groot deel, met name in de fovea -de meest gevoelige plaats van het netvlies- slechts één op één verbonden met een ganglioncel. Voordeel van de kegeltjes daardoor ten opzichte van de staafjes, is de veel *grotere resolutie*. Een ander oorzaak van een grotere resolutie van de fovea, de meest gevoelige plek van het netvlies, is het feit dat het bovenste zenuwlaagje veel dunner is in dit gebied dan de regio’s waar de staafjes aanwezig zijn. Hierdoor worden de kegeltjes als het ware direct geprikkeld en moeten de fotonen niet eerst door een kluwen van zenuwbundels. Daarbij zijn de kegeltjes, in tegenstelling tot de staafjes *gevoelig voor kleur*. Dit komt omdat er drie ‘typen’ kegeltjes bestaan die elk een eigen type fotopigment bevatten en daarom qua gevoeligheid een piek hebben voor een ander deel van het optisch spectrum: rood (564 nm¹¹), groen (533 nm) en blauw (437 nm). Met de staafjes zien we alleen grijstinten.

De donkeraanpassing van de kegeltjes gaat vrij snel en is na een minuut of acht voltooid. De aanpassing van de staafjes gaat in eerste instantie ook redelijk vlot, maar volledige aanpassing aan het donker duurt veel langer dan bij de kegeltjes. In de donkeraanpassing van de staafjes, zijn twee fasen te herkennen: een relatief snelle fase, waarin de gevoeligheid toeneemt met 0.24 logaritmische eenheden per minuut en een fase waarin de toename van de gevoeligheid toeneemt met 0.06 logaritmische eenheden per minuut¹² en tenslotte op hetzelfde niveau blijft. De snelle fase noemt men wel de S2-curve, de langzame fase de S3-curve (lit. 2, 5, 31). Deze twee fasen zijn niet alleen aanwezig als het gaat om aanpassing vanuit daglicht naar geheel donker, maar ook bij her-aanpassing aan het donker, nadat met aan het donker aangepaste ogen in het licht is gekeken. In figuur 3 (curve 3 t/m 11) zien we de beide curven geïllustreerd voor luminanties van 2500 tot 2040000 cd/m². De doorgetrokken¹³ lijnen markeren de S2-curve. Beide fasen duren, zo blijkt uit figuur 3, korter naarmate men aan minder licht is blootgesteld.



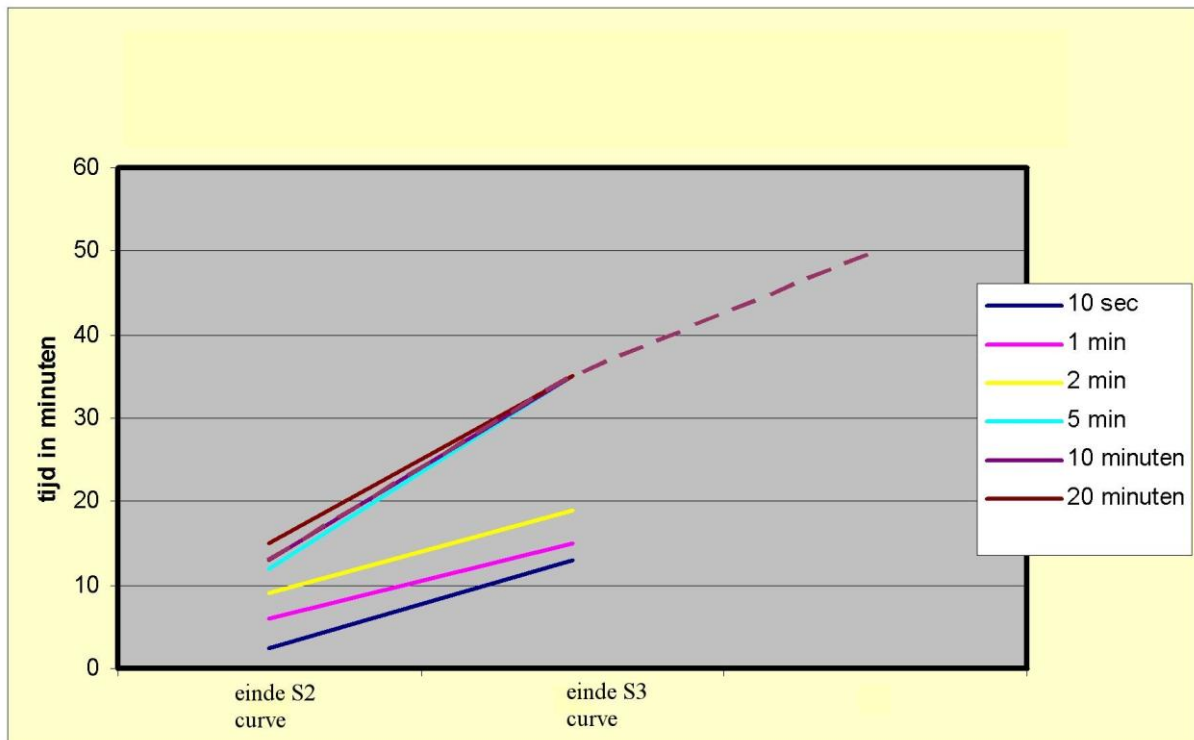
Figuur 3: Verhoging van de drempelwaarde en daarop volgende her-aanpassing aan het donker, na blootstelling aan licht van verschillende intensiteit na initiële donkeraanpassing.

¹¹ Nanometer.

¹² Ofwel $2.51 \cdot 0.24 = 0.6$ magnituden per minuut voor de S2 en $2.51 \cdot 0.06 = 0.15$ magnituden per minuut gemiddeld. Tijdconstanten zijn respectievelijk 1.8 en 7.2 minuten.

¹³ De blauwe curven in figuur 3 en 7 zijn door de auteur toegevoegd.

In figuur 4 zien we dat beide fasen ook korter duren naargelang we korter aan een *bepaalde hoeveelheid* licht zijn blootgesteld. De bovenste curven in figuur 4 laten zien, dat vooral aanpassing volgens de trage S3-curve erg lang duurt, als we 5 minuten of langer in een verlichte omgeving¹⁴ verkeren.



Figuur 4: Duur van de her-aanpassing aan het donker volgens de S2- en S3-curve, na een wisselende duur van blootstelling aan licht van 1100 candela's per vierkante meter

Als we aangepast aan daglicht in het donker komen, is de donkeraanpassing na ongeveer 40 minuten zo goed als volledig, maar het kan wel een uur of twee duren voordat de maximale aanpassing geheel is bereikt. In figuur 4 lopen daarom de bovenste curven verder door¹⁵. Als men de hele dag met onbeschermden ogen in zonlicht heeft rondgelopen, kan dat zelfs nog veel langer duren dan enkele uren. Wil men 's nachts op de grens van het mogelijke waarnemen, kan men daarom overdag het best binnen blijven of een zonnebril dragen.

