

Terugkaatsing en Breking

Reflection and Refraction

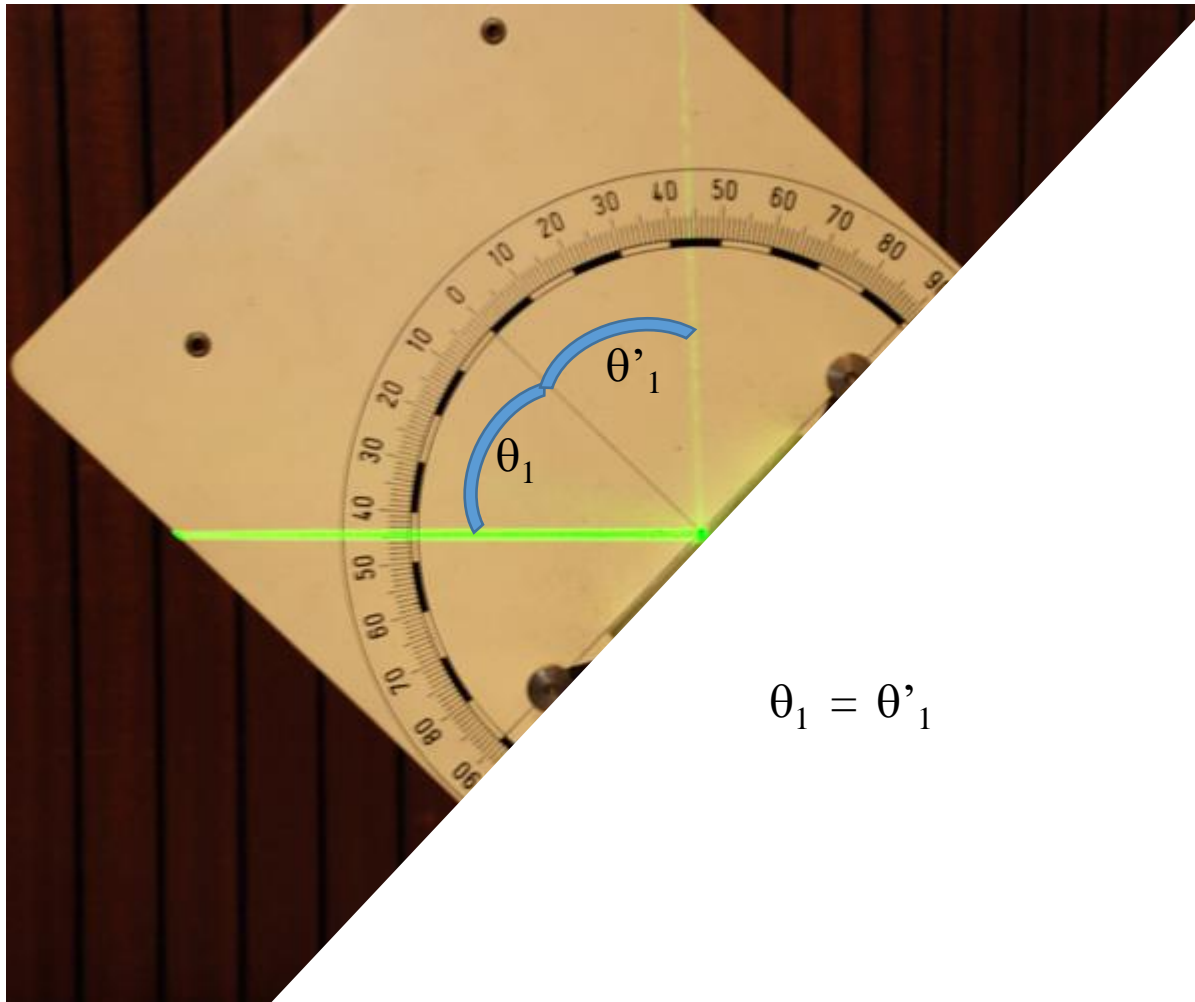
Geometrische optica

- EM-golven interageren met voorwerpen en middenstoffen.
 - Vb.: een spiegel weerkaatst licht, TV golven komen via een kabel bij het ontvangsttoestel.
- Wanneer licht of andere EM-golven interageren met voorwerpen die veel groter zijn dan de golflengte kan men, in goede benadering,
 - het golfkarakter verwaarlozen
 - Veronderstellen dat licht zich volgens rechte lijnen (**stralen**) voortplant

Geometrische optica

- Een **lichtstraal** staat loodrecht op het golffront (in isotrope media) en haar richting is deze van de voortplantingsrichting van de golf.
- De benadering van licht als een lichtstraal en de studie van het gedrag van deze straal aan het grensvlak van twee middelenstoffen noemt men **geometrische optica**.

30.1 Terugkaatsing



$$\theta_1 = \theta'_1$$

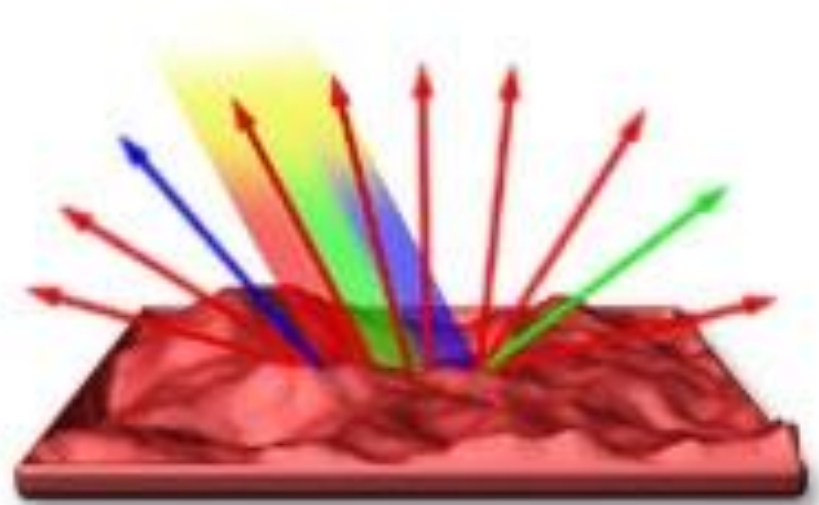
30.1 Terugkaatsing



Specular Reflection

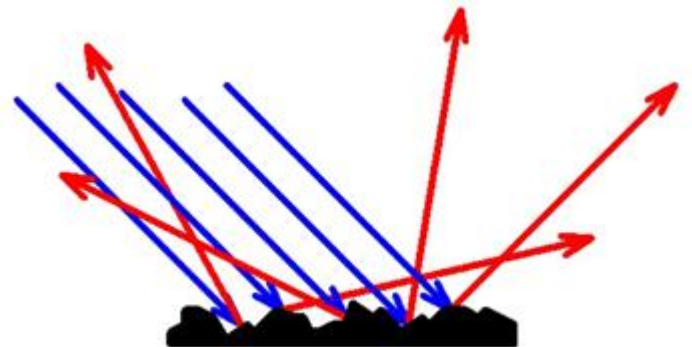
Spiegelende
terugkaatsing

Oppervlak niet
zichtbaar



Diffuse Reflection

Oppervlak
zichtbaar



30.1 Terugkaatsing



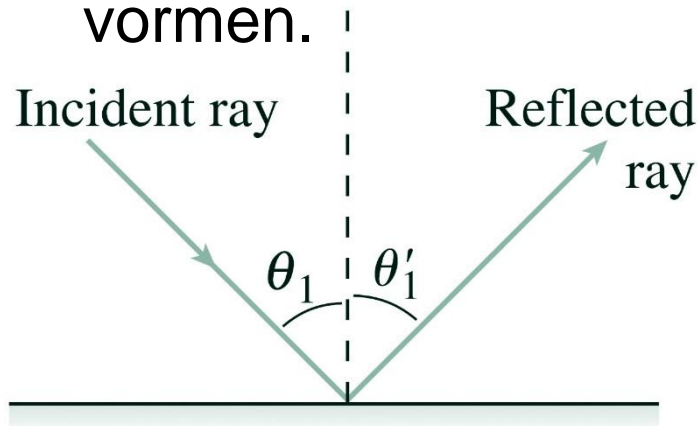
Specular reflection



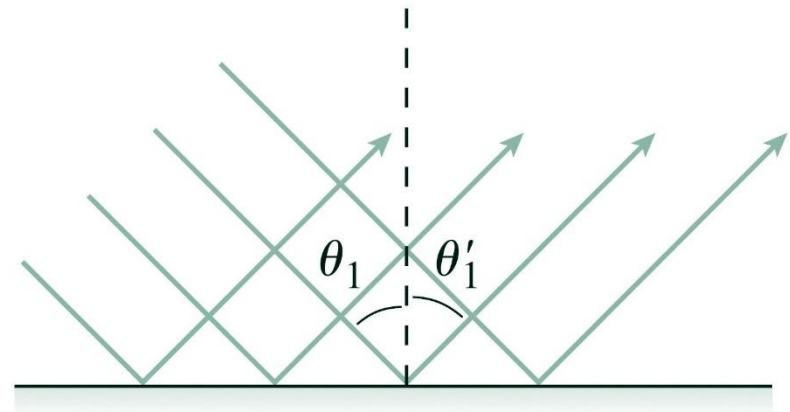
Diffuse reflection

30.1 Terugkaatsing

- Wanneer licht terugkaatst aan een oppervlak maken de invallende en de teruggekaatste stralen dezelfde hoek met de normaal op het oppervlak (figuur (a)):
- invalshoek = terugkaatsingshoek : $\theta_1' = \theta_1$
 - **Speculaire terugkaatsing** (figuur (b)): tegen gladde oppervlakken, worden parallelle stralen allemaal onder dezelfde hoek teruggekaatst.
 - Het oppervlak ziet er glanzend uit en kan beelden vormen.



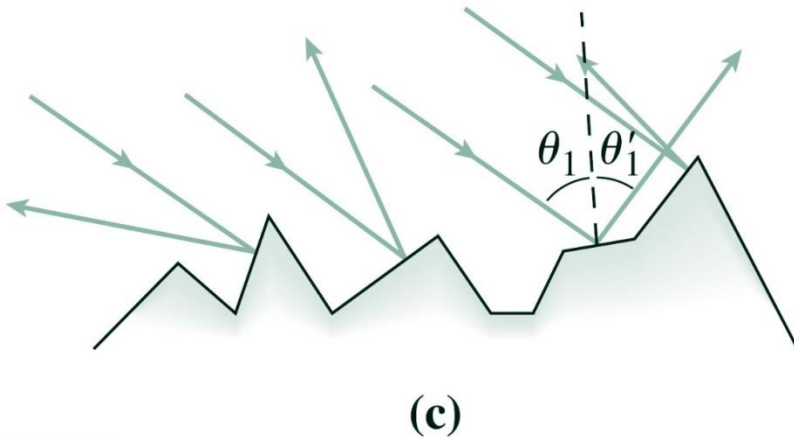
(a)



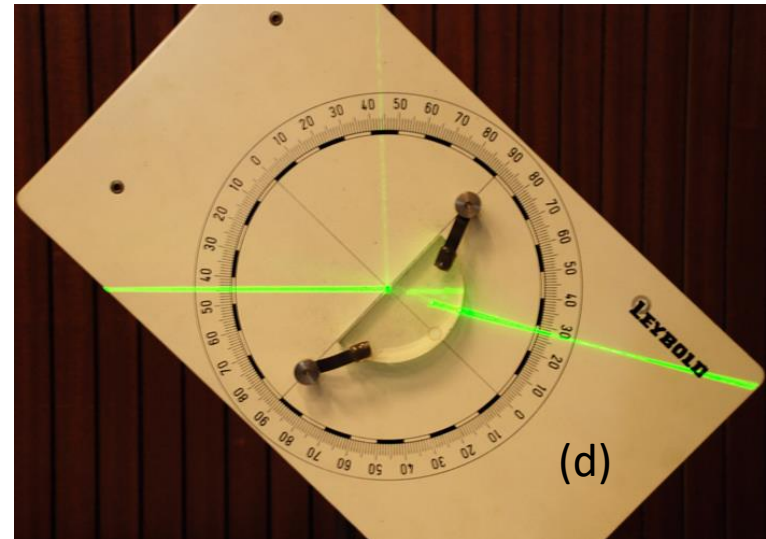
(b)

30.1 Terugkaatsing

- Alle terugkaatsingshoeken zijn gelijk aan de invalshoeken zelfs voor ruwe oppervlakken.
 - Maar door ruwheid wordt het licht in willekeurige richtingen teruggekaatst.
 - Men noemt dit **diffuse terugkaatsing** (figuur (c)).

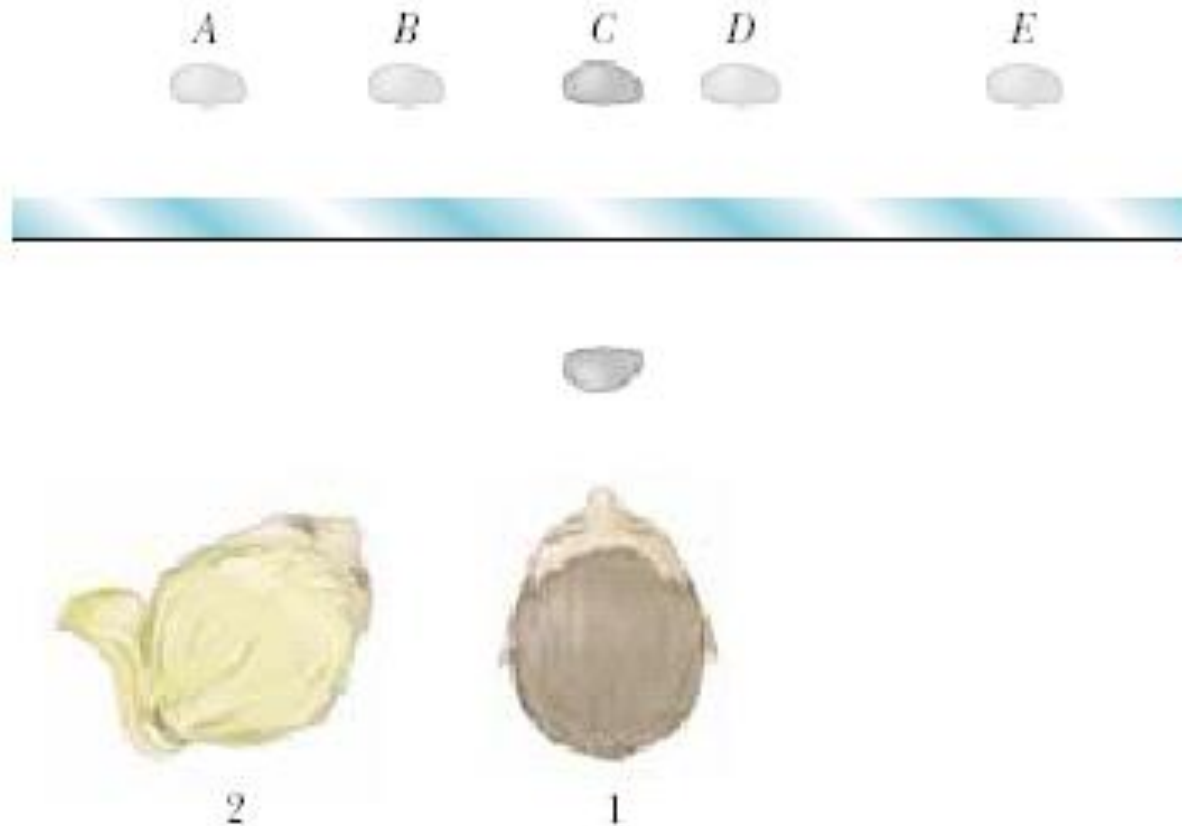


© 2012 Pearson Education, Inc.



- Zelfs aan transparante oppervlakken wordt een deel van het licht teruggekaatst: **partiële terugkaatsing**. (figuur d)

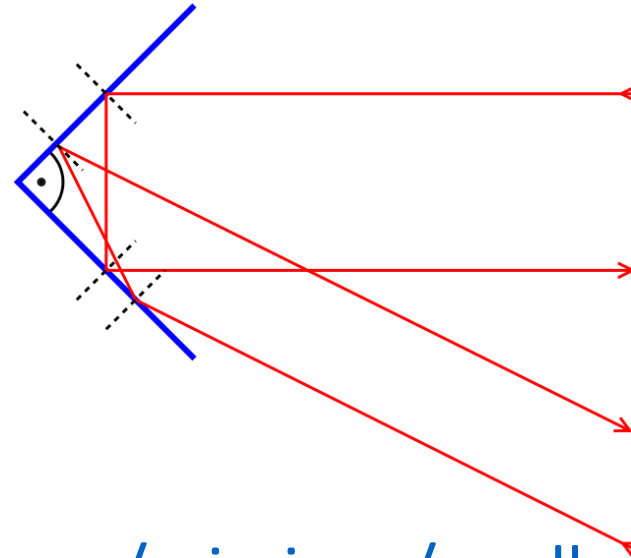
30.1 Terugkaatsing



In the overhead view, the image of the stone seen by observer 1 is at *C*.
Where does observer 2 see the image—at *A*, at *B*, at *C*, at *D*, at *E*, or not at all?

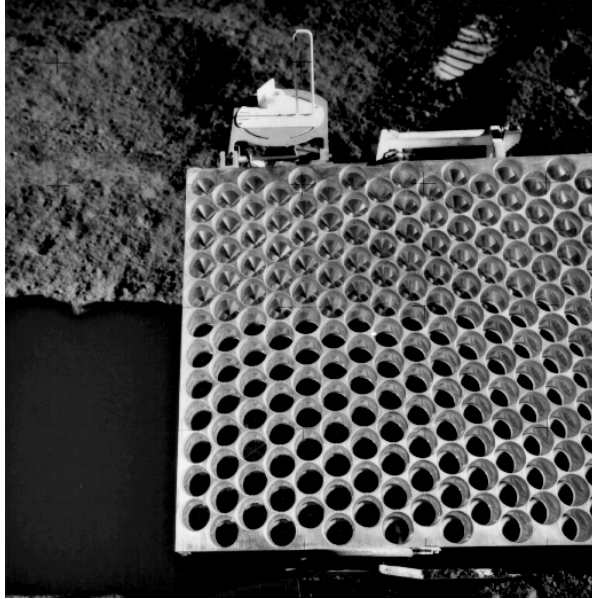
30.1 Terugkaatsing

- Retro-reflection



- http://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/apollo/apollo_15/experiments/lrr/
- http://www.lpi.usra.edu/expmoon/Apollo15/A15_Experiments_LRRR.html

30.1 Terugkaatsing

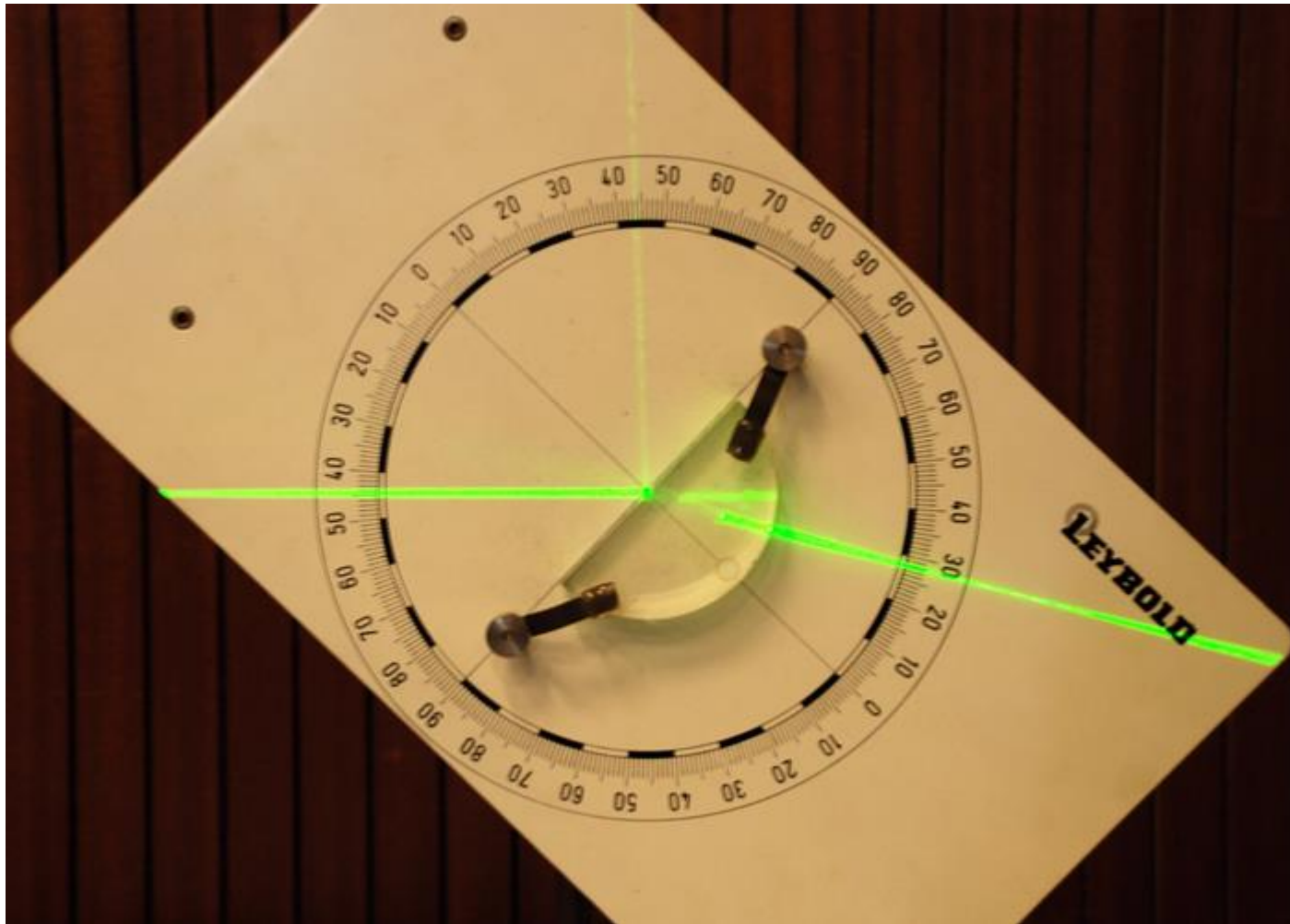


Left: The Apollo 15 Laser Ranging Retroreflector. Right: Laser beam aimed at Moon by a telescope at McDonald Observatory. (Image courtesy of McDonald Observatory.)

The Laser Ranging Retroreflector experiment was deployed on *Apollo 11*, *14*, and *15*. It consists of a series of corner-cube reflectors, which are a special type of mirror with the property of always reflecting an incoming light beam back in the direction it came from. These reflectors can be illuminated by laser beams aimed through large telescopes on Earth. The reflected laser beam is also observed with the telescope, providing a measurement of the round-trip distance between Earth and the Moon. This is the only ALSEP experiment that is still returning data from the Moon. Many of these measurements have been made by [McDonald Observatory](#) in Texas. From 1969 to 1985, they were made on a part-time basis using the McDonald Observatory 107-inch telescope. Since 1985, these observations have been made using a dedicated 30-inch telescope. Additional measurements have been made by observatories in Hawai'i, California, France, Australia, and Germany.

Laser beams are used because they remain tightly focused for large distances. Nevertheless, there is enough dispersion of the beam that it is about 7 kilometers in diameter when it reaches the Moon and 20 kilometers in diameter when it returns to Earth. Because of this very weak signal, observations are made for several hours at a time. By averaging the signal for this period, the distance to the Moon can be measured to an accuracy of about 3 centimeters (the average distance from Earth to the Moon is about 385,000 kilometers).

Terugkaatsing en breking

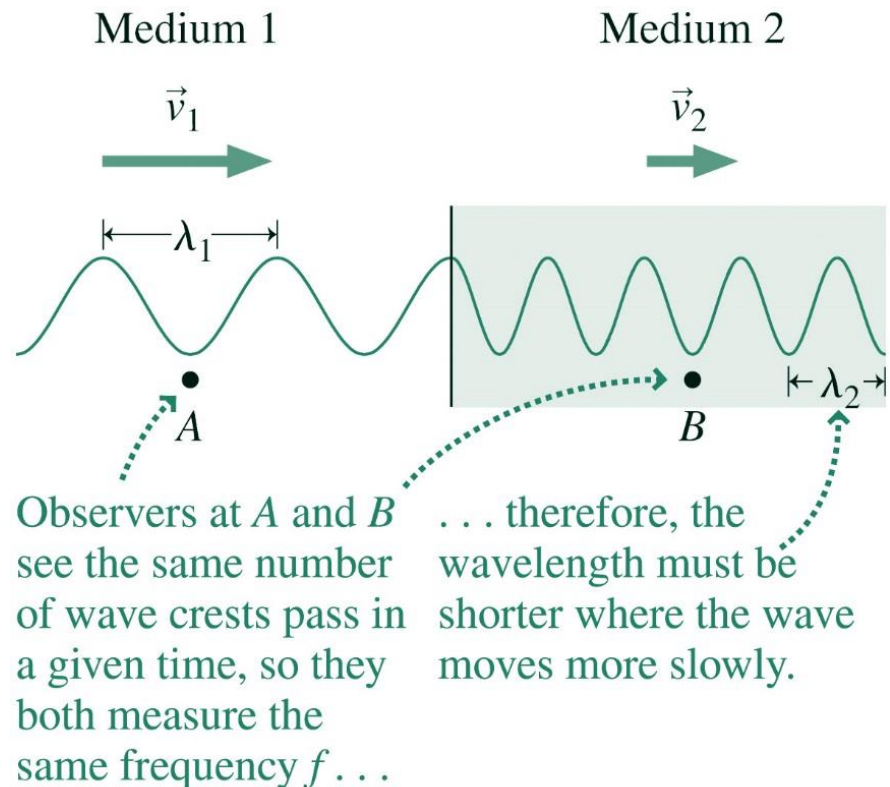


30.2 Breking

- **Breking** is het veranderen van de richting van stralen als deze het grensvlak tussen twee verschillende transparante middenstoffen kruisen.
- Breking treedt op omdat de golfsnelheid verschilt in verschillende middenstoffen.
- Voor licht beschrijft de brekingsindex deze snelheidsverandering.

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

- De golfsnelheid in een middenstof is $v = c/n$.



30.2 Breking

n groot: optisch dichte stof.

n klein: optisch ijle stof.

Steeds is $n \geq 1$ of $v \leq c$

n is zelden groter dan 2,5
(zie tabel)

Table 30.1 Indices of Refraction*

| Substance | Index of Refraction, n |
|----------------------------|--------------------------|
| Gases | |
| Air | 1.000293 |
| Carbon dioxide | 1.00045 |
| Liquids | |
| Water | 1.333 |
| Ethyl alcohol | 1.361 |
| Glycerine | 1.473 |
| Benzene | 1.501 |
| Diiodomethane | 1.738 |
| Solids | |
| Ice (H ₂ O) | 1.309 |
| Polystyrene | 1.49 |
| Glass | 1.5–1.9 |
| Sodium chloride (NaCl) | 1.544 |
| Diamond (C) | 2.419 |
| Rutile (TiO ₂) | 2.62 |

*At 1 atm pressure and temperatures ranging from 0°C to 20°C, measured at a wavelength of 589 nm (the yellow line of sodium).

Conceptvraag

Een lichtstraal gaat van een eerste middenstof naar een tweede middenstof en wordt gebroken.

Voor de gebroken straal verandert:

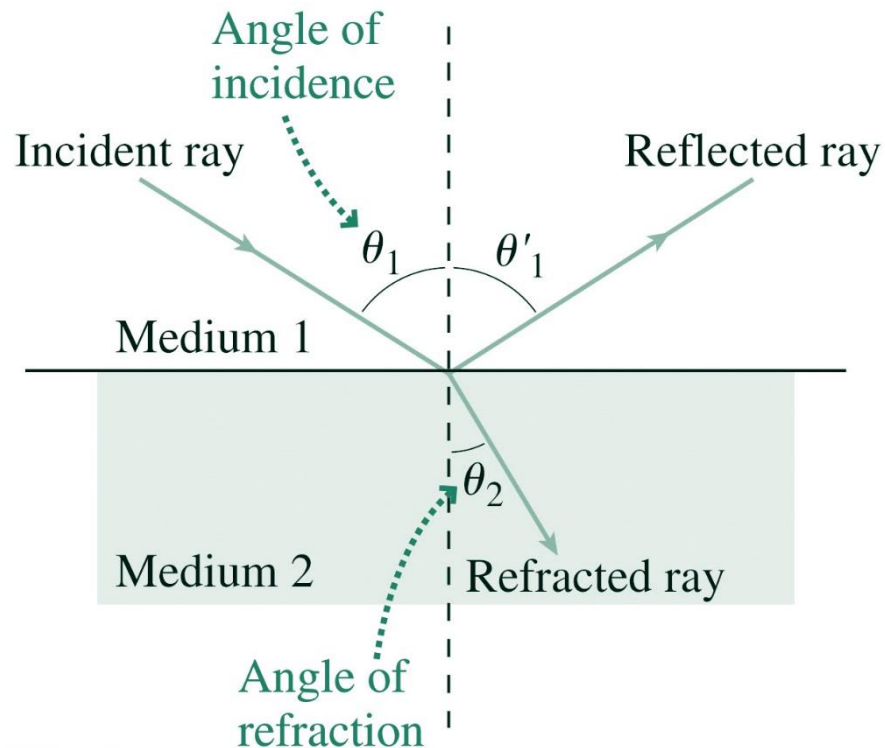
- a) Enkel de golflengte.
- b) Enkel de snelheid.
- c) De snelheid en de frequentie.
- d) De snelheid en de golflengte.

30.2 Brekingswet

- Invalshoek θ_1 = hoek tussen de normaal op het scheidingsvlak tussen de twee middenstoffen en de invallende straal.
- Brekingshoek θ_2 = hoek tussen de normaal op het scheidingsvlak tussen de twee middenstoffen en de gebroken straal.

Bij breking zal er ook steeds een (kleine) fractie van het licht teruggekaatst worden :

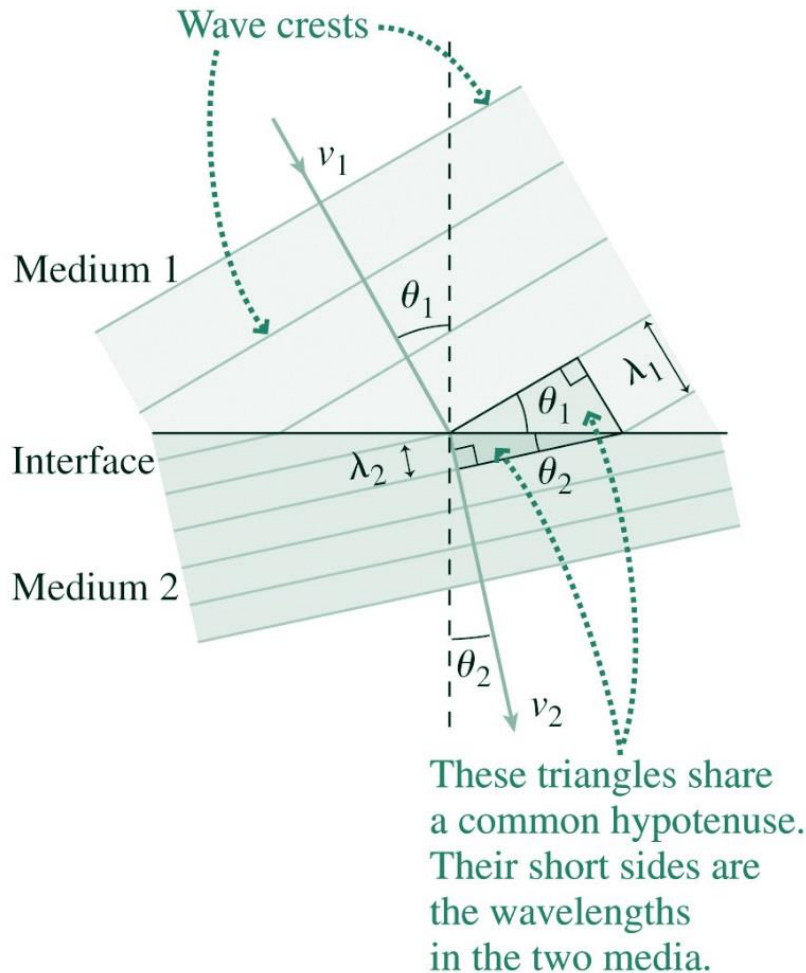
θ'_1 = terugkaatsingshoek



30.2 Brekingswet

- Het verband tussen invalshoek θ_1 en brekingshoek θ_2 wordt gegeven door de **wet van Snellius**:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$



$$\frac{\lambda_1}{\sin \theta_1} = \frac{\lambda_2}{\sin \theta_2}$$

$$\lambda = vT = \frac{v}{f} = \frac{c}{nf}$$

zodat

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

30.2 Brekingswet en principe van Fermat

- Het verband tussen invalshoek θ_1 en brekingshoek θ_2 wordt gegeven door de **wet van Snellius**:

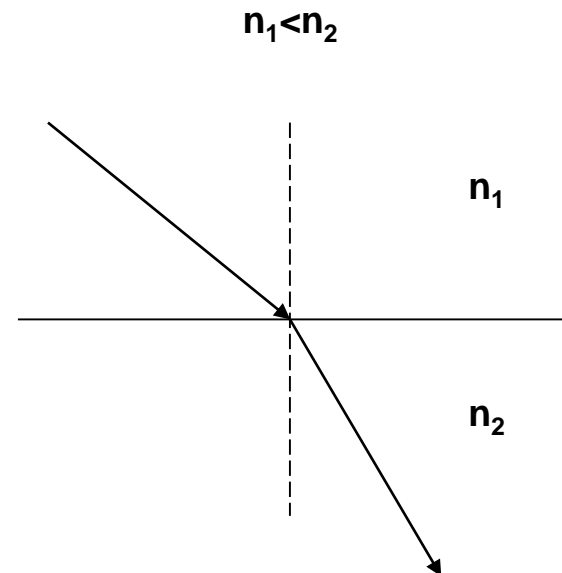
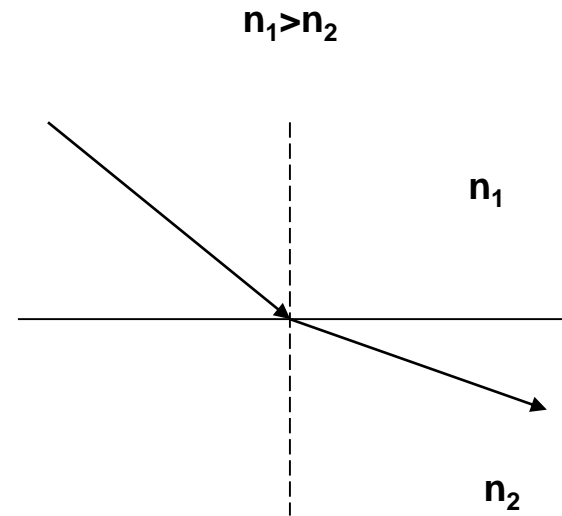
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Bewijs de brekingswet en de reflectiewet op basis van het **principe van Fermat** :

Wanneer een elm golf van punt A naar punt B gaat volgt het de weg die qua tijd (of optische weglengte) extremaal (meestal minimaal) is.

30.2 Brekingswet

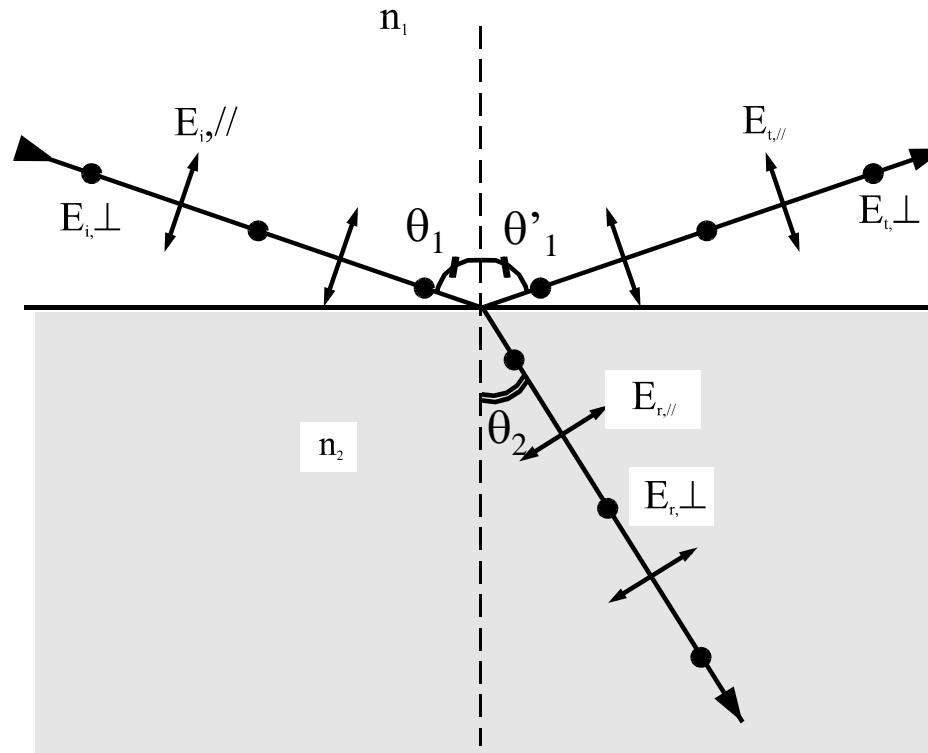
- Bij overgang van een stof met grote brekingsindex (optisch dichte stof) naar een stof met kleine brekingsindex (optisch ijle stof) is er breking van de normaal weg.
- Bij overgang van een stof met kleine brekingsindex (optisch ijle stof) naar een stof met grote brekingsindex (optisch dichte stof) is er breking naar de normaal toe.