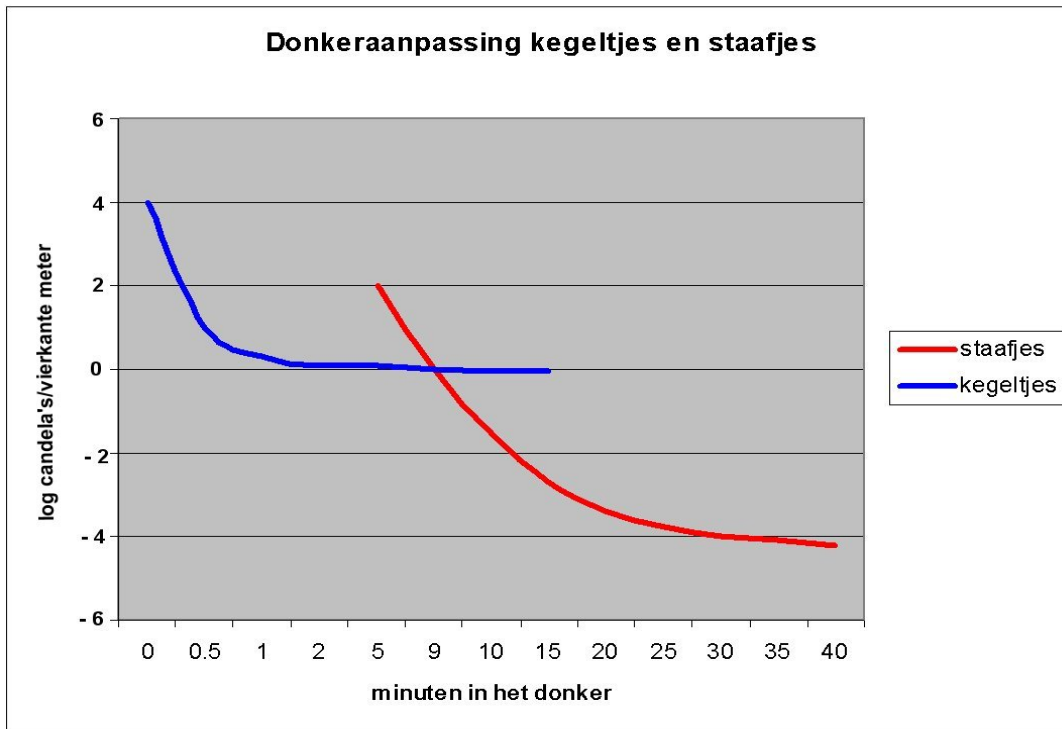
In figuur 5 is de aanpassing van de kegeltjes en staafjes uitgezet tegen de tijd. De blauwe curve geeft de aanpassing van de kegeltje weer, die rode die van de staafjes. In deze grafiek zien we (van boven naar onderen van links naar rechts in de grafiek) dat eerst de aanpassing van de kegeltjes wordt weergegeven en dat vanaf een drempelwaarde van ongeveer $\log -2$ cd/m^2 ($0,01 \text{ cd/m}^2$) alleen nog aanpassing van de staafjes plaatsvindt¹⁶. Deze overgang van kegeltjes naar staafjes wordt wel de *Purkinjeshif* genoemd. Dat is het verschijnsel, dat de gevoeligheid van ons oog op dat moment verschuift naar de blauwe kant van het spectrum. Rode sterren lijken dan opeens minder helder en blauwe juist helderder. Ook tijdens de

¹⁴ De 1100 cd/m^2 in figuur 4 is vergelijkbaar met de hoeveelheid licht op een bewolkte dag.

¹⁵ Uit de gegevens waarop de figuur is gebaseerd werd niet duidelijk wanneer de aanpassing volgens de S3-curve na blootstelling van 10 en 20 minuten aan de in de figuur vermelde verlichting, voltooid was. Het einde van deze curven (onderbroken lijn) is dus arbitrair.

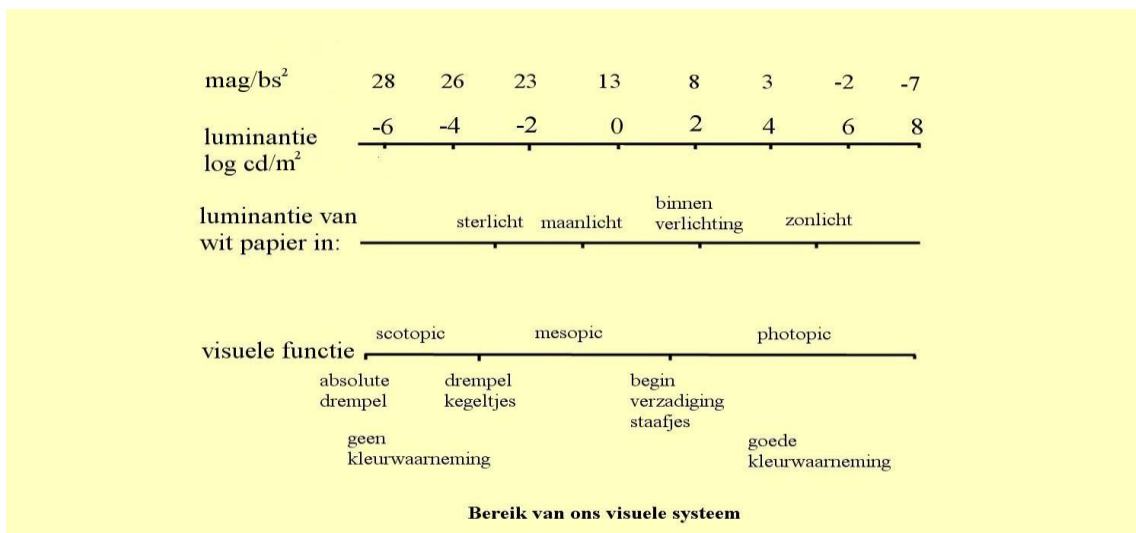
¹⁶ De staafjes beginnen al eerder met zich aan te passen, zie verderop in de tekst.

aanpassingsfase van de kegeltjes vindt al aanpassing van de staafjes plaats, maar omdat de aanpassing van de kegeltjes domineert wordt dat in de experimenten waar de figuren 3 t/m 5



Figuur 5: Donkeraanpassing van de kegeltjes en de staafjes

en 7 op gebaseerd zijn niet zichtbaar¹⁷. Het volledige dynamische licht bereik van ons oog is fenomenaal van ongeveer 10^{+6} cd/m² (bovenste bereik kegeltjes) tot 10^{-6} cd/m² (onderste grens staafjes). Een overzicht van het bereik van ons oog en daarbinnen van de kegeltjes en de staafjes, wordt gegeven in figuur 6.



Figuur 6: Dynamisch bereik van ons visuele systeem

¹⁷ Er zijn ook experimentele settings waarin dat wel mogelijk is.

De invloed van licht op de aanpassing

Omdat we, bij het waarnemen van zwakke objecten voornamelijk gebruik maken van de staafjes, zullen we deze orgaantjes aan een nader onderzoek onderwerpen en, zonder op details in te gaan¹⁸, beschrijven hoe de aanpassing van de staafjes aan het donker in zijn werk gaat. We nemen daarbij figuur 1 als uitgangspunt. Het licht komt het oog binnen door de pupil, passeert de lens en valt dan (we gaan verder met figuur 2) *door* het 0.4 millimeter dunne netvlies (zie gele pijl in figuur 2) op de staafjes en kegeltjes. De *zenuwbanen* bevinden zich, zoals in figuur 2 te zien is, dus aan de kant van de lens, de lichtgevoelige kant van de staafjes en kegeltjes ligt daar achter. In het gedeelte van de staafjes aan de rechterkant¹⁹ van figuur 2, worden de fotonen (lichtdeeltjes) geabsorbeerd door de stof *rhodopsine*²⁰. Hierdoor worden een aantal biochemische en elektrische processen op gang gebracht, die via de bipolaire en ganglioncellen en de uitlopers daarvan, de zenuwbanen, worden doorgegeven aan de hersenen. Daar worden (in de visuele cortex) onbewuste en bewuste processen op gang gebracht, die uiteindelijk resulteren in een bewuste waarneming. Onder invloed van licht wordt rhodopsine afgebroken. Hoe minder rhodopsine, hoe minder goed de aanpassing aan het donker. Onder donkere omstandigheden wordt juist rhodopsine opgebouwd, een proces waarin vitamine A van cruciaal belang is. Gebrek aan vitamine A veroorzaakt een grote mate van *vertraging* van de aanpassing aan het donker²¹. Lamb en Pugh (lit. 31) bespreken een patiënt met vitamine A deficiëntie, waarbij de snelheid van aanpassing volgens de S2-curve geen 0.6 maar slechts 0.13 magnituden per minuut bereikte. De aanpassing bij zo'n 'milde' vorm van vitamine A deficiëntie herstelt zich overigens snel. Al een dag na toediening van vitamine A, is een grote mate van herstel waar te nemen.

Hoe meer rhodopsine is opgebouwd, hoe groter de gevoeligheid van de staafjes en hoe beter we kunnen zien in het donker. De opbouw van rhodopsine gaat vrij langzaam, waardoor, zoals hierboven al beschreven, ook de aanpassing aan het donker relatief traag verloopt. Het is daarom jammer om de langzaam opgebouwde aanpassing steeds weer om zeep te helpen door in het licht te kijken en de rhodopsine weer te ontleden (zie kaderstuk voor het mechanisme achter her-aanpassing aan het donker). Hoe lang het na blootstelling aan licht duurt om de aanpassing te herstellen, is afhankelijk van de *hoeveelheid* licht (intensiteit) waaraan we waren blootgesteld en van de *duur* van de blootstelling. In figuur 3, 4 en 7²² is het effect van beide te zien. In figuur 4 zien we het effect van korte (10 seconden) tot lange (20 minuten) blootstelling aan licht met een intensiteit van ongeveer 1100 cd/m² (ongeveer 5.8 mag/bs²), gelijk aan de lichtintensiteit buiten, op een bewolkte dag. Duidelijk is, dat hoe langer we aan deze verlichting zijn blootgesteld, hoe langer het duurt voor de aanpassing hersteld is. Zelfs bij een blootstelling van slechts 10 seconden aan deze hoeveelheid licht, duurt het al 12 minuten voor de aanpassing weer volledig is na blootstelling aan deze hoeveelheid licht. In figuur 7 zien we in curve 2-6 het effect van de hoeveelheid licht, variërend van binnenverlichting (~9 cd/m²) tot zonlicht (~125.000 cd/m²), waaraan het oog was aangepast alvorens de proefpersonen in het pikkedonker werd geplaatst. De aanpassingstijd duurt, zo leert deze figuur, langer naarmate men aan een lichtere omgeving was aangepast. Zelfs na aanpassing aan ~9 cd/m², omgerekend ongeveer 11 mag/bs², (curve 2), duurt het nog zo'n 20 minuten alvorens de donkeraanpassing voltooid is.

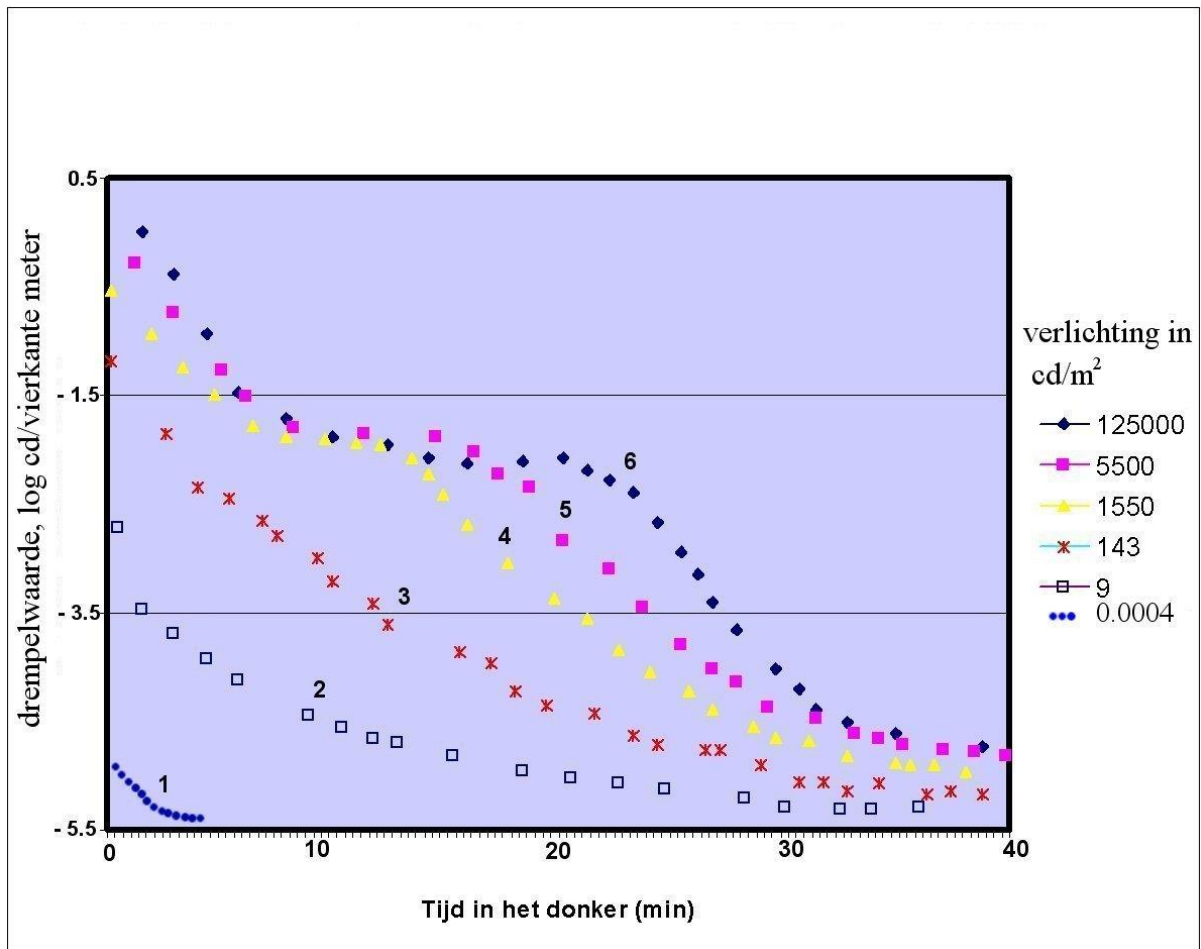
¹⁸ Zie hiervoor met name lit. 1, 2, 5, 17 en 31.

¹⁹ Het licht gaat dus eerst door de bovenste lagen van het netvlies heen, alvorens de lichtgevoelige orgaantjes te bereiken.

²⁰ Ook wel 'visual purple' genoemd.

²¹ Dit geldt voor niet al te ernstige deficiënties. Is het vitamine A gebrek zeer ernstig en langdurig, dan heeft dit ook effect op de maximaal bereikbare aanpassing.

²² Figuur 4 is gemaakt op basis van gegevens in Wald & Clark (lit. 27) en figuur 7 op basis van gegevens in Hecht, Haig & Chase (lit. 23).



Figuur 7: Duur van de donkeraanpassing na initiële aanpassing aan licht van verschillende intensiteit.

Van belang bij het gebruik maken van licht, zo kunnen we uit het bovenstaande leren, is er rekening mee te houden, dat de *lichtaanpassing* veel sneller gaat dan de *donkeraanpassing*. Eén of enkele minuten comfortabele verlichting, bij zeer fel licht slechts enkele seconden, even naar een verlichte ruimte gaan, achter de laptop zitten, heeft een veel langere tijd dan dat voor donkeraanpassing ten gevolge.

We grijpen nu even terug op een vorig artikel over visueel waarnemen, om na te gaan wat het bovenstaande voor het waarnemen van zwakke deepsyobjecten betekent. Het zal duidelijk zijn, dat onder de sterrenhemel, zeker onder lichtvervuilde omstandigheden, zoals op veel plaatsten in Nederland en België, met achtergrondhelderheden van 19 mag/bs^2 (0.005 cd/m^2) en helderder, de staafjes zich gezien hun bereik – zij passen zich vanaf ongeveer 13 mag/bs^2 (1 cd/m^2) tot ruim 27 mag/bs^2 (0.0000001 cd/m^2) – zelfs na een uur of meer de grens van hun aanpassing nog niet hebben bereikt. Bevinden we ons onder een goed donkere hemel, met een achtergrondhelderheid van 22 mag/bs^2 (0.0003 cd/m^2) dan zal de aanpassing een stuk verder gevorderd, maar nog steeds niet volledig zijn. De aanpassing zal verder toenemen als we in het beeldveld van het oculair kijken en wel meer naargelang we waarnemen met hogere vergroting, dus kleinere uitreepupil en daarmee donkerder beeldveld. Bij een uitreepupil van 0.5 millimeter, die we krijgen bij de maximaal bruikbare vergroting van 2x per millimeter objectiefdiameter, neemt de donkerte van de achtergrond toe van 22 naar ruim 27 mag/bs^2 . Omdat we de absolute donkerte naderen als we van 22 naar 27 mag/bs^2 gaan, is de winst in

grensmagnitude niet zo groot: slechts 1.3 magnituden²³. Zou de gehele aanpassing volgens de relatief snelle S2-curve verlopen, zou deze $1.3/0.6 = 2.2$ minuten duren. Gezien het feit dat het aandeel van de S3-curve heel klein is als we zo weinig hoeven aan te passen, zal het overgrote deel van de aanpassingstijd inderdaad volgens de S2-curve verlopen en zullen we in de praktijk uitkomen *tussen de 2.5 en 4 minuten*, mede afhankelijk van onze leeftijd. De korte, langzame fase kan nog één of maximaal enkele tienden van een magnitude extra opleveren, wat net voldoende kan zijn om een zeer lichtzwak object net nog waar te nemen. Ook bij een veel vaker gebruikte uittreepupil van één tot anderhalve millimeter, kom je aardig bij de maximale aanpassing in de buurt en zal de aanpassing achter het oculair slechts weinig korter duren dan hierboven besproken. Even, 10-15 seconden, opkijken van achter het oculair zal de aanpassing aan het donker, aangenomen dat er geen strooilicht is, niet ernstig verstoren (zie ook het experiment in de paragraaf over 'rood licht') en de her-aanpassing aan donkerte in het oculair zal in dat geval maximaal 10-15 seconden in beslag nemen. Komen we echter voor langere tijd achter het oculair vandaan om met het blote oog de sterrenhemel te bekijken, dan zal de her-aanpassing weer de volle 2.5-4 minuten in beslag nemen. De duur van de aanpassing aan de donkerte in het oculair in een lichtvervuilde situatie zal significant afwijken van de hierboven genoemde 2.5-4 minuten (bij een uittreepupil van 0.5 mm), omdat tussen 'blote oog' en 'in het oculair' de verschillen in grensmagnitude (beduidend) groter zijn dan die onder een echt donkere hemel. Een blote oog grensmagnitude bijvoorbeeld van 5.4 wordt 8.05 bij een uittreepupil van 0.5 mm, een verschil van 2.65 magnituden: tweemaal zo veel als de hierboven vermelde 1.3 onder een donkere hemel. De aanpassing achter het oculair zal dan ook ongeveer 2 maal zolang duren, dus 5-8 minuten. Op dezelfde manier heeft ook korter of langer opkijken van achter het oculair een langere her-aanpassing ten gevolge onder een lichtvervuilde hemel dan onder een donkere.