30.2 Polarisation door terugkaatsing

Polarisatie door terugkaatsing:

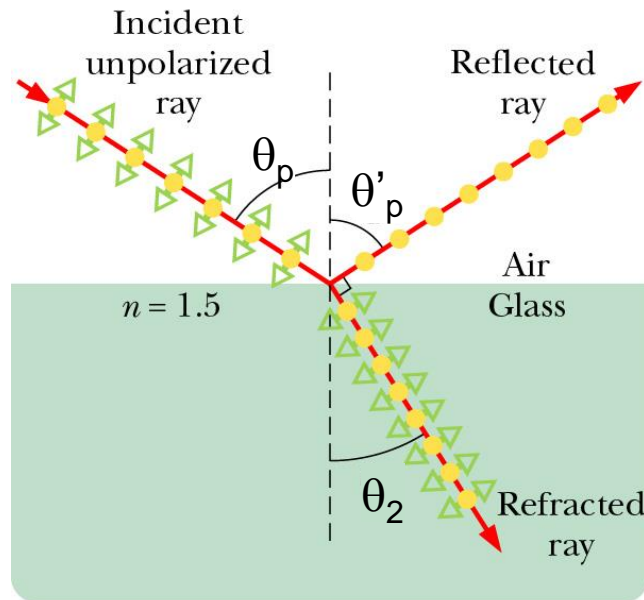
hoek van Brewster



30.2 Polarisation door terugkaatsing

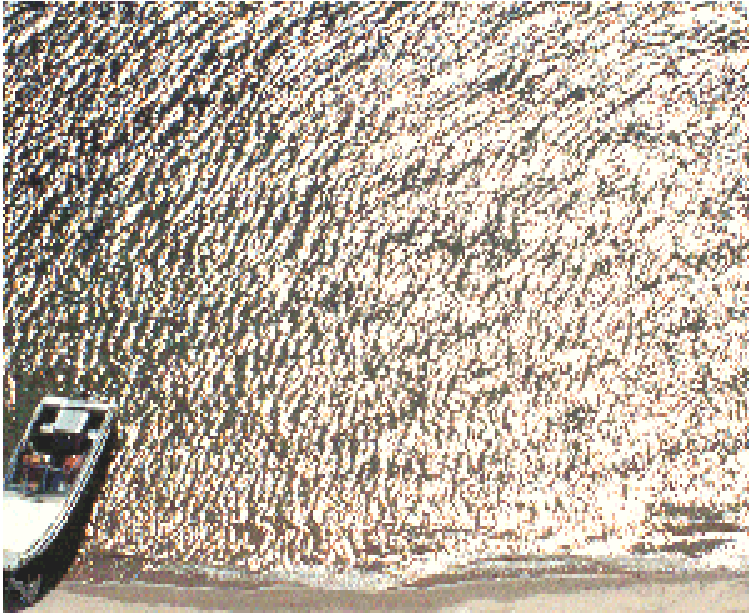
$$E_{t,\parallel} = E_{i,\parallel} \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad E_{r,\parallel} = E_{i,\parallel} \frac{2 \cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2) \cos(\theta_1 - \theta_2)}$$

$$E_{t,\perp} = - E_{i,\perp} \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad E_{r,\perp} = E_{i,\perp} \frac{2 \cos\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)}$$



- Component perpendicular to page
- ↔ Component parallel to page

30.2 Polarisatie door Terugkaatsing



30.2 Polarisatie door Terugkaatsing



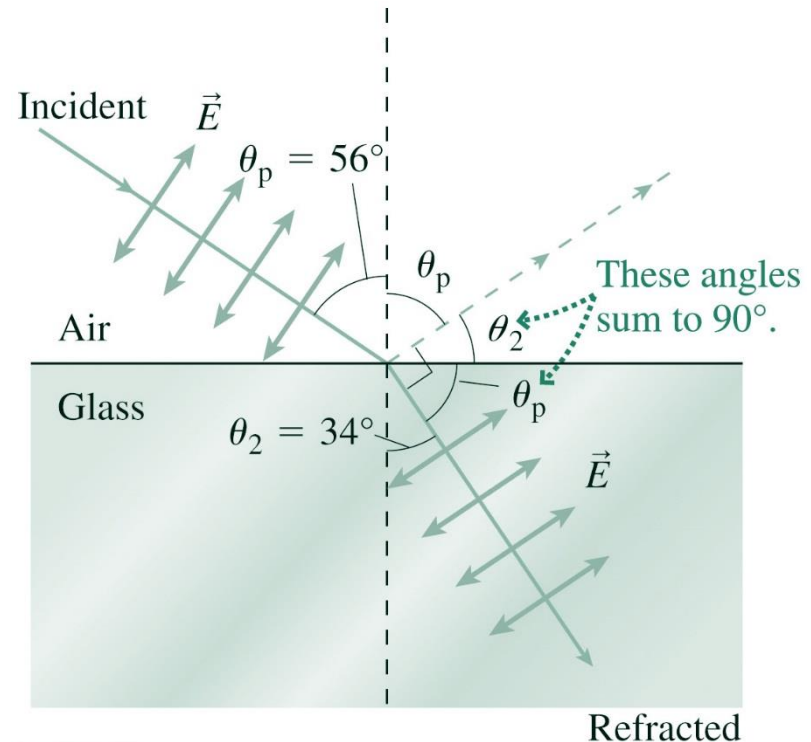
30.2 Polarisation door terugkaatsing

- Wanneer de invalshoek gelijk is aan de **polarisatiehoek** of **brewsterhoek**,

$$\tan \theta_p = n_2/n_1$$

dan is de teruggekaatste straal volledig gepolariseerd loodrecht op het vlak gevormd door de invallende en teruggekaatste straal.

- Als de teruggekaatste straal en de gebroken straal loodrecht op elkaar staan is de invalshoek gelijk aan de polarisatiehoek.
- Toon aan met Snellius en de voorwaarde $\theta_2 + \theta_p = 90^\circ$, dat $\tan \theta_p = n_2/n_1$

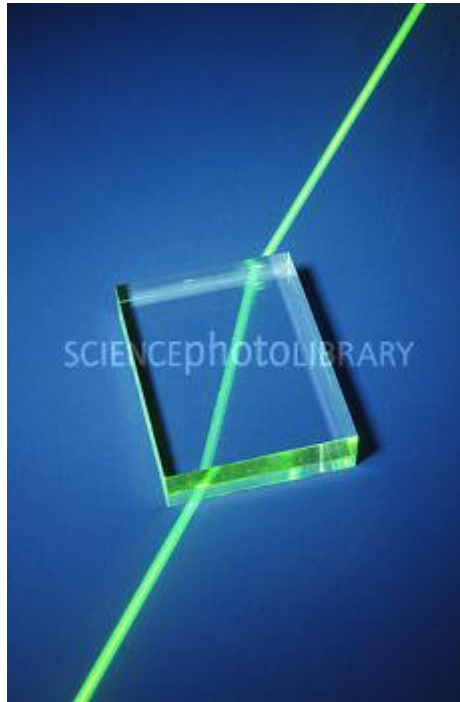


Conceptvraag

Which one of the following is an accurate statement about light?

- A) When light strikes a surface at Brewster's angle, the reflected and transmitted light are both 100% polarized.
- B) When light strikes a surface at Brewster's angle, it is completely reflected at the surface.
- C) When light strikes a surface at Brewster's angle, only the reflected light is 100% polarized.
- D) When light strikes a surface at the critical angle, only the reflected light is 100% polarized.
- E) When light strikes a surface at the critical angle, all the light passes through the surface.

30.2 Voorbeelden van breking



30.2 Voorbeelden van breking

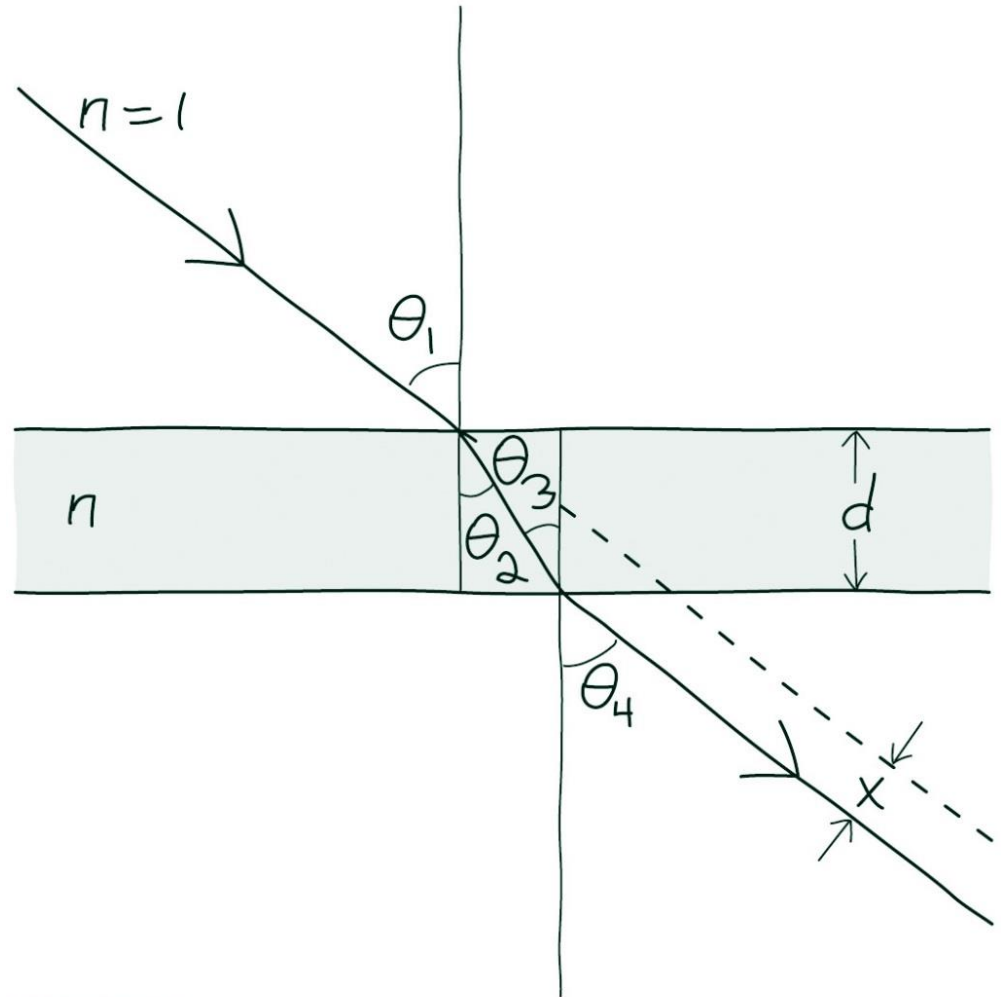
Planparallelle plaat

We leggen een glasplaat op een stuk tekst. Als we onder schijnende boeken naar ver- st kijken merken we dat de tekst schijnbaar naar boven is gekomen en horizontaal is gekschoven is. Dit kan je vergelijken met de tweede situatie in voorgaande proef.

30.2 Voorbeelden van breking

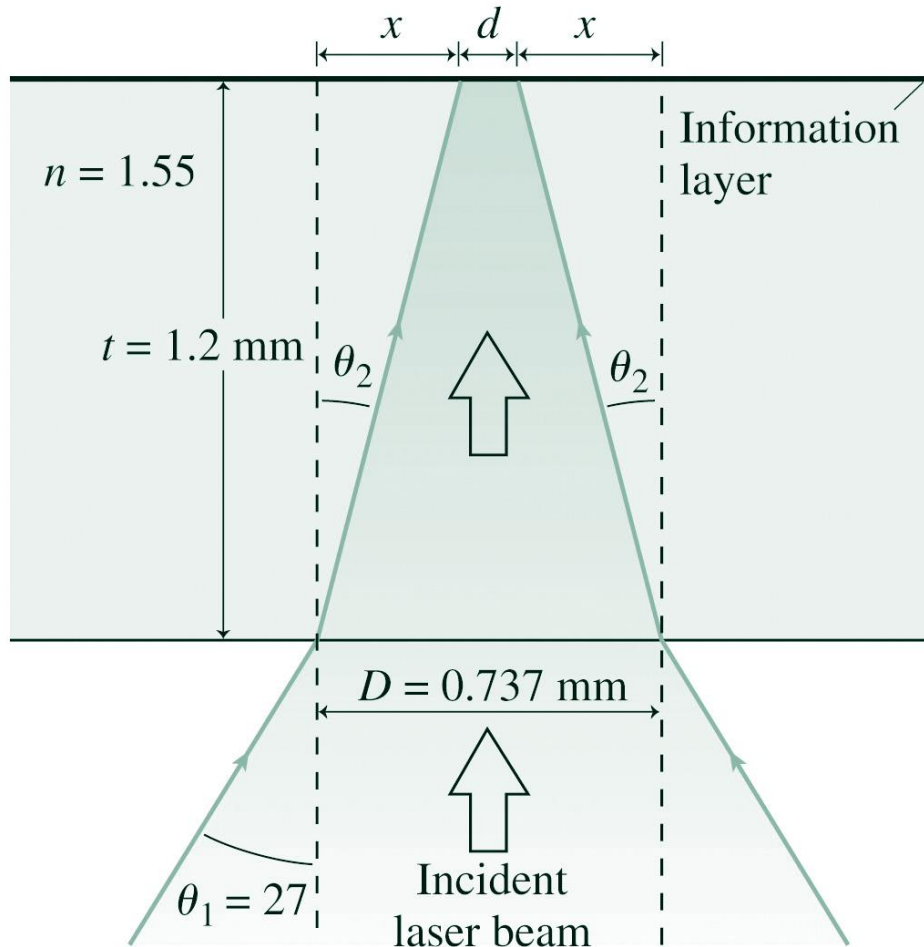
- Breking aan een planparallelle plaat zorgt enkel voor een evenwijdige verplaatsing (afhankelijk van de plaatdikte) van de lichtstraal.

Bij een dunne plaat mag men de evenwijdige verschuiving x meestal verwaarlozen :
m.a.w. de lichtstraal gaat “ongebroken” rechtdoor



30.2 Voorbeelden van breking

- Breking in een CD zorgt ervoor dat CD weinig gevoelig is voor stof.



© 2012 Pearson Education, Inc.

Berekening van d geeft :

$$d = 1,80 \mu\text{m}$$

(doe dit als oefening)

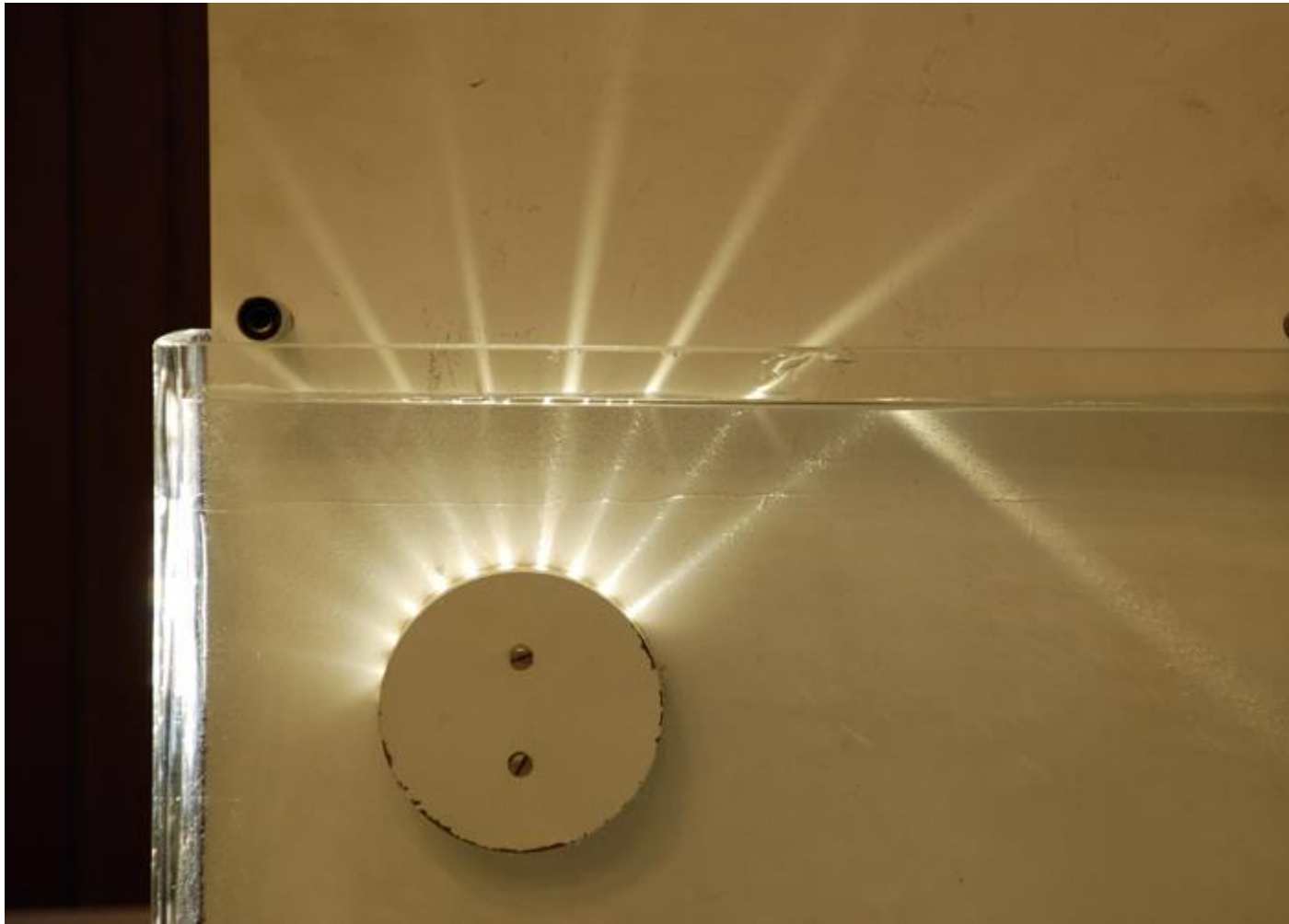
Mocht men gebruik maken van een smalle lichtbundel van $1,80 \mu\text{m}$ die loodrecht invalt op de onderzijde zouden kleine stofdeeltjes (grootteorde μm) reeds nefast zijn voor de uitlezing.

In deze opstelling zijn stofdeeltjes van enkele tienden mm nog onschadelijk.