Gezien de lichtgevoeligheid van de staafjes en de snelheid van lichtaanpassing in vergelijking tot donkeraanpassing is het dus ook niet handig om tussen het waarnemen van diepskyobjecten door de telescoop even op de maan²⁴ of op een planeet te richten. Mars bijvoorbeeld, heeft een oppervlaktehelderheid van ongeveer 4 tot 10 mag/bs², afhankelijk van de precieze magnitude en schijnbare grootte op het moment van waarneming en van de gebruikte vergroting. Zeer helder dus in vergelijking met zwakke diepskyobjecten, die een oppervlaktehelderheid hebben van 20 mag/bs² of nog (veel) zwakker. De oppervlaktehelderheid van maan en planeten is zo groot in verhouding tot de achtergrond waartegen we zwakke diepskyobjecten waarnemen, dat bij het waarnemen van deze heldere hemellichamen de donkeraanpassing grotendeels verloren gaat. Bij het waarnemen van maan en planeten gebruiken we de kegeltjes, waardoor we ook kleur kunnen onderscheiden en kunnen profiteren van de grotere resolutie die deze orgaantjes bieden, waardoor we, mede gesteund door de veel grotere hoeveelheid licht, veel kleinere details kunnen waarnemen.

Als je wilt dat je oog steeds zo goed mogelijk aan het donker *blijft* aangepast, kijk dan vooral bij waarnemen met hoge vergroting niet, zo kunnen we eveneens uit het bovenstaande leren, met je 'waarneemoog' naar een lichtere plek dan in het oculair. Dat kan door te zorgen dat er *geen strooilicht* naast het oculair je oog kan bereiken (zwarte doek over je hoofd) en door je

²³ Van magnitude 7 naar magnitude 8.3. Zie voor uitleg eventueel het artikel over Visueel waarnemen in Heelal van mei 2007.

²⁴ In tegenstelling tot wat men wel leest, is met een telescoop naar de maan kijken, zelfs met een telescoop met grote objectiefdiameter, niet gevaarlijk. De oppervlaktehelderheid van de maan, die vanwege de relatief grote oppervlakte weinig verschilt van die van Mars, is daarvoor te laag. Het feit dat kijken naar de maan 'pijnlijk' kan zijn, heeft te maken met de donkeraanpassing en is vergelijkbaar met het binnenlopen van een verlichte kamer met aan het donker aangepaste ogen.

waarneemoog af te dekken zo gauw je wegstijgt van het oculair, terwijl je je andere oog gebruikt om op een zoekkaart te kijken, je te oriënteren op de sterrenhemel, om een ander oculair te pakken, of om een nieuw object op je laptop aan te klikken. Je maakt dan gebruik van het feit dat je ogen zich onafhankelijk van elkaar aanpassen aan de donkerte. Het belang van het tegengaan van strooilicht moet, zeker in deze tijd van lichthinder²⁵, niet onderschat worden. Strooilicht is rechtsreeks licht en veel fnuikender voor de donkeraanpassing dan met het blote oog naar de sterrenhemel kijken, zelfs onder lichtvervulde omstandigheden.

Rood licht?

Hoe lang her-aanpassing duurt als we, na volledige aanpassing aan het donker, van verlichting gebruik maken, hangt dus af van de duur en de intensiteit van de verlichting. Gebruiken we minimale verlichting waarbij we maar net kunnen lezen of ons maar net kunnen oriënteren op een zoekkaart en doen we dat kort, bijvoorbeeld niet langer dan een seconde of vijftien, dan duurt de her-aanpassing slechts een minuut of nog minder²⁶. Daarbij maakt het uit van welke kleur licht we gebruik maken. Theoretisch is rood licht minder erg dan wit, geel of groen licht, omdat de staafjes veel minder gevoelig zijn voor rood licht dan voor licht van de andere genoemde golflengten, maar we moeten wel voor het juiste rode licht kiezen: dieprood licht met een golflengte van rond de 700 nanometer²⁷, in elk niet minder rood dan 600 nanometer. Het best zouden leds voldoen met licht van bovengenoemde dieproode golflengte, waarbij er voor gewaakt moet worden, dat het echt monochromatisch licht is en er geen wit licht in zit. In lit. 28 wordt een lichtsterkte aanbevolen van 0.35-3.5 cd/m², ofwel tussen de ongeveer 12 en 14.5²⁸ mag/bs². Er zijn ook waarnemers die het gebruik van zwak wit of geelgroen licht adviseren. Doug Kniffen (lit. 24) is een van de pleitbezorgers van deze opvatting. De redenering achter dit standpunt is, dat de kegeltjes juist heel gevoelig voor groen licht zijn in vergelijking tot voor rood licht, waardoor je met veel zwakker licht toe kunt. Experimenten van waarnemers wijzen echter uit, dat het weliswaar gemakkelijker is om zoekkaarten te lezen met geelgroen of wit licht dan met rood licht, maar dat de donkeraanpassing minder achteruit gaat door rood licht. Gordon Bond (lit. 25), houdt daarom juist een pleidooi voor rood licht. Hij haalt een experiment van de Zweedse waarnemer Nils Olof Carlin aan, dat deze opvatting ondersteunt. Beroeps- en amateurastronoom Brian Skiff komt op grond van literatuurstudie (lit. 26)²⁹ ook tot de conclusie dat rood licht de donkeraanpassing het minst aantast. Heel vaak wordt voor het bekijken van zoekkaarten verlichting gebruikt, van welke kleur ook, die veel te fel is om de ogen redelijk aangepast te houden. Brian Skiff zegt hierover (vertaling JvG): “De ‘bottom line’ van wat de literatuur ons leert is: rood licht is het beste, maar als je kunt zien dat het rood is op het papier waar je naar kijkt, is het te fel.”

Uit mijn eigen experimenten met rood licht bleek, dat ik na 15 seconden letters van een gangbaar formaat³⁰ te hebben gelezen, bij een zodanige lichtsterkte dat ik de tekst met enige moeite kon lezen, gemiddeld 24 seconden nodig had om een object op de grens van het waarneembare weer voor het eerst te zien opdoemen. Na ongeveer 30 seconden was de

²⁵ Onder lichthinder verstaan we het licht van woningen, straatverlichting, openbare gebouwen e.d., dat rechtstreeks in ons oog schijnt, onder lichtvervuiling de grotere achtergrondhelderheid in vergelijking tot een absoluut donkere sterrenhemel (bron: lezing Henk Spoelstra, deepskydag 1 december 2007, Nijmegen).

²⁶ Persoonlijke communicatie (e-mail) van prof. T.D. Lamb aan Nils Olof Carlin.

²⁷ Zie lit. 28. De auteur voert een pleidooi voor dieprood licht, maar noemt uiteindelijk in zijn conclusie ook wit licht, wat mij gegeven andere bronnen onjuist voorkomt.

²⁸ Een eenvoudig experiment leerde mij, dat ik bij deze verlichting nog goed kon lezen. Bij 15.8 mag/bs² was het moeilijk. Bij 16.1 mag/bs² lukte het met zeer veel moeite en daarboven was het lezen van teksten met gebruikelijke lettergrootte voor mij niet meer mogelijk (alle metingen met de SQM en bij wit licht).