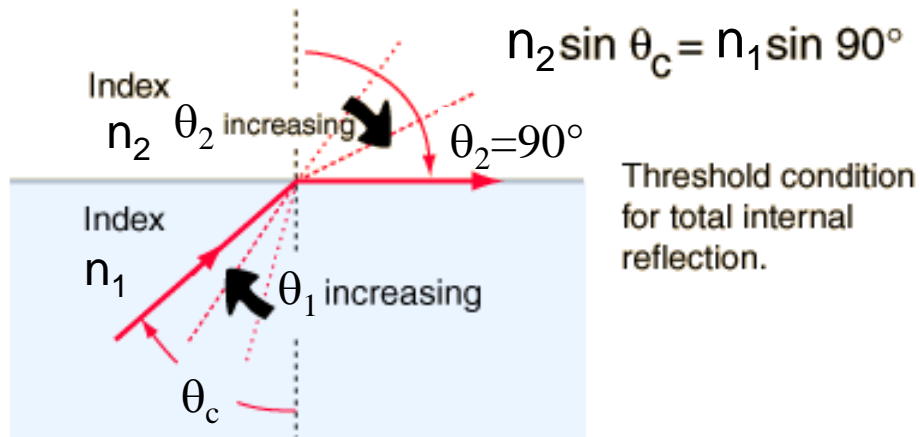
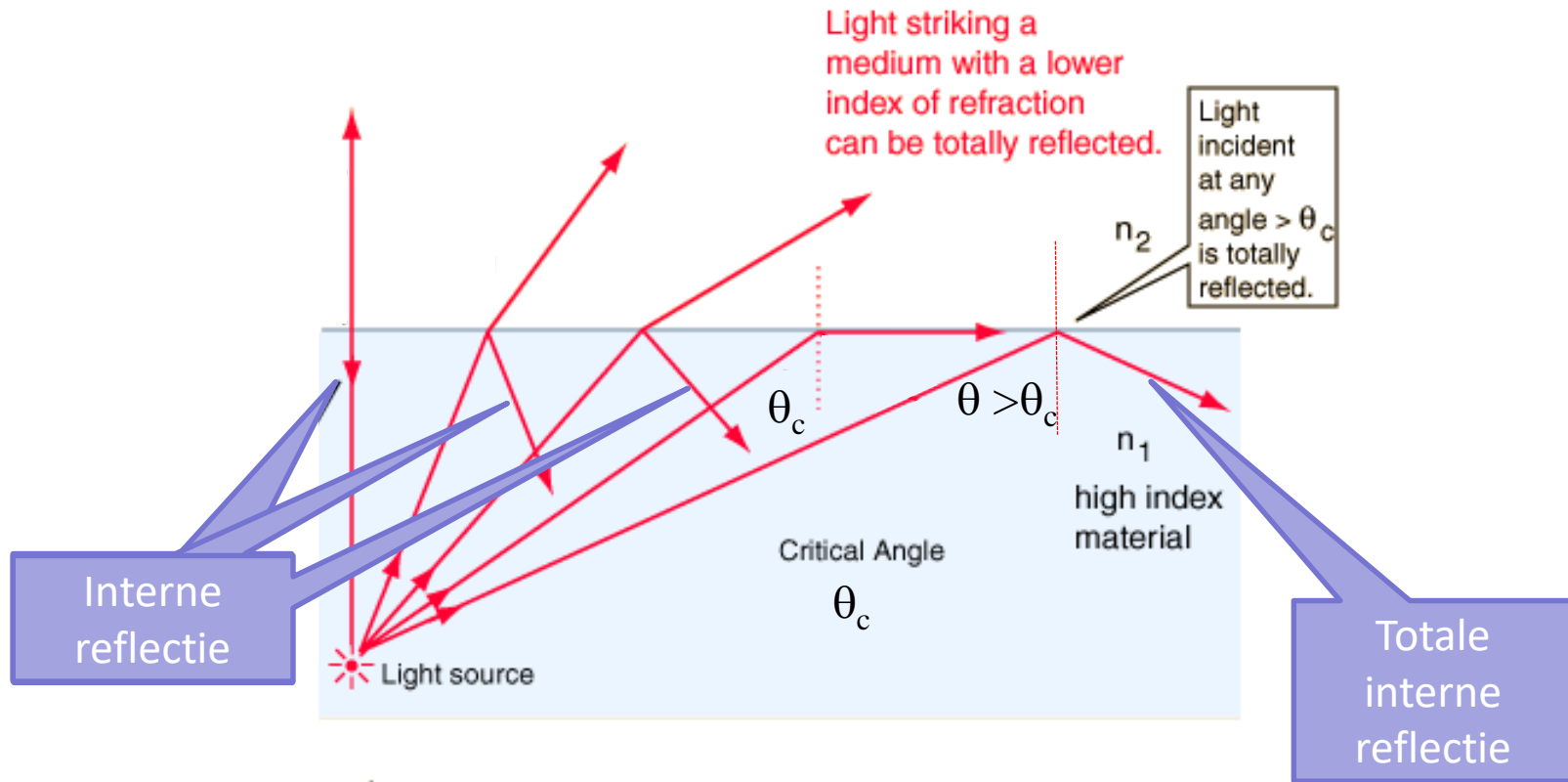
30.3 Totale Inwendige Terugkaatsing



30.3 Totale Inwendige Terugkaatsing



30.3 Totale Inwendige Terugkaatsing



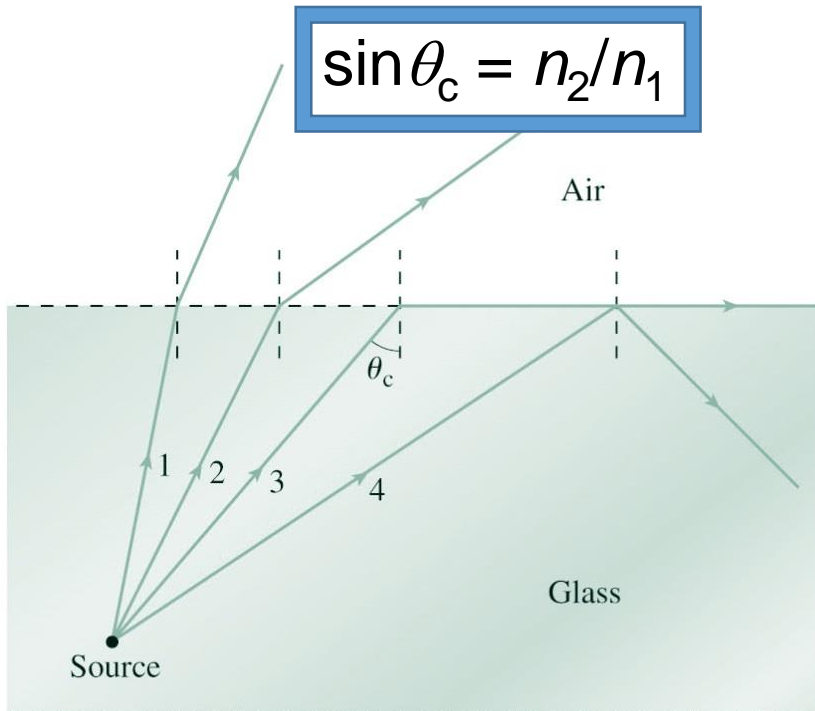
[Applet](#)

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_{ijl}}{n_{\text{dicht}}}$$

30.3 Totale Inwendige Terugkaatsing

- **Totale interne reflectie** (TIR) kan optreden bij overgang van een materiaal met hoge brekingsindex naar een materiaal met lagere brekingsindex.
 - Opdat TIR zou optreden moet de invalshoek groter zijn dan de zgn. **kritische hoek of grenshoek**, gegeven door

$$\sin \theta_c = n_2 / n_1$$



© 2012 Pearson Education, Inc.

De brekingshoek kan nooit groter worden dan 90° .

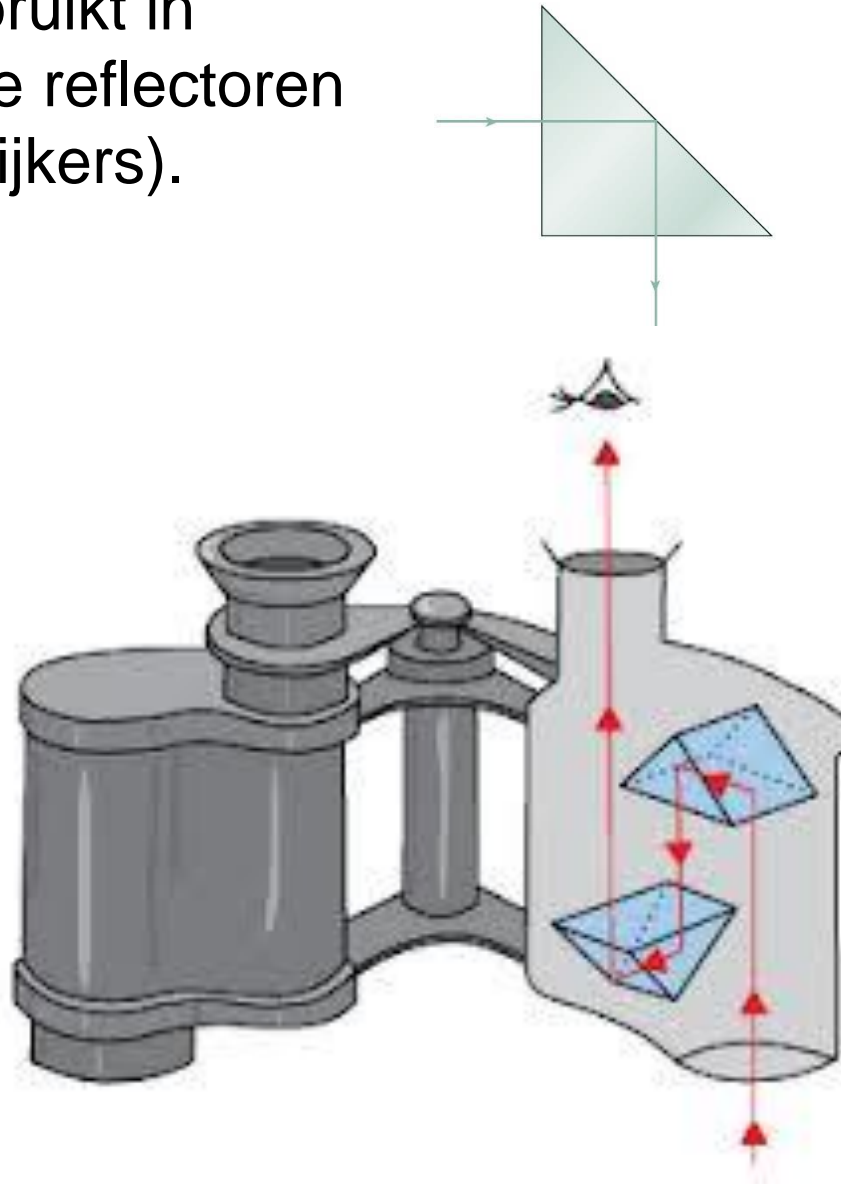
Van zodra $\theta > \theta_c$ zal er dus alleen nog (inwendige) reflectie optreden.

Toon aan, met Snellius, dat hieruit de voorwaarde voor de kritische hoek volgt.

$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin(90^\circ) = n_2$$

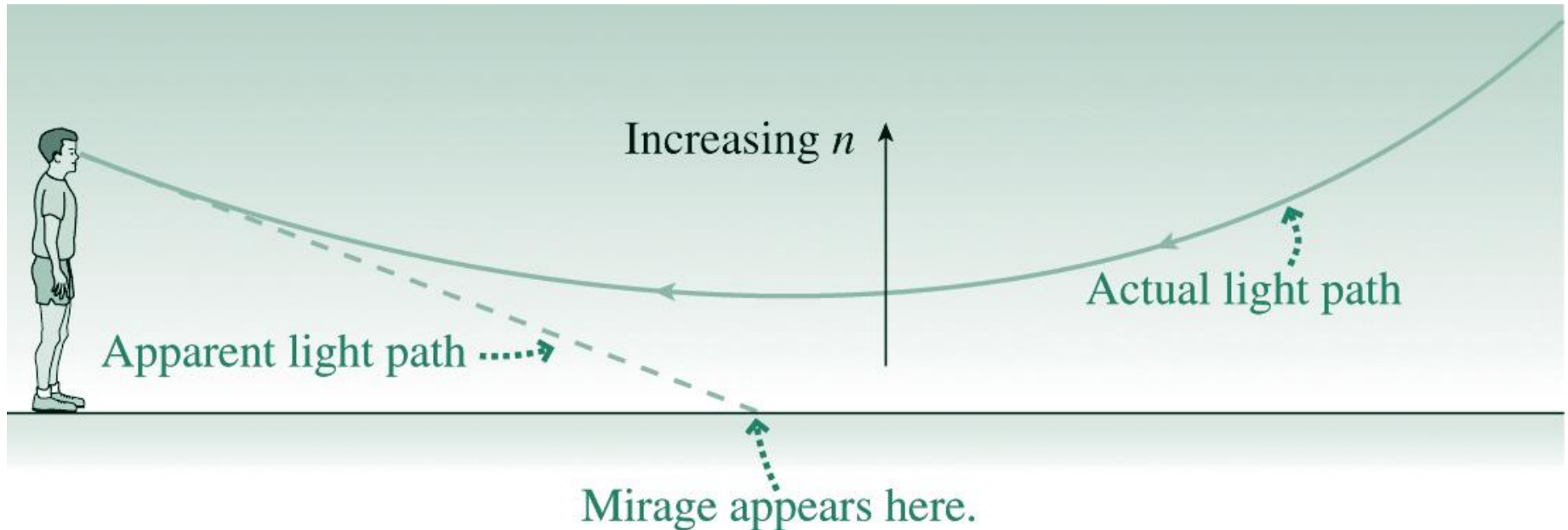
30.3 Totale Inwendige Reflectie (TIR)

- TIR wordt gebruikt in prismavormige reflectoren (o.a. in verrekijkers).



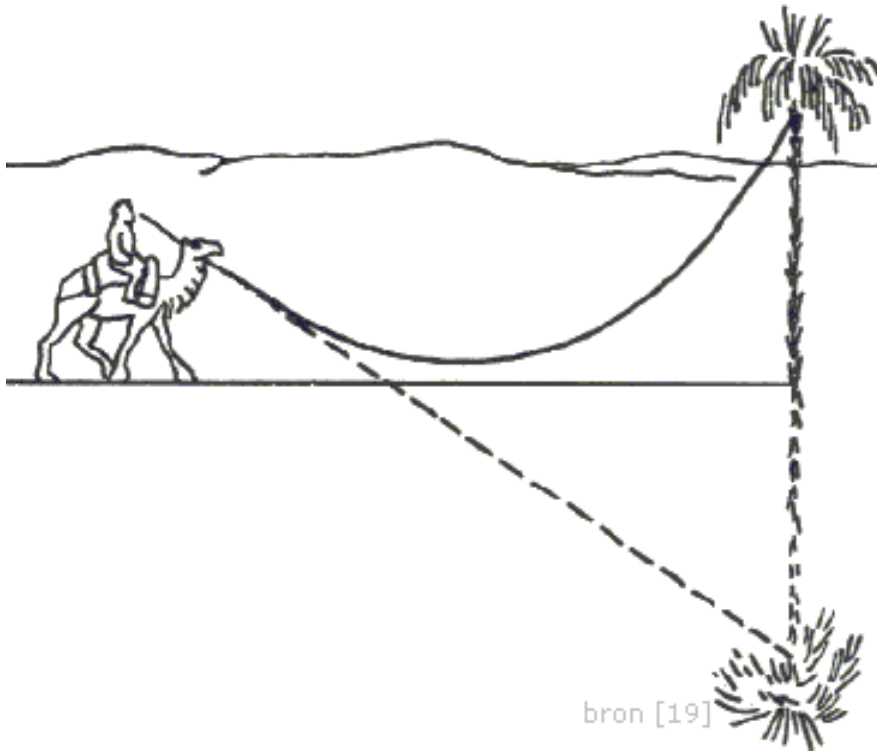
30.3 Totale Inwendige Reflectie (TIR)

- De temperatuursafhankelijkheid van de brekingsindex van lucht leidt tot luchtspiegelingen.



De onderste luchtlagen zijn door de lokale opwarming ijler (kleinere dichtheid) en dus ook optisch ijler.

30.3 Totale Inwendige Reflectie (TIR)

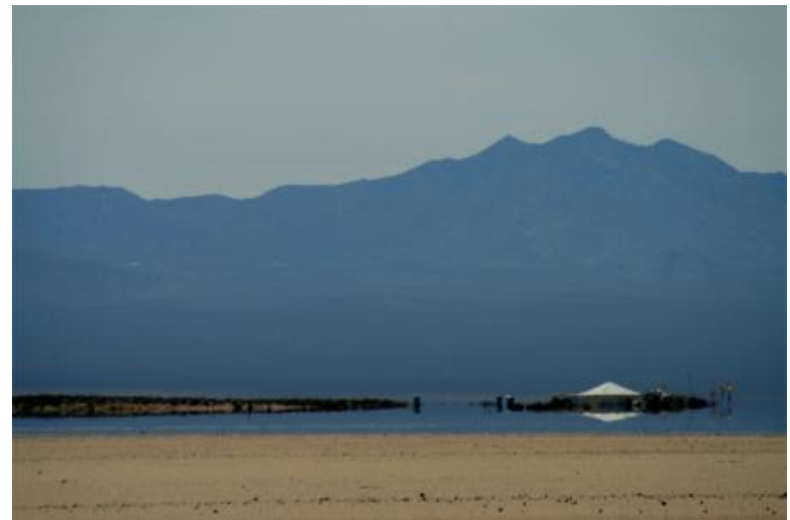


Fata morgana

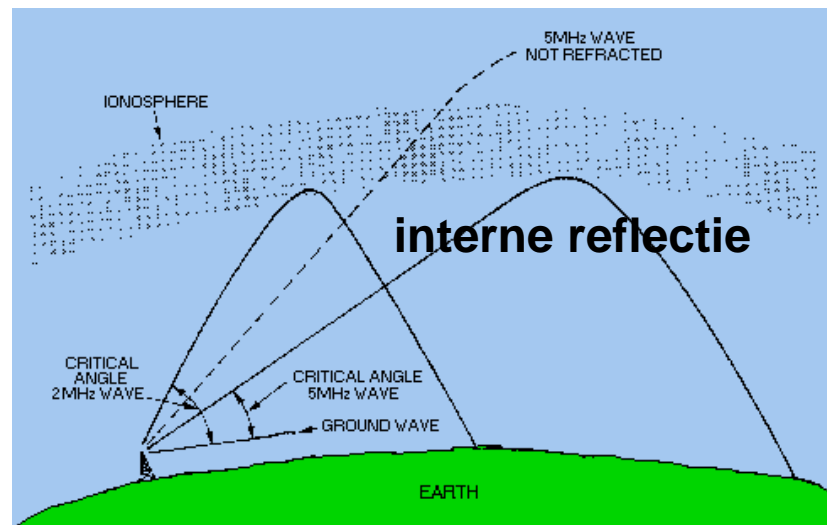
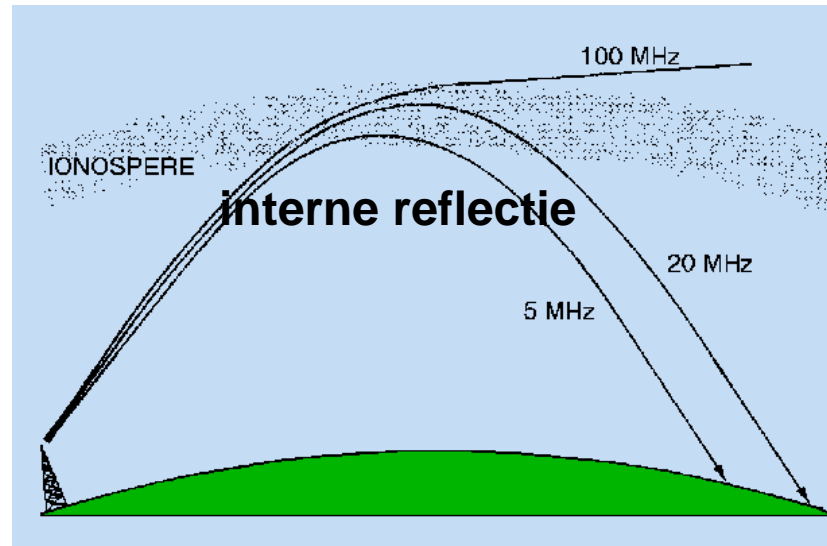
30.3 Lichtspiegelung



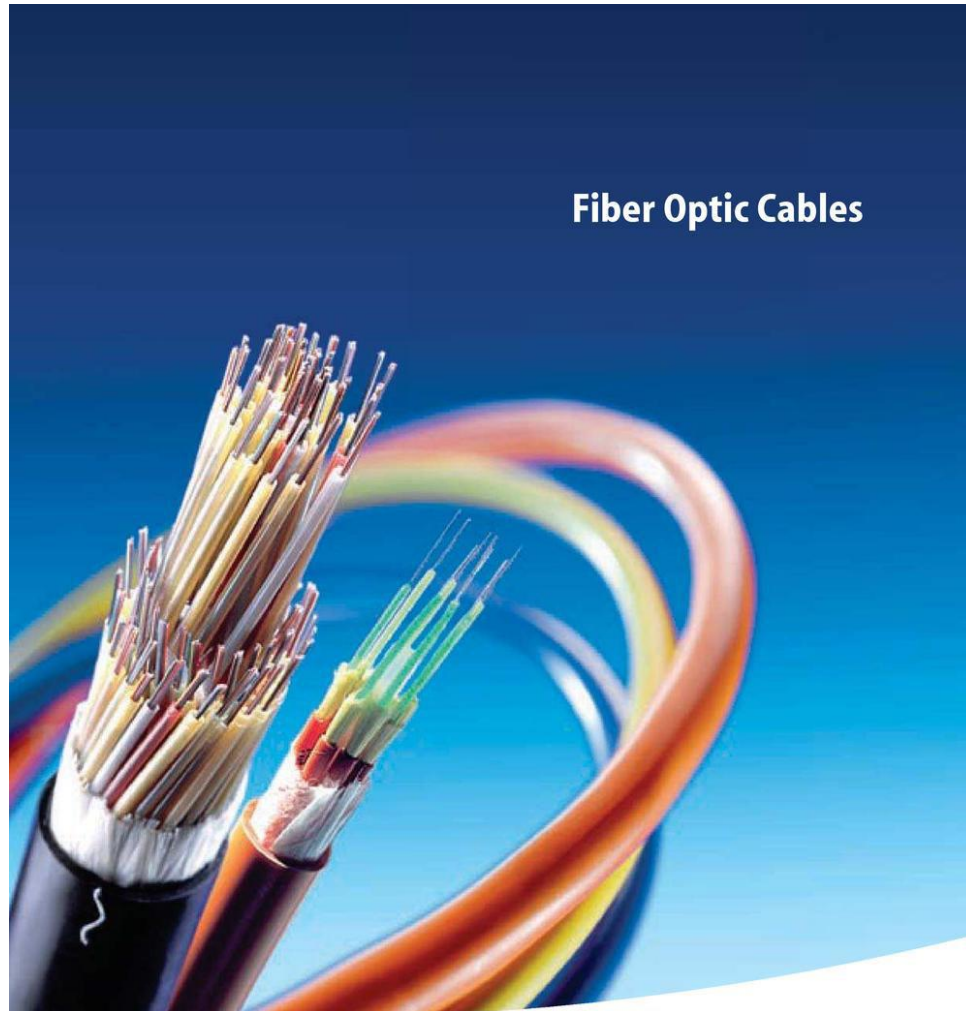
<https://www.youtube.com/watch?v=epeOGJcR2dE>



30.3 Totale Inwendige Terugkaatsing



30.3 Totale Inwendige Reflectie (TIR)



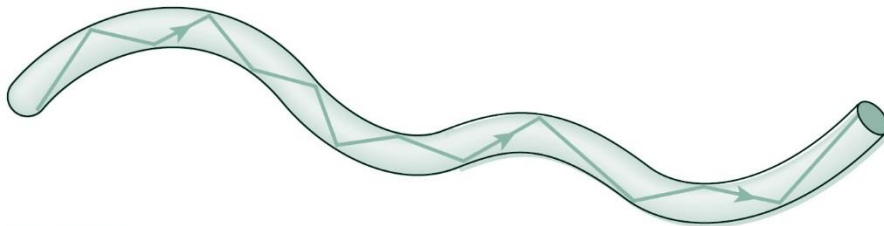
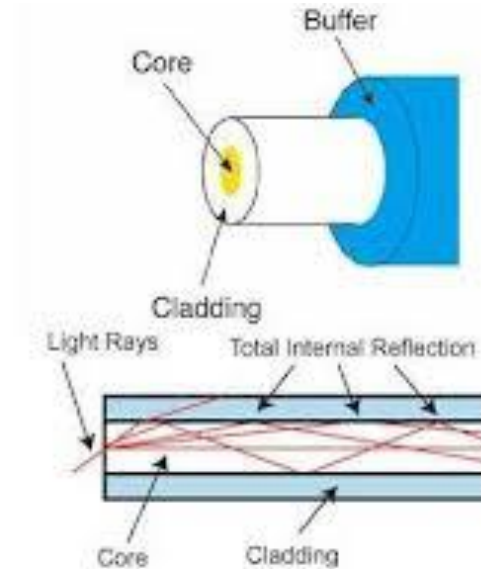
<http://www.youtube.com/watch?v=02wPSDOXMhc>

<http://www.youtube.com/watch?v=N1gWGnWzT88>

https://www.youtube.com/watch?v=N_kA8EpCUQo

30.3 Totale Inwendige Reflectie (TIR)

- TIR vormt de basis van werking van glasvezels (o.a. kabels voor telefoon, TV en data, endoscopen).



30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging

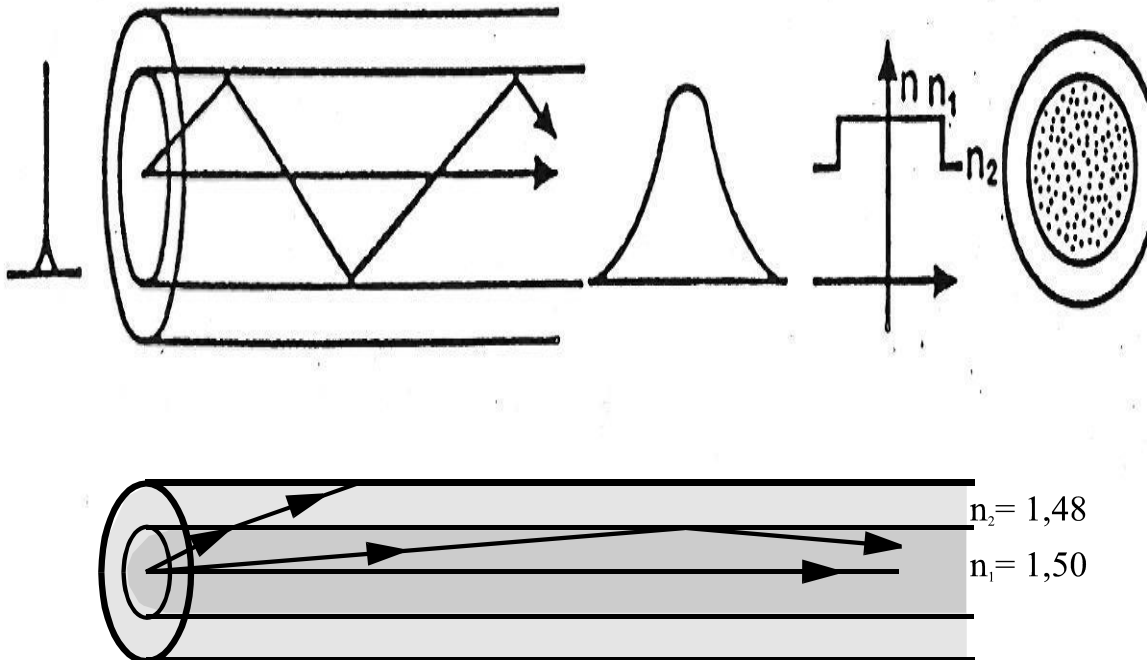
Ingang
signaal

A. De multimodevezels met
trapsgewijze indexprofiel

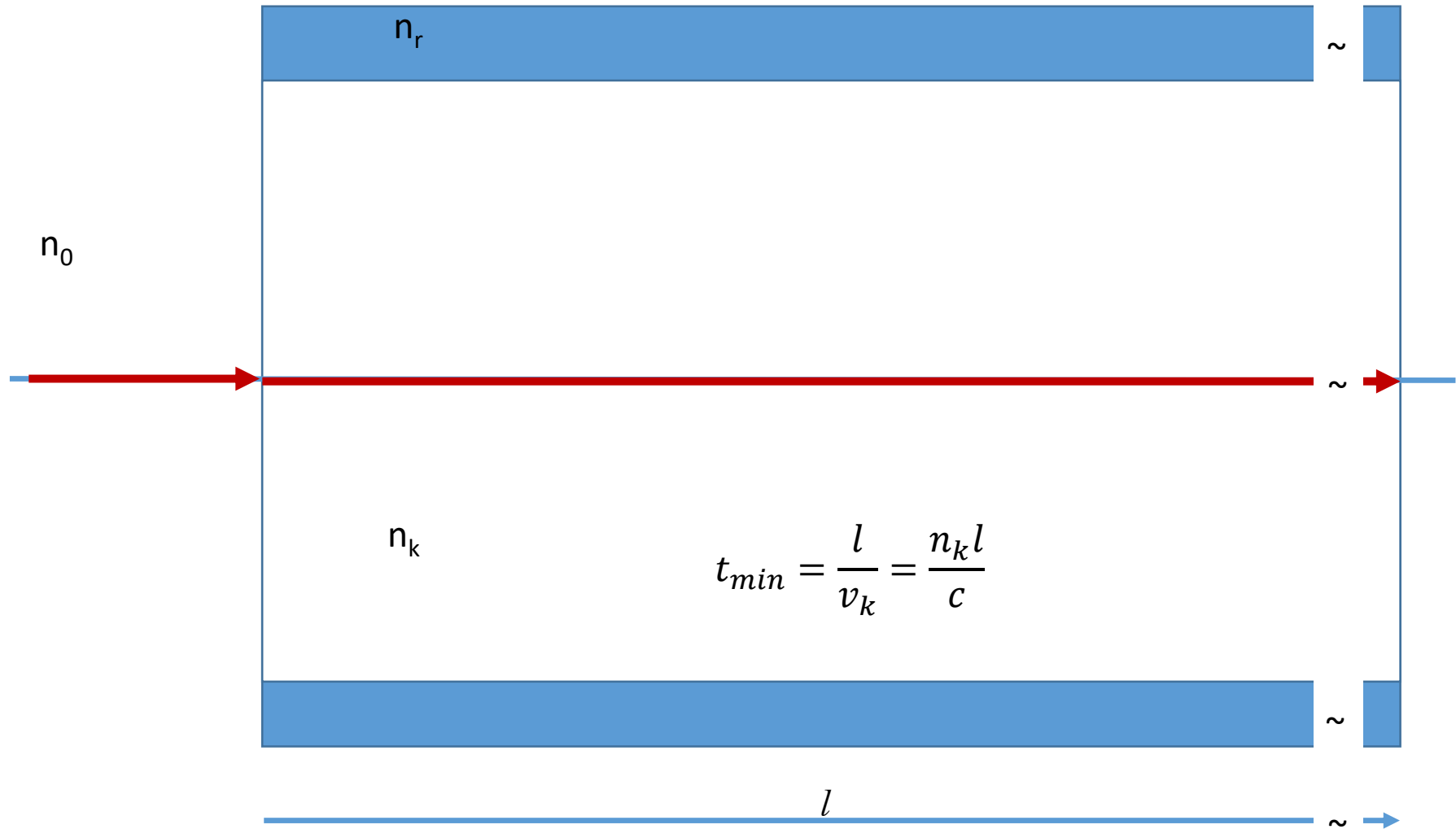
Uitgang
signaal

Brekingsindex
profiel

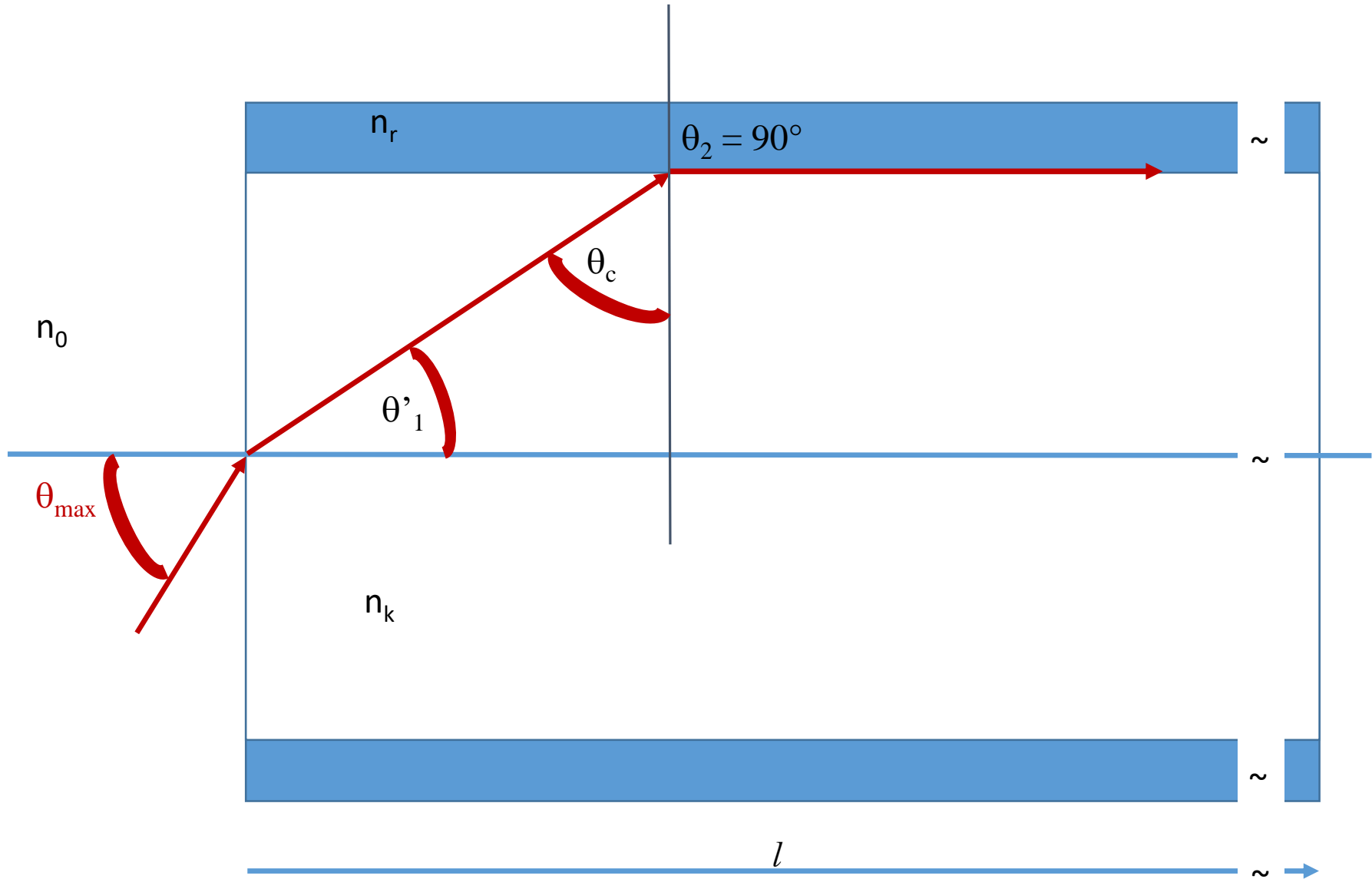
Doorsnede



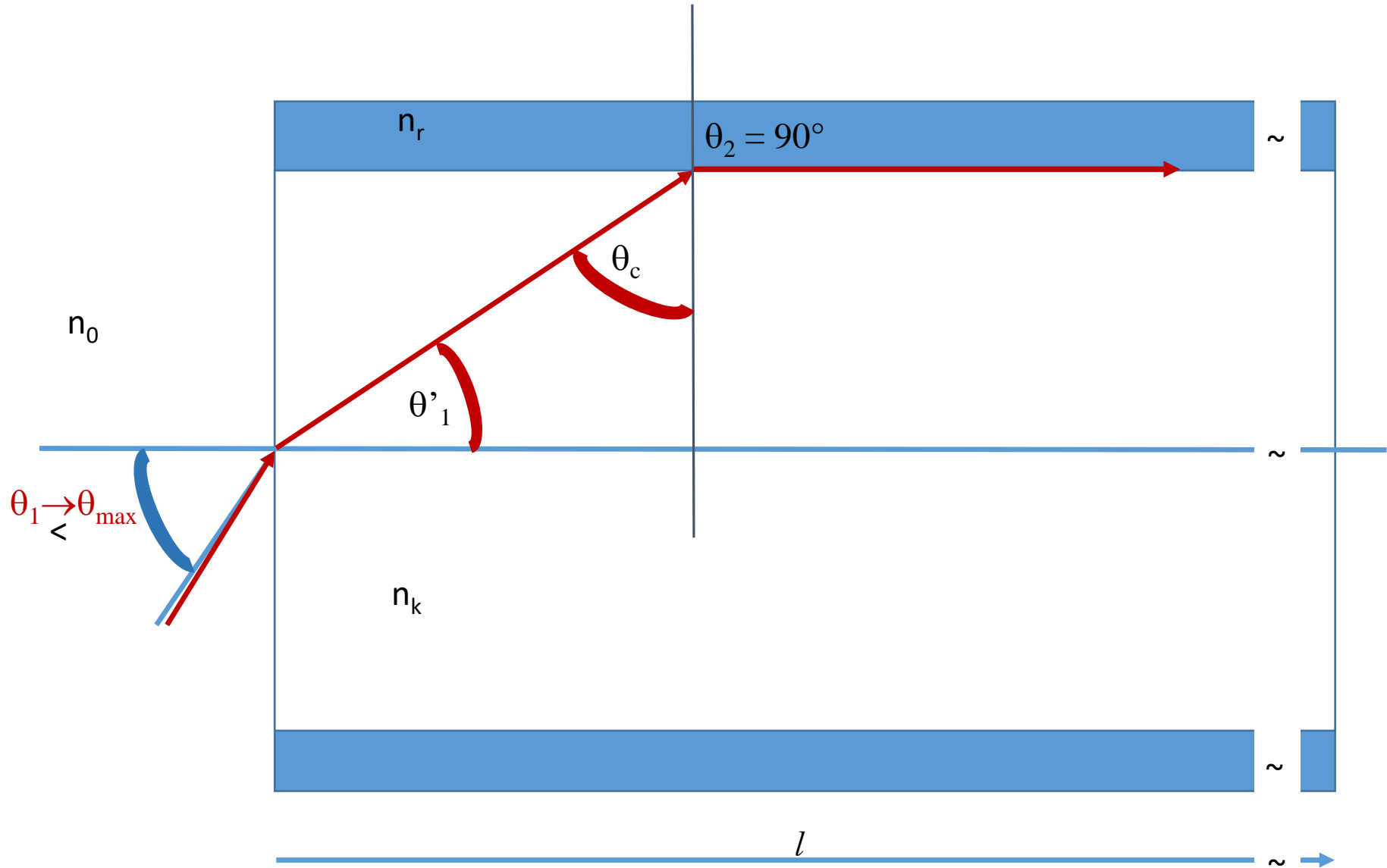
30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging