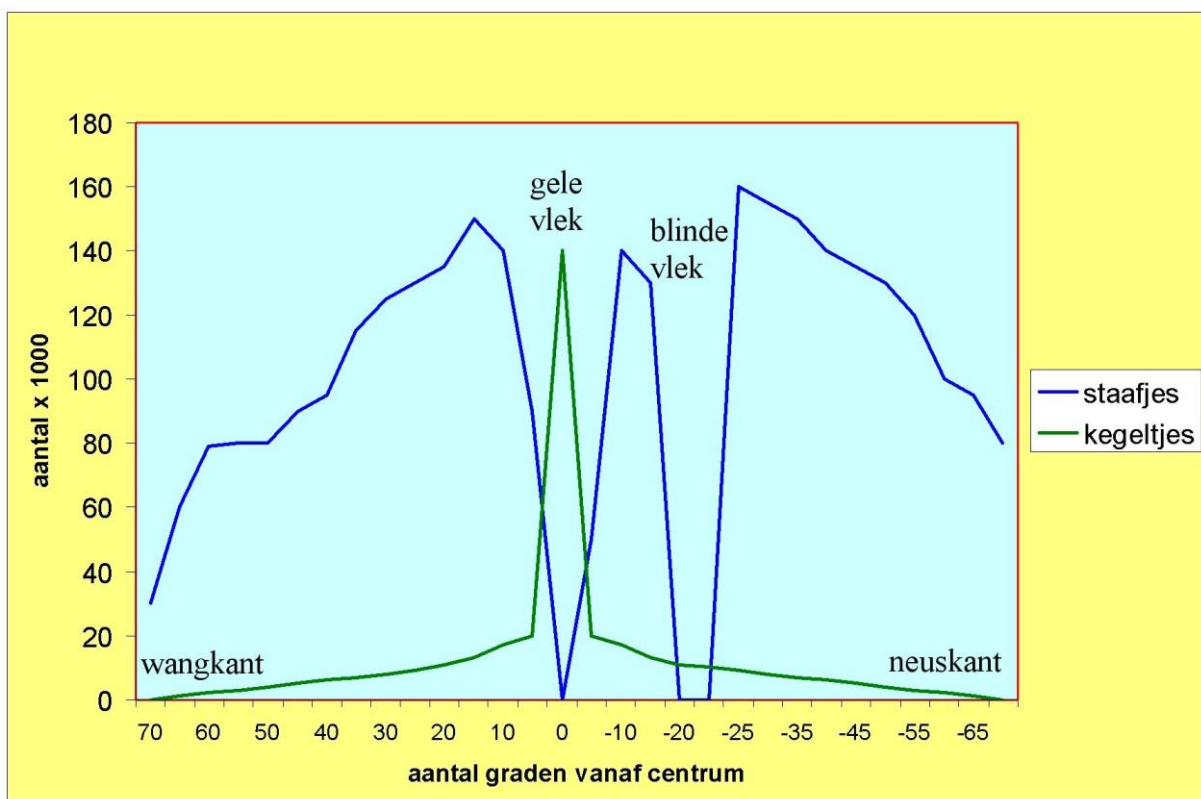
²⁹ In dit artikel wordt ook de door Skiff geraadpleegde literatuur vermeld.

³⁰ 12 punts ‘Times New Roman’.

aanpassing weer vergelijkbaar met die voordat ik het lampje aan deed. In een ander door mij uitgevoerd experiment, waaraan twee personen deelnamen, bleek herstel van de donkeraanpassing na gebruik van wit licht gemiddeld ongeveer twee maal zolang te duren als na gebruik van rood licht³¹. Conclusie: gebruik zo zwak mogelijk rood licht en gebruik dat zo kort mogelijk. Bereid je waarnemingen goed voor, zodat je weinig tijd met verlichting hoeft door te brengen en je ogen zoveel mogelijk aangepast kunt houden. En refererend aan eerdere opmerkingen over de lage resolutie³² van ons oog bij zwak licht: kleine lettertjes vragen om veel licht. Het is daarom handig om, als je iets moet lezen in het donker, *grote* letters en andere symbolen te gebruiken. Dan kunt je toe met zwakker licht.

Perifeer waarnemen

De staafjes en de kegeltjes zijn niet gelijkelijk en beide op dezelfde manier verdeeld over het netvlies. De kegeltjes bevinden zich voornamelijk in het centrum van het netvlies, op de 'fovea' of 'gele vlek', de staafjes verder van het centrum vandaan. Figuur 8 illustreert dit.



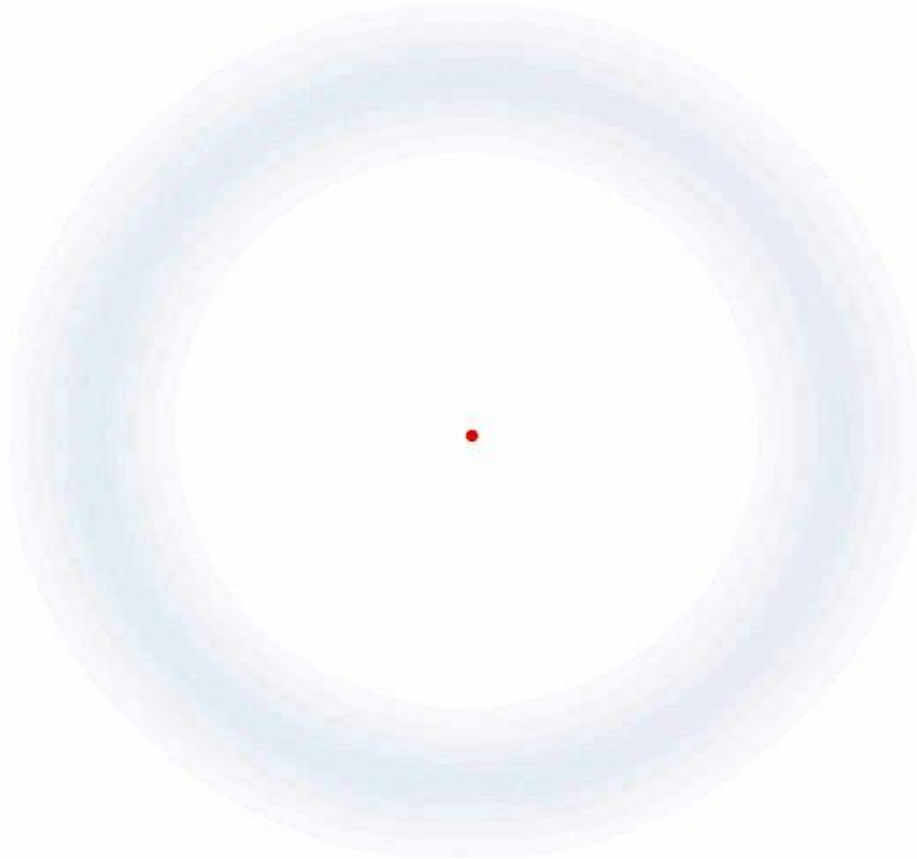
Figuur 8: Dichtheid en verdeling van de kegeltjes en de staafjes in het netvlies van het menselijk oog

De hoogste concentratie staafjes bevindt zich op ongeveer 20 graden aan weerszijden van het centrum van het oog, waarbij de concentratie aan de neuskant (rechts in figuur 8) iets hoger is dan aan de andere kant van het centrum. Vlak daarbij bevindt zich echter ook de 'blinde vlek'. Dat is de plaats waar bloedvaten en de bundel oogzenuwen het oog in- en uitgaat en waar zich geen kegeltjes of staafjes bevinden. Fotonen die daar opvallen worden dus niet geregistreerd. Omdat in het donker juist de staafjes actief zijn en niet de kegeltjes, zien we lichtzwakke

³¹ Beide lichtkleuren van een zodanige intensiteit, dat lezen van tekst met gangbare lettergrootte met weinig moeite mogelijk was.

³² De lage resolutie bij waarnemen onder donkere omstandigheden is, zoals we in het artikel over "De zichtbaarheid van uitgebreide diepskyobjecten" (Heelal, januari 2008) hebben gezien, ook de reden dat we om kleine objecten zichtbaar te maken, sterk moeten vergroten.

objecten in het oculair beter als we het beeld laten vallen op de plaats waar de meeste staafjes zitten. We moeten er dus naar ons gevoel iets naast kijken om het object te kunnen waarnemen. Dit heet ‘perifeer waarnemen’. Daarbij moeten we echter ook nog rekening houden met andere eigenschappen van het oog, waarvan we hierboven al de blinde vlek noemden. Een ander verschijnsel waar we ons bewust van moeten zijn is het *Troxler effect*. Dit is het verschijnsel, dat een beeld in de periferie van ons oog verdwijnt als we ons oog stil houden om een object te fixeren (lit. 29 en 30). Dit zien we geïllustreerd in figuur 9.