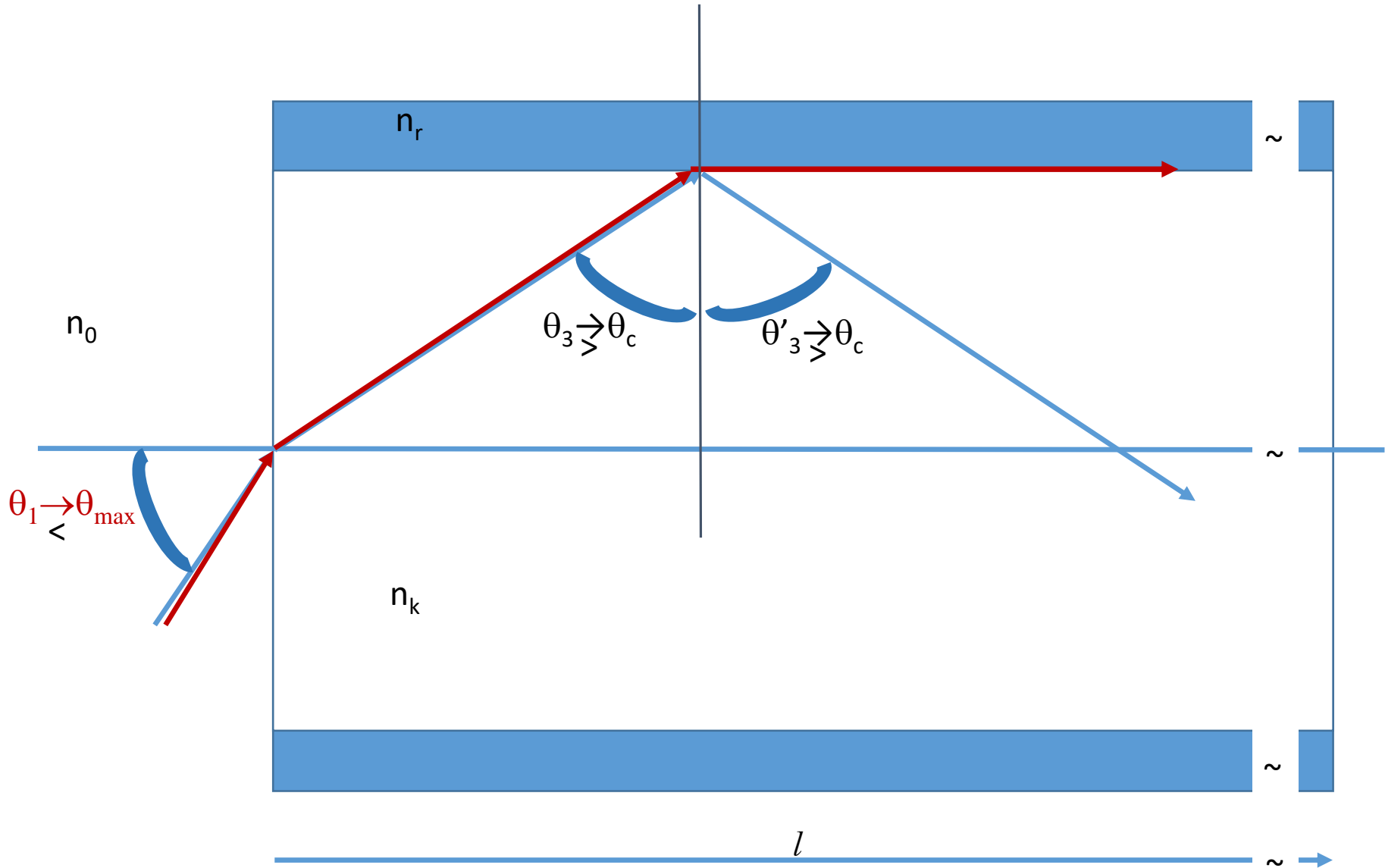
30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging



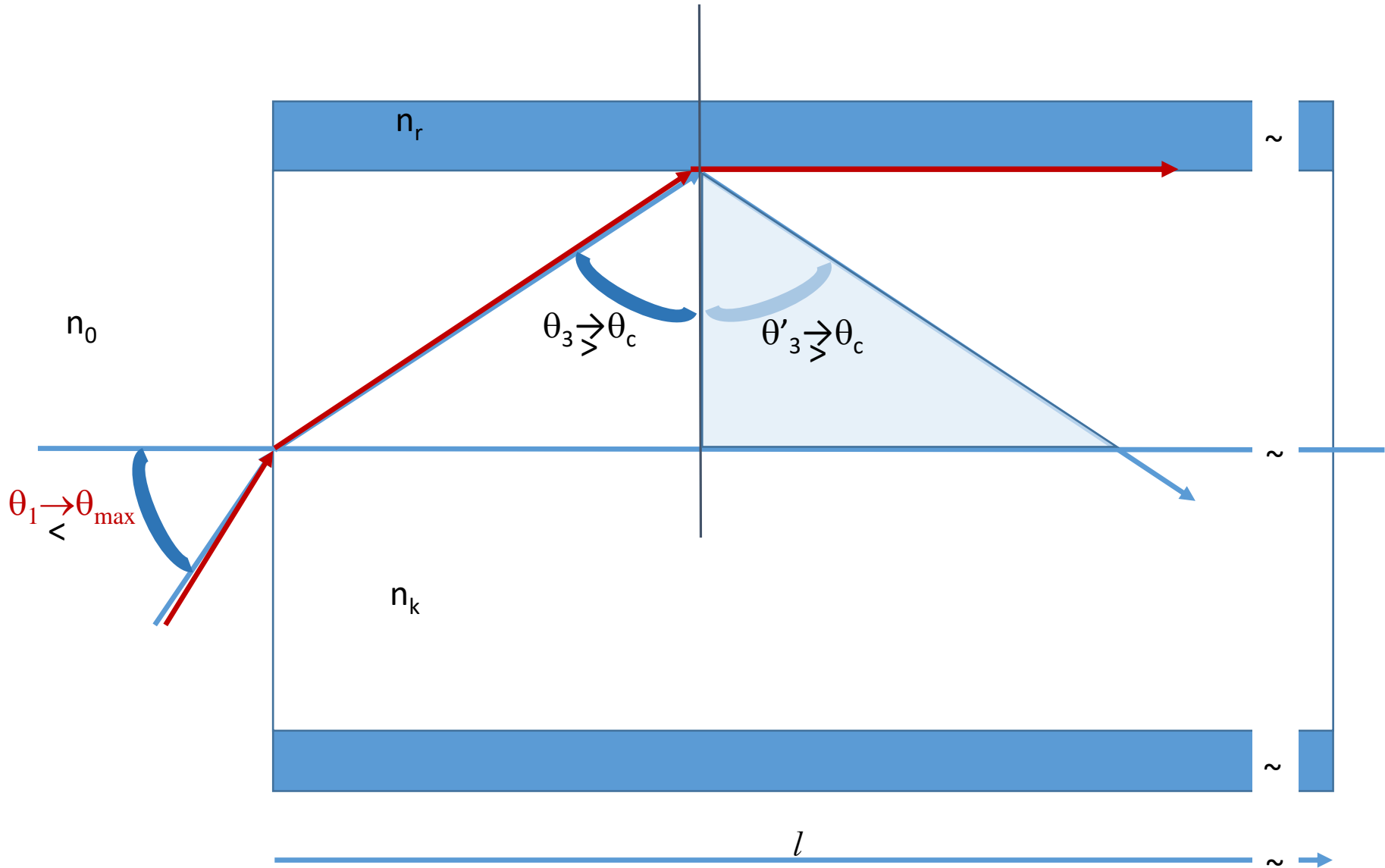
30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging



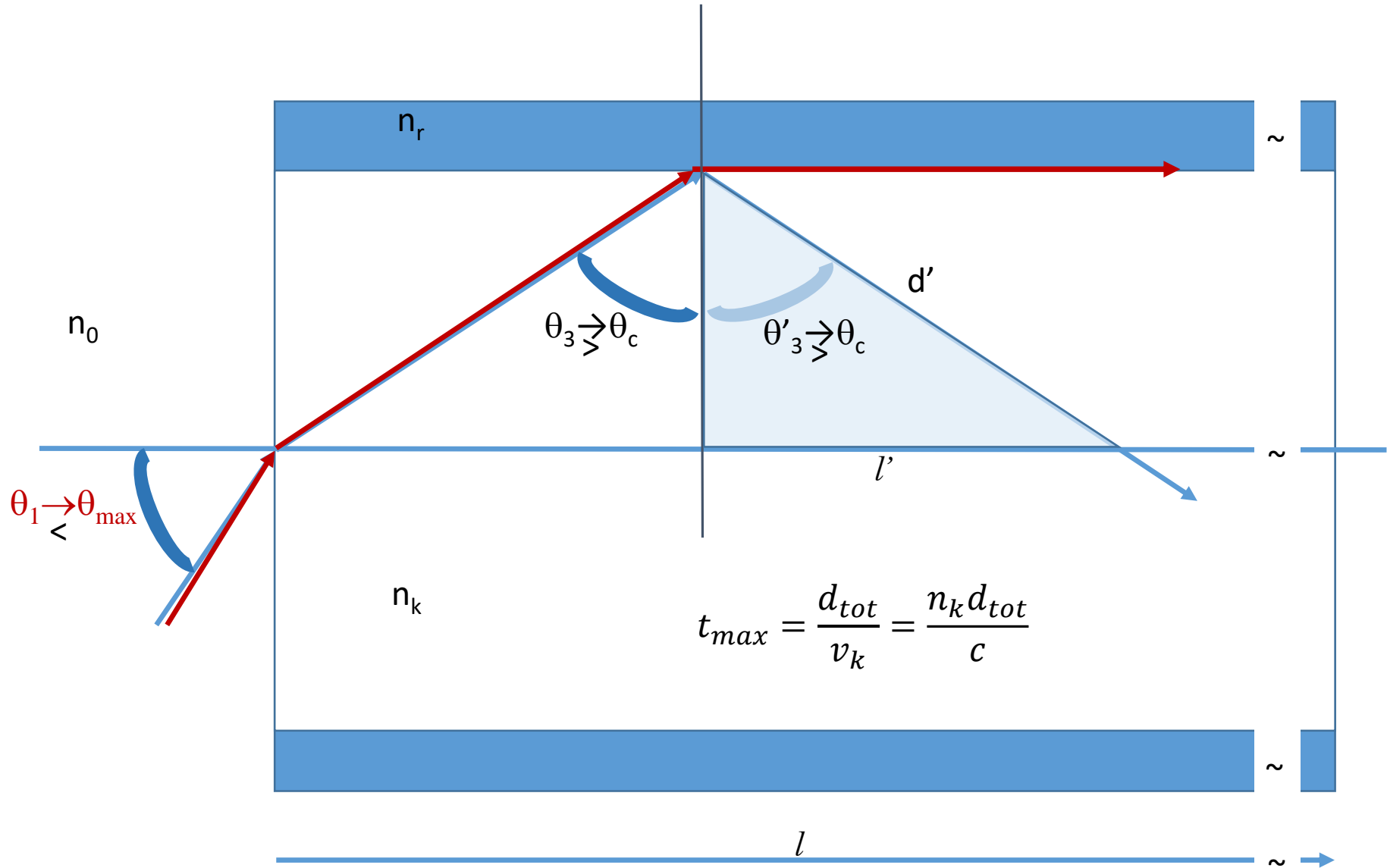
30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging



30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging



30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging



30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging

In de telecommunicatie worden smalle piekvormige pulsen doorgestuurd met tussenperiode T . Deze pieken verbreden echter bij doorgang door de glasvezel met lengte L tot een klokvormige puls met (tijds)breedte τ

Opdat de informatie nog leesbaar zou zijn moet zeker $\tau < T$.
In de praktijk neemt men $\tau < T/2$ of dus $T > 2\tau$ of $f \leq \frac{1}{2\tau}$

Stel $n_1 = n_k$ de brekingsindex van de kern en $n_2 = n_r$ deze van de mantel. Dan is $t_{\min} = L/v = L n_k / c$ en $t_{\max} = d_{\text{tot}} n_k / c$
met $d_{\text{tot}} = L / \sin \theta_c = L n_k / n_r$ (d_{tot} is de lengte van de meest “schuine” weg; cfr kritische hoek)

Bijgevolg wordt de pulsduurverlenging per doorlopen lengte L :

$$\frac{\tau}{L} = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{L} = \frac{n_k}{c} \left(\frac{n_k}{n_r} - 1 \right)$$

En de maximaal bruikbare frequentie : $f = \frac{1}{2\tau} = \frac{cn_r}{2n_k L (n_k - n_r)}$

30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging

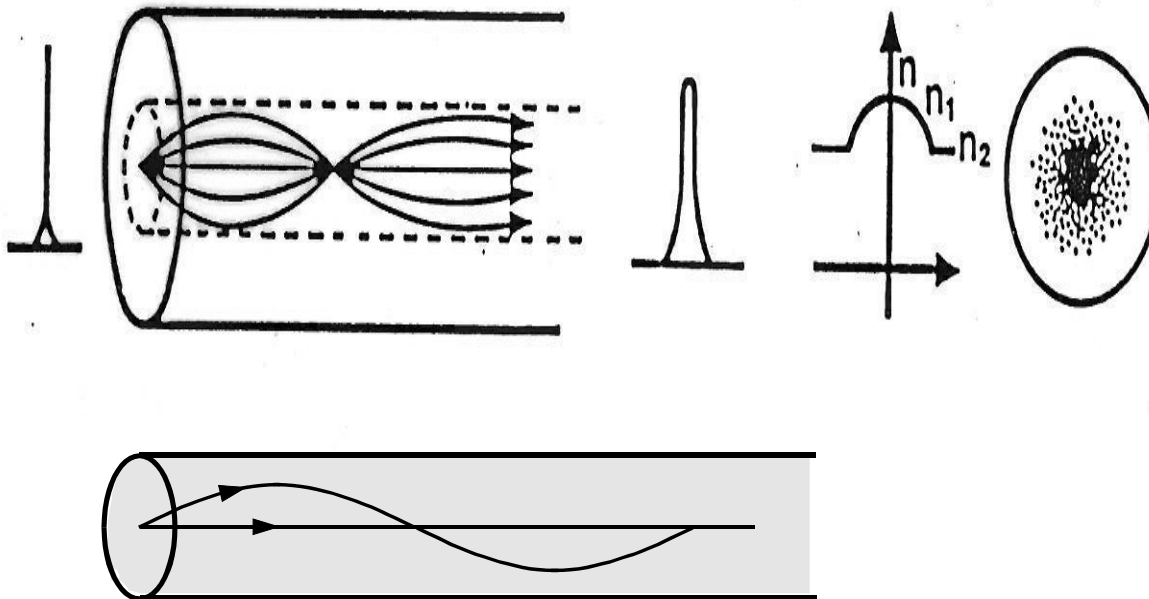
Ingang
signaal

B. Multimodevezels met
parabolisch indexprofiel

Uitgang
signaal

Brekingsindex
profiel

Doorsnede



30.3 Vezeloptica - pulsduurverlenging

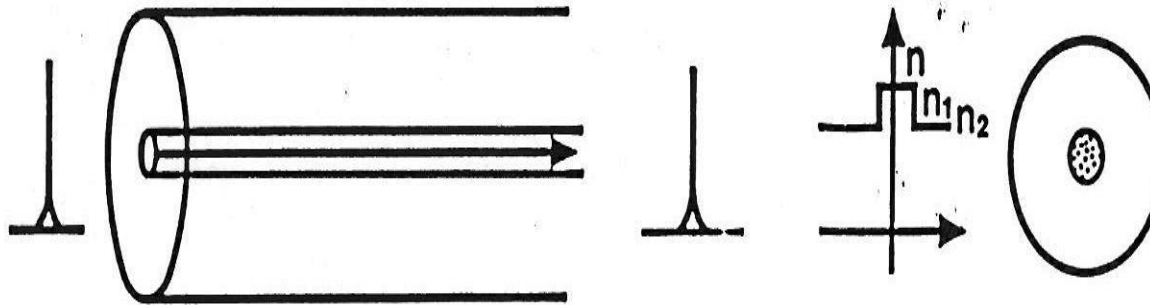
Ingang
signaal

C. De monomodevezel

Uitgang
signaal

Brekingsindex
profiel

Doorsnede



30.3 Totale Inwendige Terugkaatsing

27/10/14 : Onderzoekers van TU Eindhoven en University of Central Florida (CREOL) hebben data met een recordhoeveelheid van 255 Terabit per seconde weten te versturen met een nieuw type glasvezel.

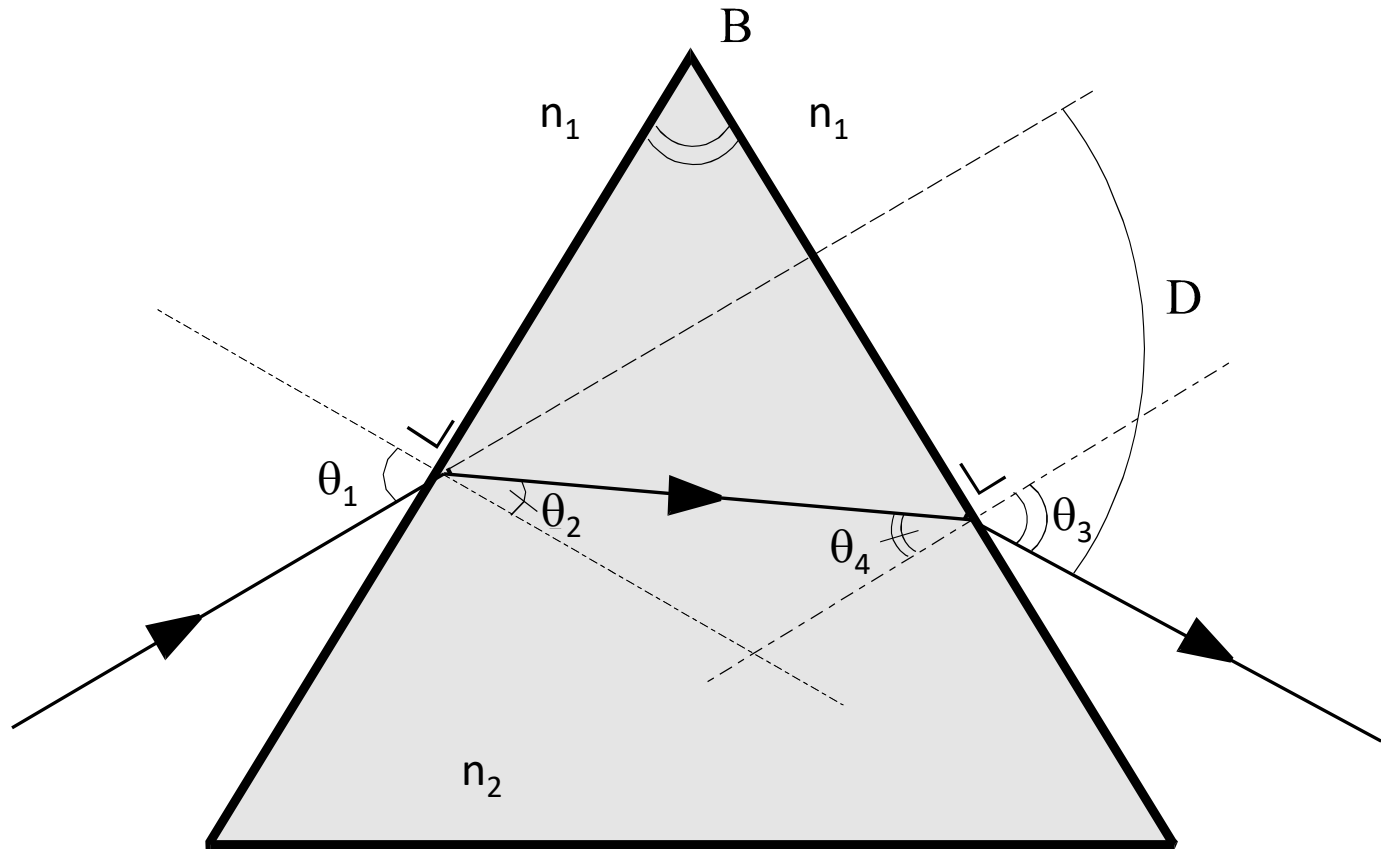
<https://www.tue.nl/universiteit/nieuws-en-pers/nieuws/27-10-2014-record-datatransport-twintig-keer-beter-dan-huidige-glasvezel/>

Meer dan twintig keer de huidige standaard

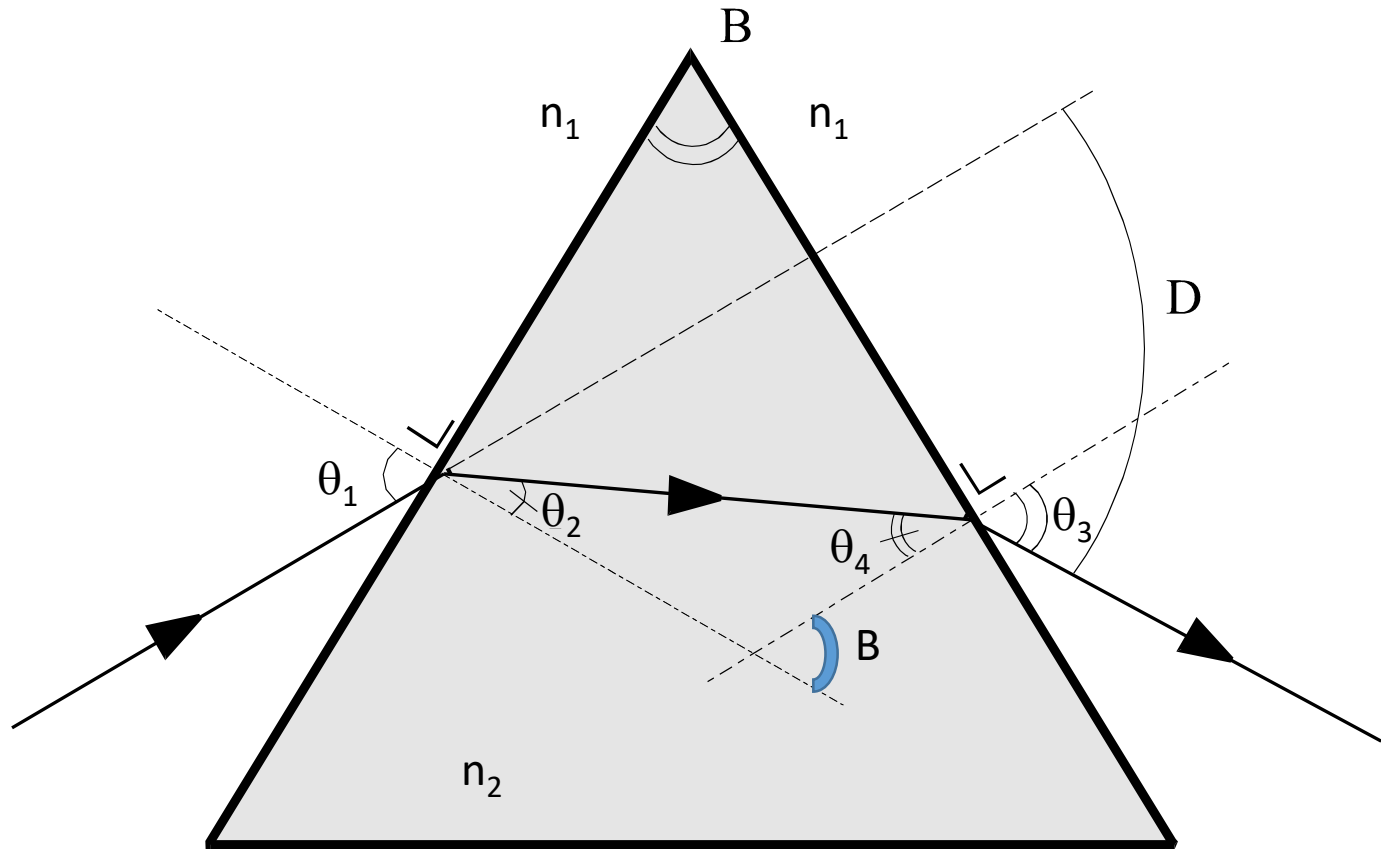
De nieuwe vezel bevat zeven verschillende kernen waar het licht doorheen kan reizen, in plaats van de enkele kern in de huidige commerciële glasvezels. Dat is alsof je van een eenrichtingsweg naar een zevenbaanssnelweg gaat. Daarnaast introduceert het team loodrecht hierop twee extra zogenoemde optische trillingsmodes – in dezelfde metafoor zouden nu drie auto's nu bovenop elkaar rijden. Door deze twee trucs te combineren wisten ze een datatransport van 255 Terabit/s te realiseren. Dat is ruim 20 keer de huidige standaard in commerciële glasvezels van 4-8 Terabit/s

[Test je internetspeed](#)

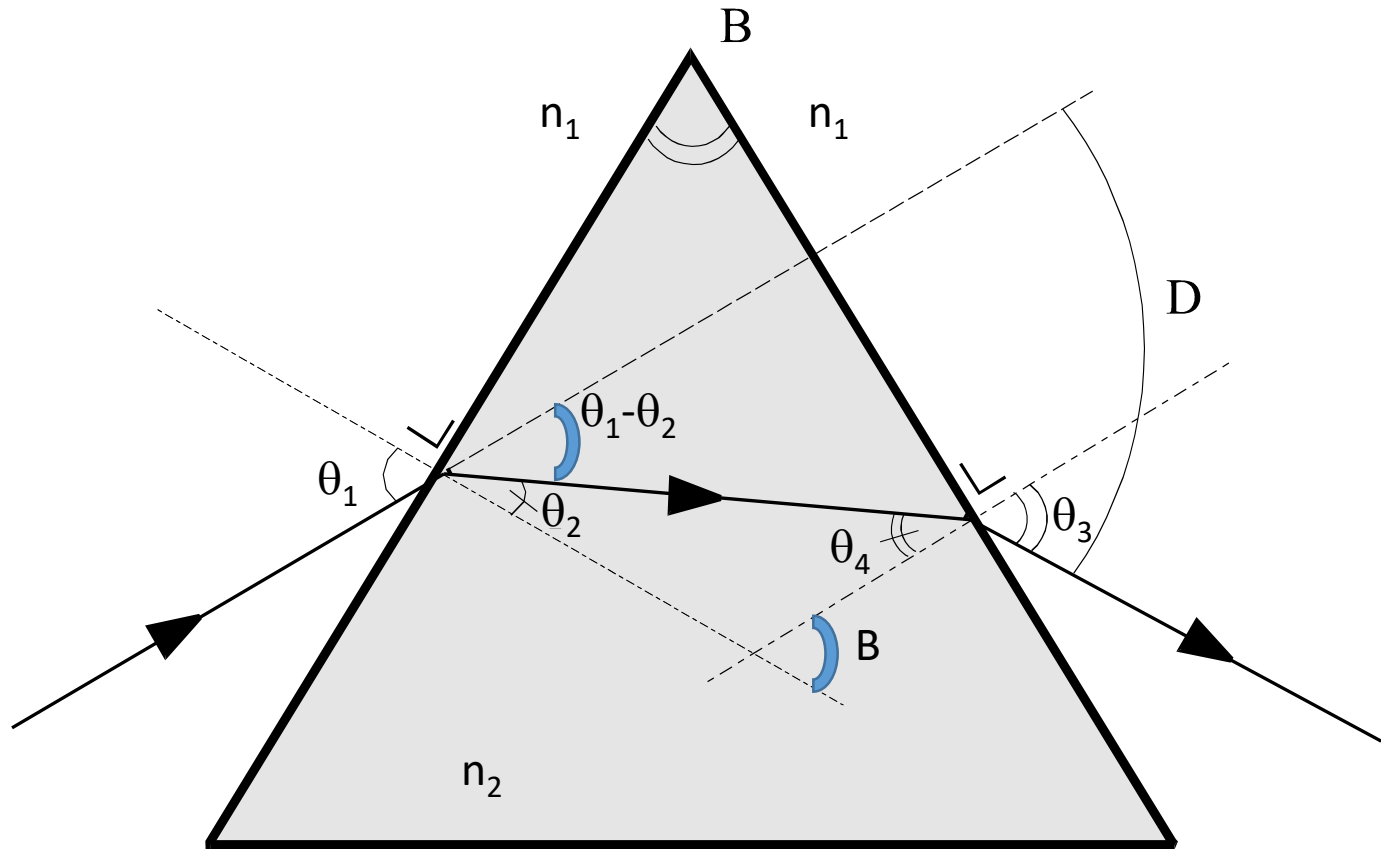
30.4 Dispersie in Prisma's - Stralengang



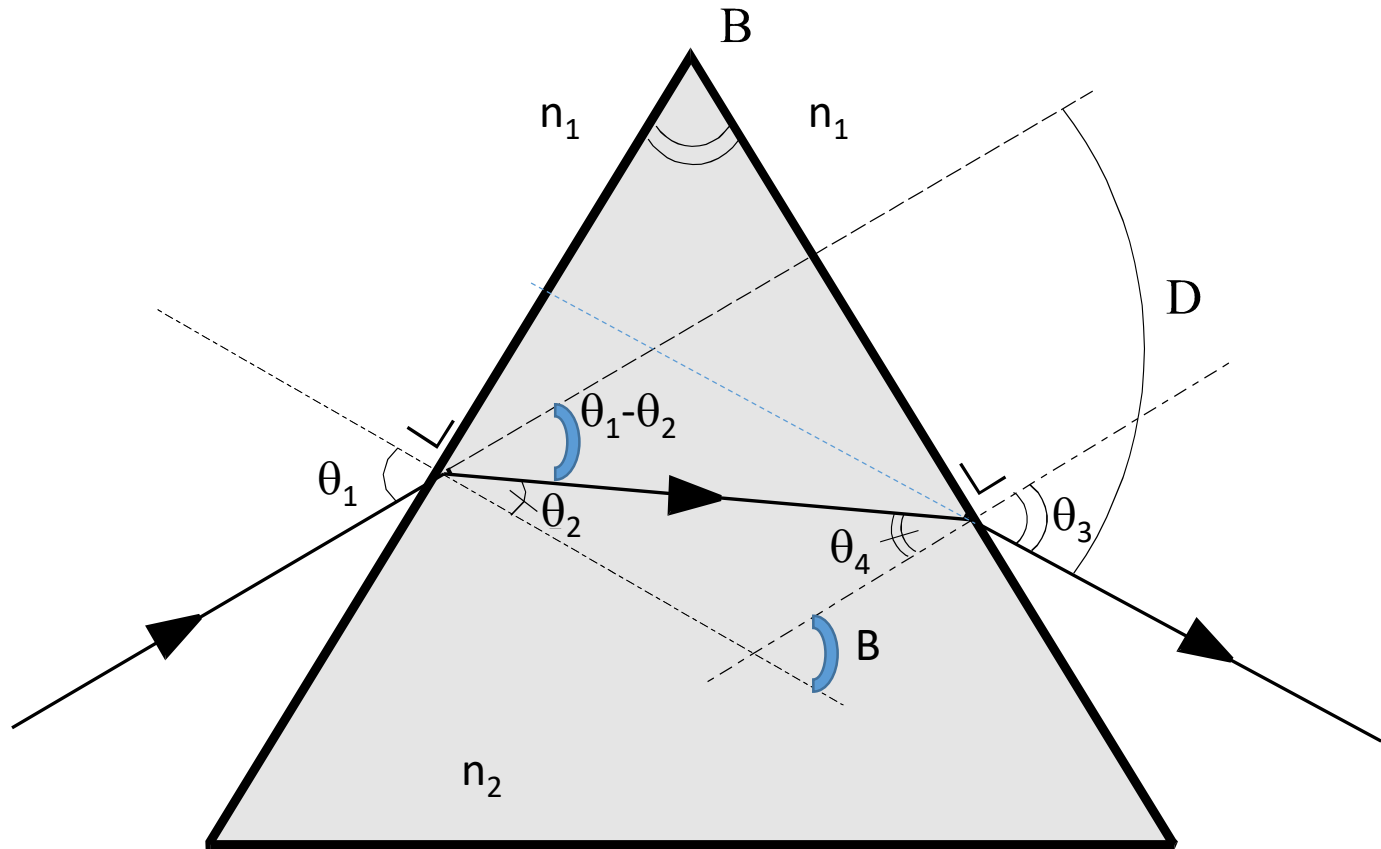
30.4 Dispersie in Prisma's - Stralengang



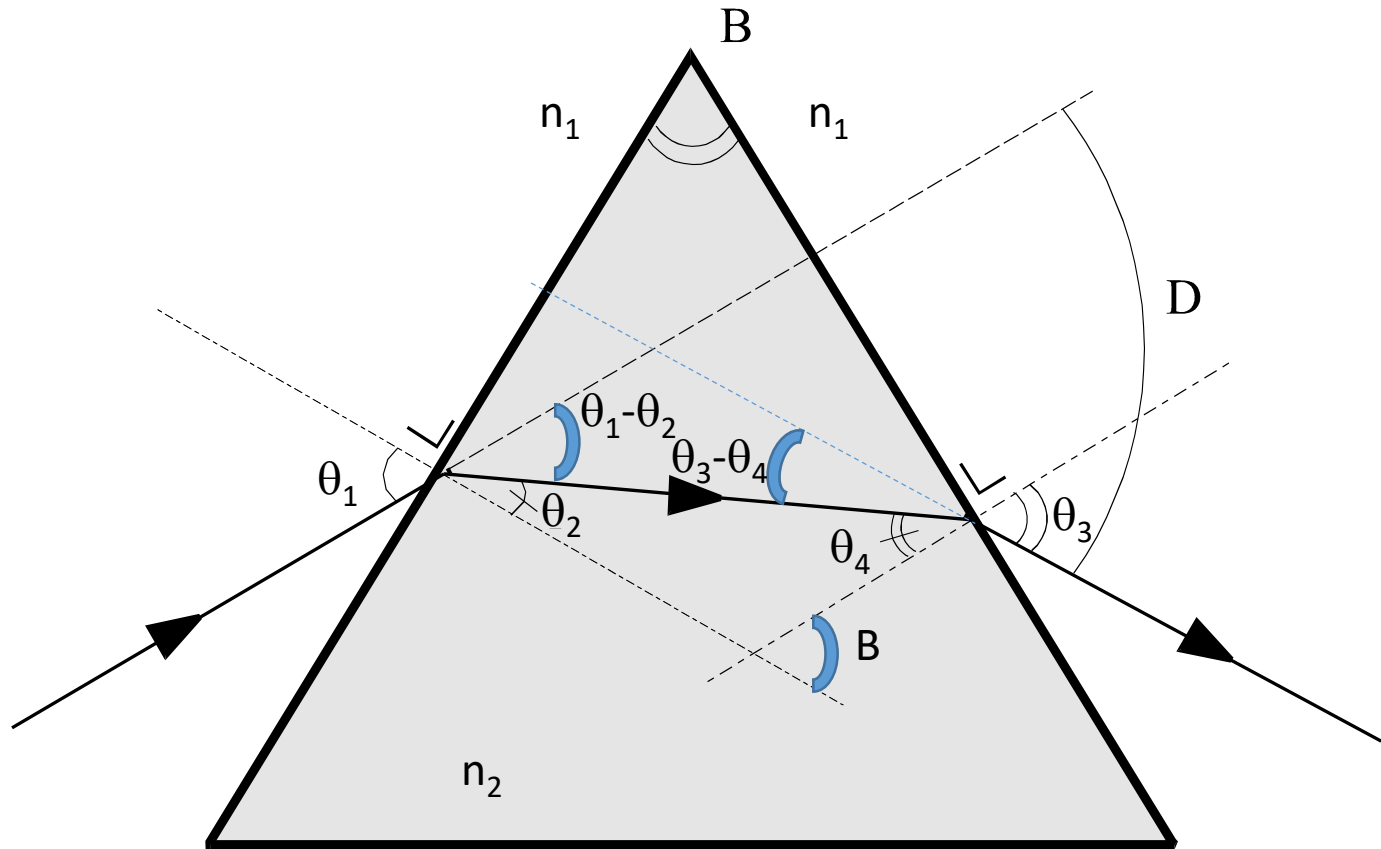
30.4 Dispersie in Prisma's - Stralengang