Figuur 9: Het Troxler effect

Als we de stip in het centrum fixeren, zien we al na vrij korte tijd de vage rand eromheen verdwijnen. Fixeren we dus tijdens het waarnemen, dan is de kans groot dat we een object dat zich in de periferie bevindt niet zien. De onwillekeurige, (zeer) kleine oogbewegingen die we maken voorkomen dit verschijnsel niet geheel. We zullen er dus bewust rekening mee moeten houden door bij perifeer waarnemen enigszins ‘*rond te kijken*’ in het beeld. De kans is dan ook groter dat het van het object afkomstige licht op een gegeven moment juist die plaats op het netvlies treft, waar de concentratie van de staafjes het hoogst is.

Een positief effect van perifeer waarnemen is, naast de grotere gevoeligheid van de staafjes in verhouding tot de kegeltjes, dat we op die manier kijkend gemakkelijk *beweging* opmerken. Vooral het gebied in de periferie van ons oog, waar de staafjes in verhouding tot die meer naar het centrum toe vrij ver uit elkaar staan, is daarvoor gevoelig. Die eigenschap kunnen we gebruiken naar het zoeken van objecten die qua helderheid de grens van het waarneembare

benaderen. Door even de telescoop te bewegen, zie je een object soms wel, dat je daarvoor niet zag.

Het effect van leeftijd

Naargelang we ouder worden vinden er veranderingen in het oog plaats die de aanpassing aan het donker negatief beïnvloeden. De maximale diameter van de oogpupil neemt af (lit 6 en 7). Daardoor komt er minder licht het oog binnen, wat van invloed is op waarnemen met het blote oog en op de grootte van de uittreepupil waarmee zinvol met een telescoop of verrekijker kan worden waargenomen³³. Andere veranderingen beïnvloeden ook de donkeradaptatie bij een oogpupil die gelijk aan of kleiner is dan de uittreepupil. De ooglenzen en het vocht in de oogbol worden wat minder doorzichtig, waardoor minder licht het netvlies en de daarin liggende kegeltjes en staafjes bereikt. Naargelang men ouder wordt gaat de opbouw van rhodopsine langzamer en neemt volgens sommige onderzoekers de hoeveelheid rhodopsine af (lit. 9 en 10). Dat laatste wordt echter niet in alle onderzoeken bevestigd (lit. 11 en 12). Schwartz (lit. 12) concludeert zelfs, dat staafjes die intact zijn, bij hogere leeftijd niet aan gevoeligheid inboeten, maar dat er juist staafjes verloren gaan waardoor de donkeraanpassing minder wordt. Aggarwal, Nag en Wadhwa (2007; lit. 18) vonden, dat het aantal bipolaire cellen (zie figuur 2) in het netvlies met 21% vermindert bij mensen tussen de 35 en 62 jaar en met 27% bij personen tussen de 70 en 100 jaar. Resultaat van al deze veranderingen tezamen is, dat naargelang men ouder wordt:

1. De aanpassing aan het donker langzamer verloopt. Het kan wel tien minuten of langer duren voordat de ogen van iemand van 60-80 jaar zich aan een bepaalde donkerte hebben aangepast dan de ogen van jonge mensen.
2. De maximale aanpassing minder wordt. Ouderen, tussen de 70 en 80 jaar, kunnen wel tot maximaal 1-1.5 logaritmische eenheden verliezen aan drempelwaarde (lit. 12)³⁴.

Andere voor het visueel waarnemen belangrijke veranderingen bij toenemende leeftijd zijn, het achteruitgaan van de *contrastwaarneming*, met name waar het om zwakke contrasten gaat en de toename van de *hersteltijd na blootstelling aan strooilicht* (lit. 8). Bij alle bovenbeschreven veranderingen doen zich echter (vaak forse) individuele verschillen voor, mede omdat verouderingsprocessen niet bij iedereen hetzelfde verlopen. Tenslotte zijn er, vaak leeftijdgerelateerde oogziekten die de donkeraanpassing (vaak drastisch) kunnen vertragen en/of verminderen (zie lit. 2 en 31 voor een overzicht).

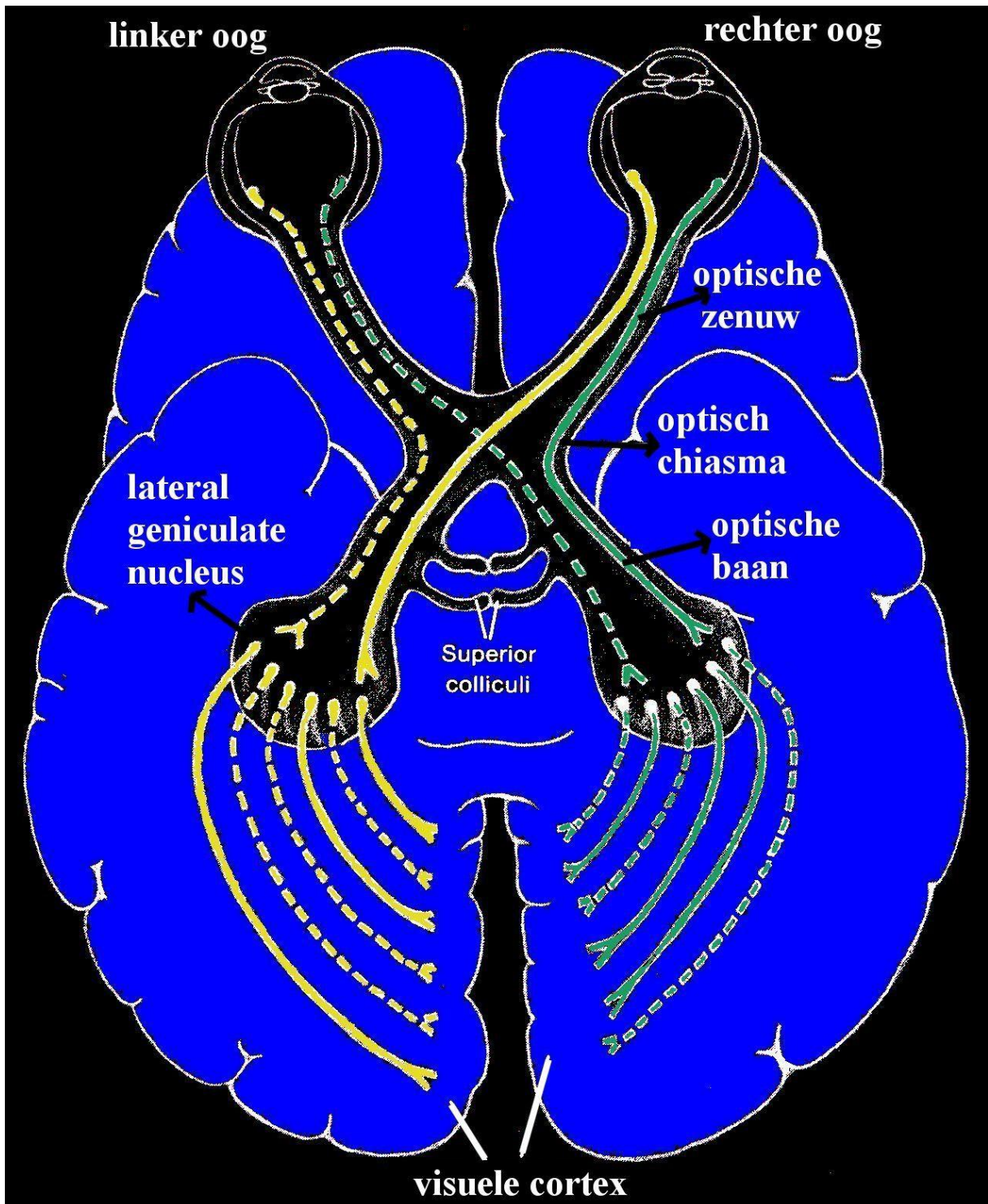
2. Het brein

Nadat de lichtprikkels in de kegeltjes en de staafjes zijn omgezet in elektrische impulsen gaan ze via de aan de ganglioncellen ontspringende zenuwbanen die via de blinde vlek het oog verlaten, naar de hersenen. In figuur 10 is schematisch aangegeven hoe dat gaat. We zien dat bij het kruispunt '*chiasma opticum*', de zenuwbanen van beide ogen elkaar voor een deel kruisen en naar de andere kant van de hersenhelft gaan dan die waar het oog waar ze vandaan komen zich bevindt. Met het rechteroog, om dat als voorbeeld te nemen³⁵, zie je zowel een deel van de rechter- als van de linkerkant van het gezichtsveld. Doordat sommige zenuwen overkruisen, komt de informatie van zowel rechter- als linkeroog met betrekking tot de rechterkant van het gezichtsveld in de hersenen bij elkaar. Aan beide zijden komen de zenuwbanen dan eerst terecht in de in de thalamus gelegen '*nucleus geniculatus lateralis*', die een belangrijke rol speelt bij het verwerken van de informatie die vanuit het netvlies

³³ Zinvol in die zin, dat alle licht dat het instrument verzamelt in het oog terecht komt.

³⁴ Dus wel een factor 10 tot 30.

³⁵ Voor het linkeroog geldt uiteraard eenzelfde redenering.



Figuur 10: Het licht en het brein

binnenkomt. Daar vindt bijvoorbeeld contrastmodulatie plaats. Ook vindt daar feedback plaats vanuit verderop gelegen gebieden in de hersenen, zoals de visuele cortex. Vanaf de *nucleus geniculatus lateralis* gaan zenuwbanen naar de *primaire visuele cortex*, achter in het hoofd. De primaire visuele cortex heeft weer verbindingen met andere delen van de visuele cortex en met andere hersengebieden, bijvoorbeeld met het gebied dat *beweging* registreert, met *motorische centra* en met het *geheugen*. Via uitwisseling met het geheugen kan binnenkomende informatie worden vergeleken met informatie die eerder in de hersenen is verwerkt en opgeslagen. Zelfs als de informatie onvolledig is of onduidelijk, doet ons brein

zijn best er betekenis aan te geven. Visueel waarnemen is in wezen 'constructie' of 'reconstructie' van 'de' werkelijkheid. Uiteindelijk, als alles goed gaat, 'worden we ons bewust' van hetgeen we waarnemen en kunnen we dat in ons geheugen opslaan, uitspreken, opschrijven, of tekenen.

Wat is hiervan nu van belang voor visueel waarnemen? Dit belang zit hem vooral in het waarnemen van zeer zwakke objecten, zoals planetaire of andere nevels, bolhopen en sterrenstelsels op de grens van wat we kunnen zien en het waarnemen van zeer laag contrast details in objecten. Objecten dus, waarvan de informatie onduidelijk en/of onvolledig is en die de hersenen zogezegd flink aan het werk zetten om betekenis aan die informatie te geven. Voorbeelden van dat type objecten zijn de centrale ster in M57, de ringvorm van sommige planetaire nevels, waarbij de ring slechts weinig helderder is dan het gebied binnen in de ring en zeer zwakke uitlopers van sterrenstelsels. Het gaat dus om objecten en details waarbij je tijdens het waarnemen geregeld afvraagt of je ze nu wel of niet ziet. Juist bij deze objecten speelt de vergelijking met in het geheugen aanwezige beelden en met fantasie over hetgeen je graag zou willen zien een belangrijke rol en moet je oppassen geen vorm of detail in het object te projecteren, terwijl je het niet daadwerkelijk hebt waargenomen. Denk maar aan de geschiedenis van de 'kanalen' op Mars. We zitten hier dus in het grensgebied tussen 'fantasie en werkelijkheid'.

Vorbereiding van de waarneming

Welke consequenties moet het bovenstaande nu hebben voor de voorbereiding van de waarneming van een lichtzwak zwak diepskyobject of een detail binnen een object? Moet je nu *zo gedetailleerd mogelijk* vooraf nagaan hoe het object eruit ziet en wat je dus idealiter zou moeten zien of moet je het object juist 'onbevooroordeeld' tegemoet treden en vooraf helemaal *geen of slechts basale* informatie als helderheid, plaats aan de hemel en afmetingen (of zelfs alleen maar de positie) verzamelen? De vraag die we ons hier moeten stellen is: welke manier van voorbereiden geeft de grootste kans om het object daadwerkelijk te zien zoals het er, gegeven de omstandigheden en het waarneeminstrument, uitziet. De voordelen van een gedetailleerde voorbereiding zijn dat we:

1. Precies weten waar we moeten kijken, omdat dit belangrijk is om een zeer zwak object te kunnen zien. Zo'n object verschijnt vaak pas, als we enige tijd in het oculair naar de juiste positie hebben gekeken. Kijken we op de verkeerde plek, zien we het object niet.
2. Precies weten hoe het object eruit ziet, bijvoorbeeld of het ovaal, rond van vorm of onregelmatig, een ringvorm heeft of niet (van belang bij planetaire nevels), zwakke uitlopers heeft of niet (van belang bij sterrenstelsels, bijvoorbeeld uit de Arp catalogus), verhelderingen heeft of niet.
3. Weten of er andere, zwakke objecten dicht in de buurt staan.

Een nadeel dat door tegenstanders van een voorbereiding als bovenbedoeld wel wordt genoemd is, dat we daardoor bevooroordeeld raken en details (ringvorm, uitlopers, zwakke satellietstelsels) in het object of beeldveld projecteren, terwijl we ze ongeacht of ze er nu wel of niet zijn, niet echt zien. We 'fantaseren' ze er dus bij, misschien zelfs zonder dat zelf door te hebben.

Ik zal niet ontkennen dat dit laatste mogelijk is, maar acht de kans een stuk groter dat we bij slechts globale voorbereiding details die we wel *kunnen zien*, niet opmerken. Waarom zou je bijvoorbeeld gaan zoeken naar fijne uitlopers van een sterrenstelsel als die er misschien niet zijn? Het zou erg veel tijd kosten, om onvoorbereid bij elk object na te gaan of het wellicht zwakke details bevat en of er wellicht een ander zeer lichtzwak object kort in de buurt staat.

Mijn eigen ervaring, vooral bij het waarnemen van zeer zwakke Arpstelsels is in elk geval, dat ik meer details en meer satellietstelsels waarneem als ik weet dat ze er zijn en waar ze zich bevinden. De centrale ster in M57 zou ik misschien niet gezien hebben als ik niet had gelezen, dat die slechts af en toe opdoemt en dan weer verdwijnt. Je kunt bij goede voorbereiding je aandacht precies richten op de plek waar details te zien zijn. En 'fantasie' kan net zo goed een rol spelen bij globale voorbereiding, omdat we ook als we niet weten waar we naar moeten zoeken te maken hebben met zeer lichtzwakke, qua vorm en structuur onduidelijke objecten. Dus ook in die situatie gaan onze hersenen in het geheugen zoeken of daar wellicht al 'iets' aanwezig is dat hetgeen we zien of menen te zien begrijpelijk maakt. En ook een minimale voorbereiding schept, bijvoorbeeld op grond van eerdere waarneming van soortgelijke objecten, verwachtingen aangaande hetgeen te zien zal zijn. Daardoor zijn we ook zonder gedetailleerde voorbereiding niet gevrijwaard van interpretatie of 'fantasie'. Wat mij betreft dus een gedegen en gedetailleerde voorbereiding. Waarbij ik zeker niet zal tegenspreken dat waarnemers die zich slechts globaal voorbereiden maar zeer systematisch en nauwgezet te werk gaan bij het waarnemen, kwalitatief vergelijkbare resultaten kunnen bereiken.

Ruis

Waar we wel rekening mee moeten houden als we waarnemen op de grens van wat ons visueel systeem aan kan, is met de 'ruis' in dat systeem. Naarmate we, na aanpassing aan het donker, de grens van het waarneembare naderen, neemt de verhouding ruis/signaal toe ten voordele van ruis, omdat het signaal nu eenmaal zwakker wordt. Is een object te lichtzwak voor onze oog/instrumentcombinatie, dan kunnen we geen signaal meer detecteren en als we dan toch nog (zeer zwakke) sterren zien aan- en uitflitsen, zijn dat geen sterren maar is dat ruis. Staafjes 'vuren' soms spontaan. Dit probleem kan zich bijvoorbeeld voordoen, als we naar zeer zwakke bolhopen kijken, zoals de Palomar bolhopen. Sommige daarvan zien we niet als een zwakke 'gloed', maar we zien af en toe een zeer zwak sterretje opflitsen en weer verdwijnen. Om er zeker van te zijn dat we echte sterretjes zien, zullen we ze, als we dat al niet vooraf hebben gedaan, op hun juiste positie ten opzichte van meer heldere sterren moeten tekenen, om dan later te controleren of het echte sterretjes waren, of ruis die door onze hersenen als sterretjes geïnterpreteerd werd.

Wat te doen?

Wat moet je nu doen om de kans op het zien van een zwak deepskyobject zo groot mogelijk te maken? Hieronder een toptien van de belangrijkste aandachtspunten.

1. Zorg dat je overdag je ogen beschermt tegen fel licht. Doe je dat niet, dan bereik je 's nachts nooit de volledig mogelijke aanpassing van de staafjes aan het donker.
2. Geef je ogen ruim de tijd zich aan te passen. Na ongeveer drie kwartier is de aanpassing voor het grootste deel bereikt, maar het kan wel een uur of twee uren voor je ogen volledig aan het donker zijn aangepast.
3. Zorg dat geen helderder licht dan het licht dat uit je oculair komt je oog kan bereiken tijdens een waarneming, door een donkere doek over je hoofd te plaatsen.
4. Kijk niet naar een lichtere plek dan in het oculair. Dan behoud je de optimale aanpassing. Dus een 'lapje' voor je kijkoog als je van het oculair wegstijgt. Wil je dit niet: even naar de sterrenhemel opkijken (bij afwezigheid van strooilicht) is niet erg. De her-aanpassing is een kwestie van een kwart minuut of minder. Neem je een pauze van vijf minuten of langer en doe je niets voor je oog, dan duurt her-aanpassing tot 2.5-4 minuten bij hoge vergroting. Dit geldt voor een situatie zonder lichtvervuiling. Onder lichtvervuilde omstandigheden duurt de her-aanpassing langer, naarmate er van meer lichtvervuiling sprake is.

5. Gebruik, als je licht nodig hebt (kaart bekijken, notities maken, tekenen) en geen lapje voor je oog wilt doen, zo zwak mogelijk rood licht en doe dat zo kort mogelijk. Volledige her-aanpassing na 15 seconden zwak rood licht duurt al zo'n 20-30 seconden. Een goed alternatief voor het maken van notities, waarbij geen licht nodig is, is het inspreken van waarnemingen.
6. Gebruik grote letters/symbolen op zoekkaarten, dan kun je toe met zwakkere verlichting.
7. Neem perifeer waar en zorg dat het beeld op de meest gevoelige plek van de staafjes valt, op ongeveer 20° van het centrum, aan de neuskant. Pas daarbij op voor de blinde vlek daar vlakbij en kijk enigszins rond om het Troxler effect te vermijden.
8. De staafjes zijn gevoelig voor beweging. Bewegen van je telescoop kan een zwak object zichtbaar maken.
9. Bereid je waarnemingen goed voor, zodat je weet waar het object zich precies in het beeldveld bevindt en wat er precies te zien is. Goede voorbereiding voorkomt tevens dat je vaak op een zoekkaart moet kijken.
10. Zorg dat je voor elke afzonderlijke waarneming slechts één maal kort op een zoekkaart hoeft te kijken, zodat je ogen zich voor een waarneming maar één maal hoeven te heraanpassen.

Literatuur

1. Denis Baylor (1996), How photons start vision. Proc. National Acad. Sci. USA, vol. 93, pp. 560-565.
2. Trevor D. Lamb and Edward N. Pugh jr, (2006), Phototransduction, Dark adaptation and Rhodopsin regeneration. The Proctor Lecture, Invest. Ophthalmol. Vis. Sci. 47, p. 5138.
3. E.N. Pugh (1975), Rushton's paradox: rod dark adaptation after flash photolysis. Journal of Physiology, June; 248(2), p 413–431.
4. Sakitt B. (1972), Counting every quantum. Journal of Physiology, 223, p. 131–150.
5. A.M Cameron, O.A.R. Mahroo, and T.D. Lamb (2006), Dark adaptation of human rod bipolar cells measured from the *b*-wave of the scotopic electroretinogram. Journal of Physiology, September 1, 575(Pt 2), p. 507–526.
6. G.R. Jackson, T. Felix, C. Owsley (2006), The scotopic sensitivity tester-1 and the detection of early age-related macular degeneration. Ophtalmic and Physiological Optics, July, vol 26, 4, p. 431-437.
7. G. W. Robertson and John Yudkin (1944), Effect of age upon dark adaptation. Journal of Physiology, June, 103(1) p.1–8.
8. Frank Schieber (Univ. of South Dakota), Age and Glare Recovery Time for Low-contrast Stimuli, te vinden op <http://www.usd.edu/~schieber/pdf/glare.pdf>
9. Gregory R. Jackson, Cynthia Owsley and Gerald McGwin Jr (1999), Aging and dark adaptation. Vision Research, November, 39, 23, p. 3975-3982.
10. Coile, D.C., Baker, H.D. (1992), Foveal dark adaptation, photopigment regeneration and aging. Vis. Neurosci., Januari, 8, 1, p. 27-39.
11. Pulos, E. (1989), Changes in Rod Sensitivity through Adulthood. Invest. Ophthalmol. vis. Sci., August, 30, 8, p. 1738-1742.
12. Steven H. Schwartz (2004), Visual Perception: a clinical orientation, McGraw-Hill professional, ISBN: 0071411879.
13. S.M. Pattanaik, A. Greenberg, D.P.(1999), computational model for simulating dynamics of visual adaptation. Program of Computer Graphics, Cornell University, Technical Report PCG 99-3.
14. Hecht, S., and Mandelbaum, J.(1940), Dark Adaptation and Experimental Human Vitamin A Deficiency. American Journal of Physiology, 130, 651.
15. George Wolf (2001), The Discovery of the Visual Function of Vitamin A. Journal of Nutrition, 131, p. 1647-1650.
16. Gordon L. Fain & L. Carter Cornwall (1993), Light and Dark Adaptation in Vertebrate Photoreceptors, in Robert Shapely & Domenic Man-Kit Lam: Contrast Sensitivity, The MIT Press, Cambridge, Masseurhusses.
17. Helga Kolb, Eduardo Fernandez, & Ralph Nelson, WEBVISION, The Organization of the Retina and Visual System, op <http://webvision.med.utah.edu/index.html> .
18. P. Aggarwal, T.C.Nag, S. Wadhwa (2007), Age-related decrease in rod bipolar cell density of the human retina: an immunohistochemical study. Journal of Biosciences, 233, p. 293-298.
19. W. Rowland Taylor, Robert G. Smith, (2004), Transmission of scotopic signals from the rod to rod-bipolar cell in the mammalian retina. Vision Research, 44, July, p. 3269-3276.
20. C.S. Leibrock, T. Reuter, T.D. Lamb (1998), Molecular basis of dark adaptation in rod photoreceptors. Eye, 12, 511-520.
21. Bradley E. Schaefer (1989), Telescopic limiting magnitudes, NASA-Godart space flight center, Code 661, Greenbelt, Maryland, 20771.

22. Ronal M. Hansen and Anne B. Fulton (1986), Pupillary changes during dark adaptation in human infants. *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, 27, p. 1726-1729.
23. S. Hecht, Ch. Haig, A.M. Chase (1937), The influence of light adaptation on subsequent dark adaptation of the eye. *The Journal of General Physiology*, 20, 6, p. 831-850.
24. Doug Kniffen: "Seeing red or go for the green", op <http://www.astromax.org/activities/members/kniffen.htm>
25. Gordon Bond (1999), Red revisited, TPO (The Practical Observer) Volume 10, Issue 2. Te vinden op <http://www.jersey-mall.com/tpo/pages/redrevis.htm>
26. Brian Skiff: How dark can the night sky get? Te vinden op http://www.astropix.com/HTML/L_STORY/SKYBRITE.HTM .
27. George Wald and Anna-Betty Clark, (1937), Visual Adaptation and Chemistry of the Rods. *The Journal of General Physiology*, 21, p. 93-105.
28. Night Vision: The Red Myth, te vinden op: http://stlplaces.com/night_vision_red_myth/
29. S. Martinez-Conde, S.L. Macknik, X.G. Troncoso & T.A. Dyar (2006), Microsaccades Counteract Visual Fading during Fixation. *Neuron*, 49, Januari, p. 297-305.
30. S. Martinez-Conde, S.L. Macknik, (2007), Windows on the Mind. *Scientific American*, August, p. 40-47.
31. T.D. Lamb, E.N. Pugh Jr., (2004). Dark adaptation and the retinoid cycle of vision, *Progress in Retinal and Eye Research*, 23, p. 307-380.