30.4 Dispersie in Prisma's - Stralengang



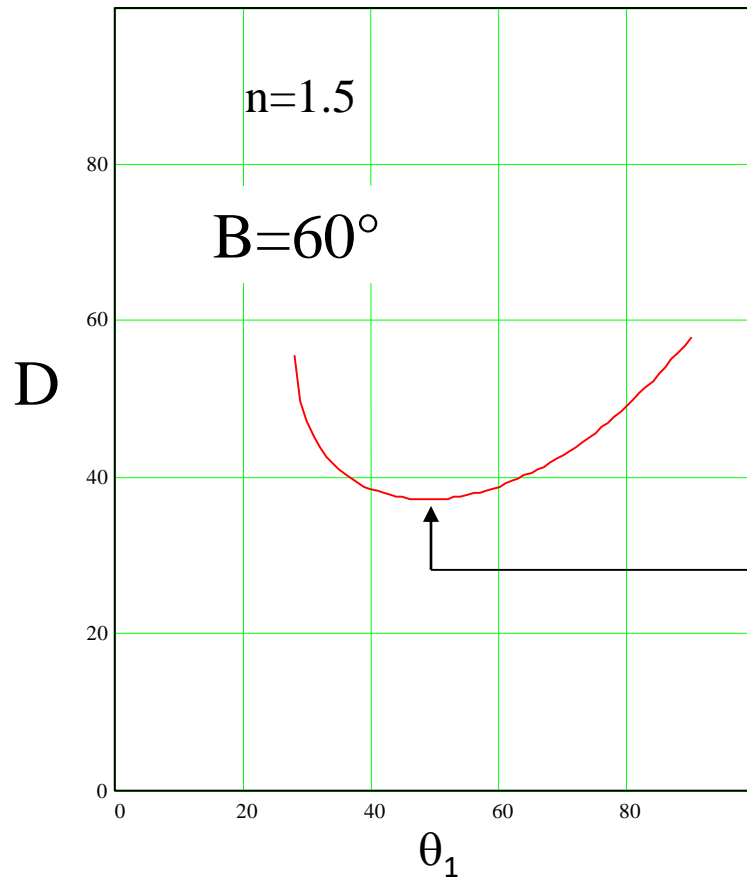
30.4 Dispersie in Prisma's - Stralengang



$$\frac{n_2}{n_1} = n_{1 \rightarrow 2}$$

30.4 Dispersie in Prisma's - Minimumdeviatie

Deviatiehoek (D) als functie van de hoek van inval



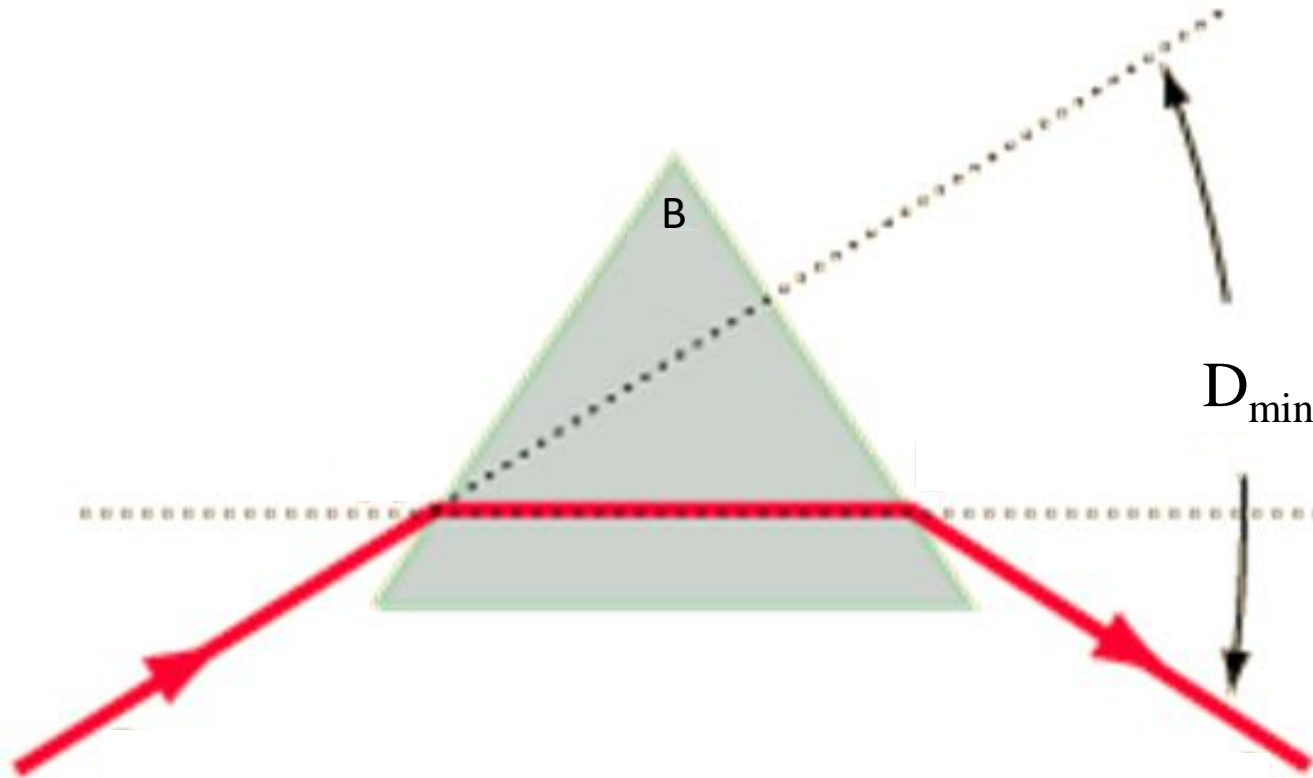
Bij minimale deviatie geldt:

$$n = \frac{\sin \frac{D_{\min} + B}{2}}{\sin \frac{B}{2}}$$

minimumdeviatie

zeer nauwkeurige methode om de **brekingsindex** van een optisch materiaal te meten als functie van de golflengte.

30.4 Dispersie in Prisma's - Stralengang



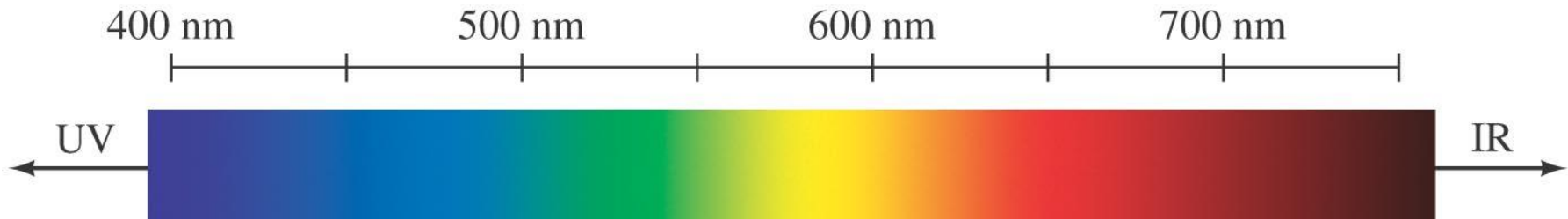
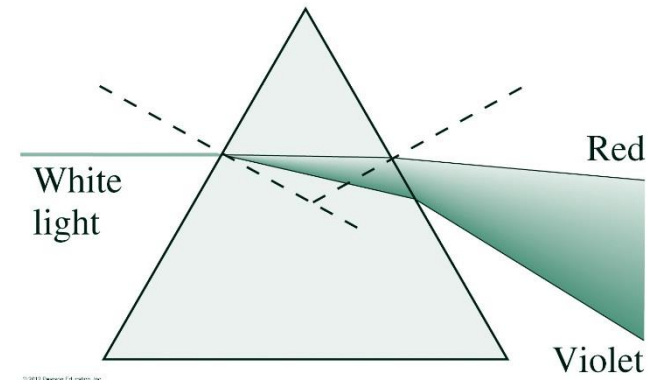
$$n = \frac{\sin \frac{D_{\min} + B}{2}}{\sin \frac{B}{2}}$$

30.4 Dispersie

- De brekingsindex hangt af van de golflengte, en dus worden de verschillende golflengten (=kleuren) in verschillende richtingen gebroken.
- Het empirisch verband tussen brekingsindex n en golflengte λ wordt gegeven door de formule van Cauchy

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

- Daarom ontbindt een prisma wit licht in zijn verschillende kleuren.

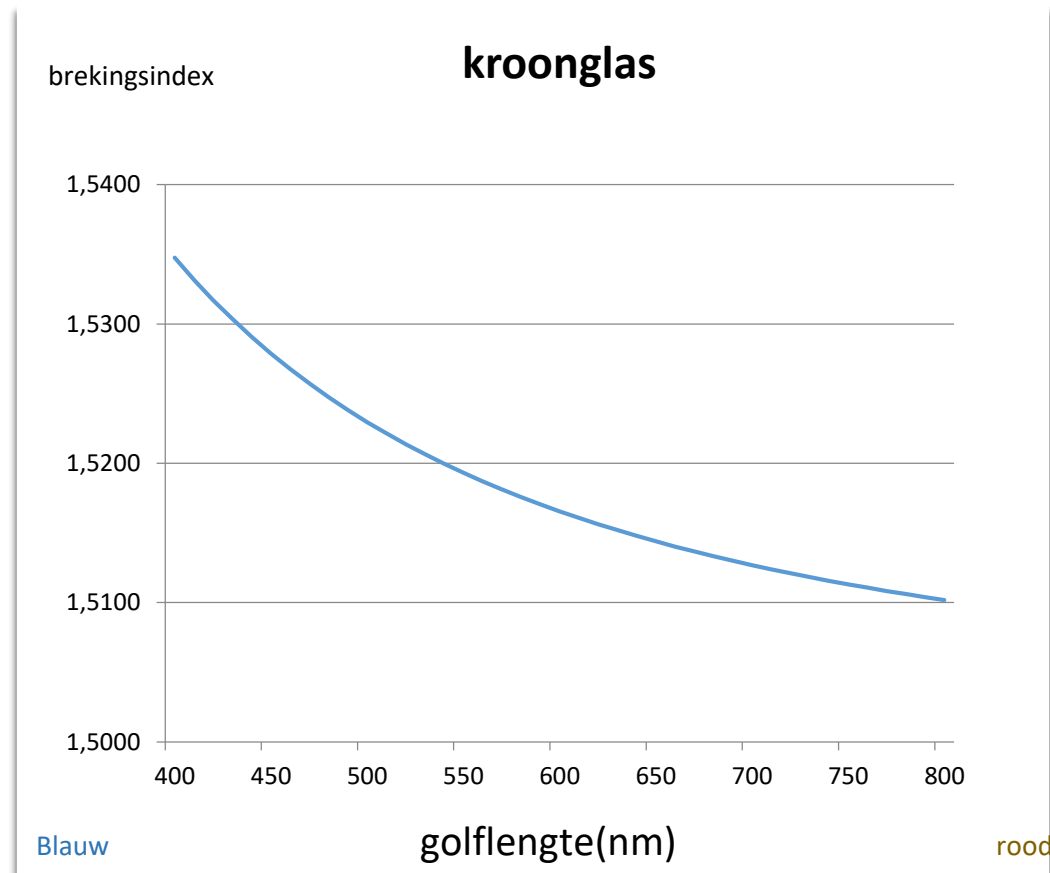


30.4 Dispersie

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

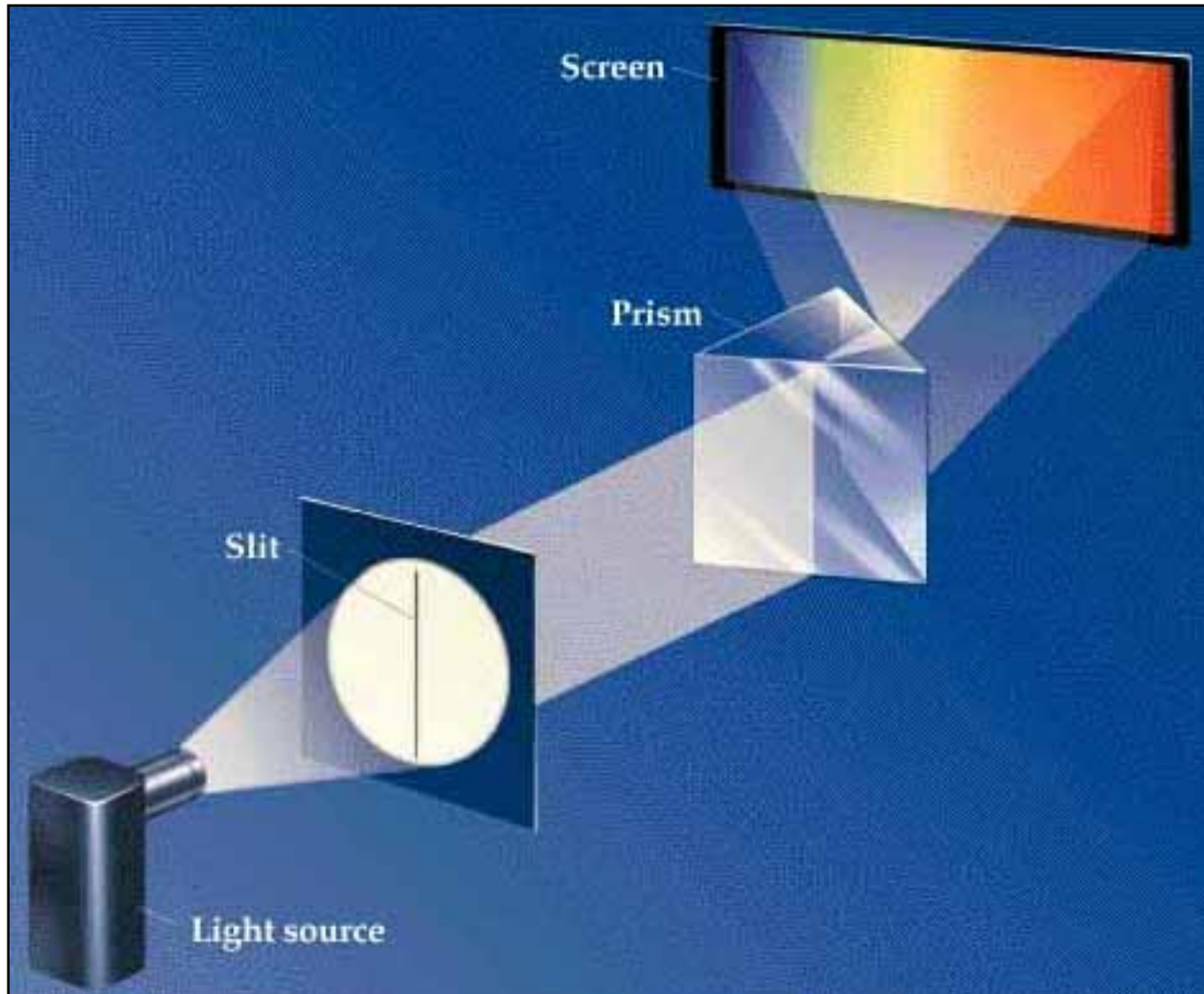
$$A = 1,502$$

$$B = 5,24 \cdot 10^{-15} \text{m}^2$$

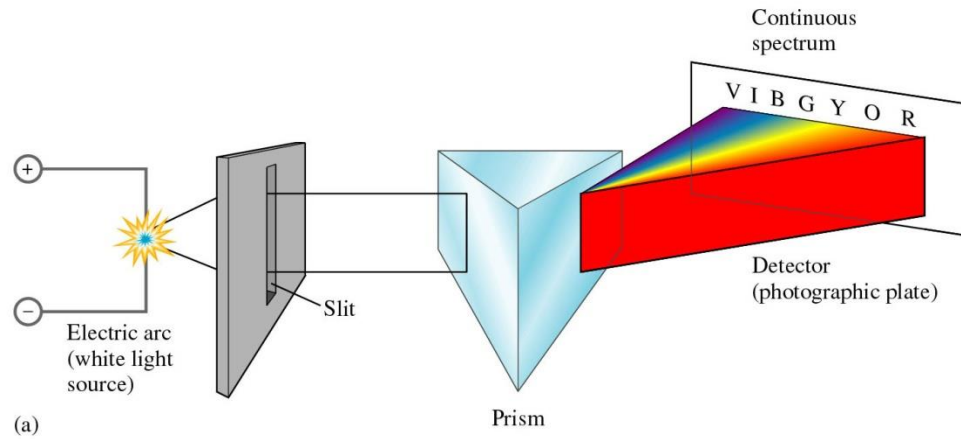


30.4 Dispersie in Prisma's - Spectra

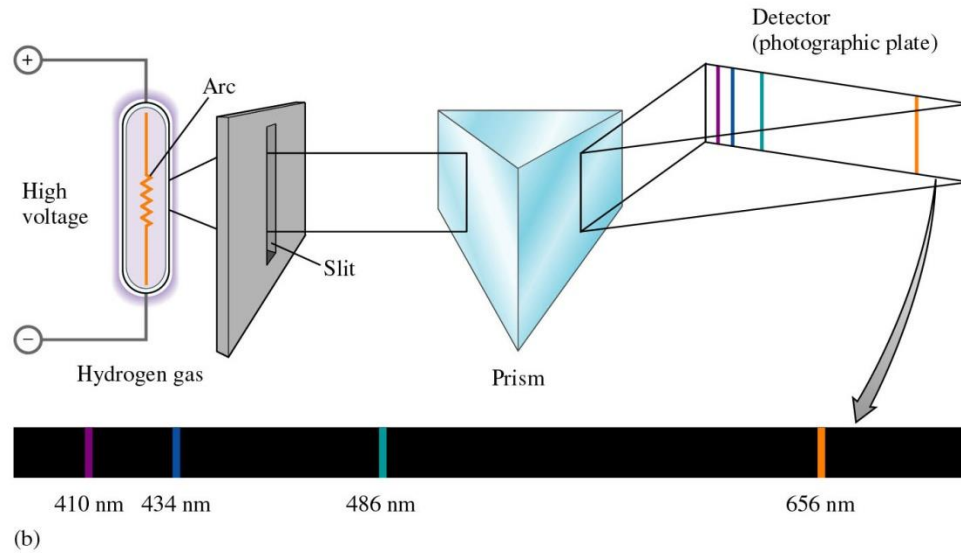
Ontstaan van een emissiespectrum



30.4 Dispersie in Prisma's - Spectra

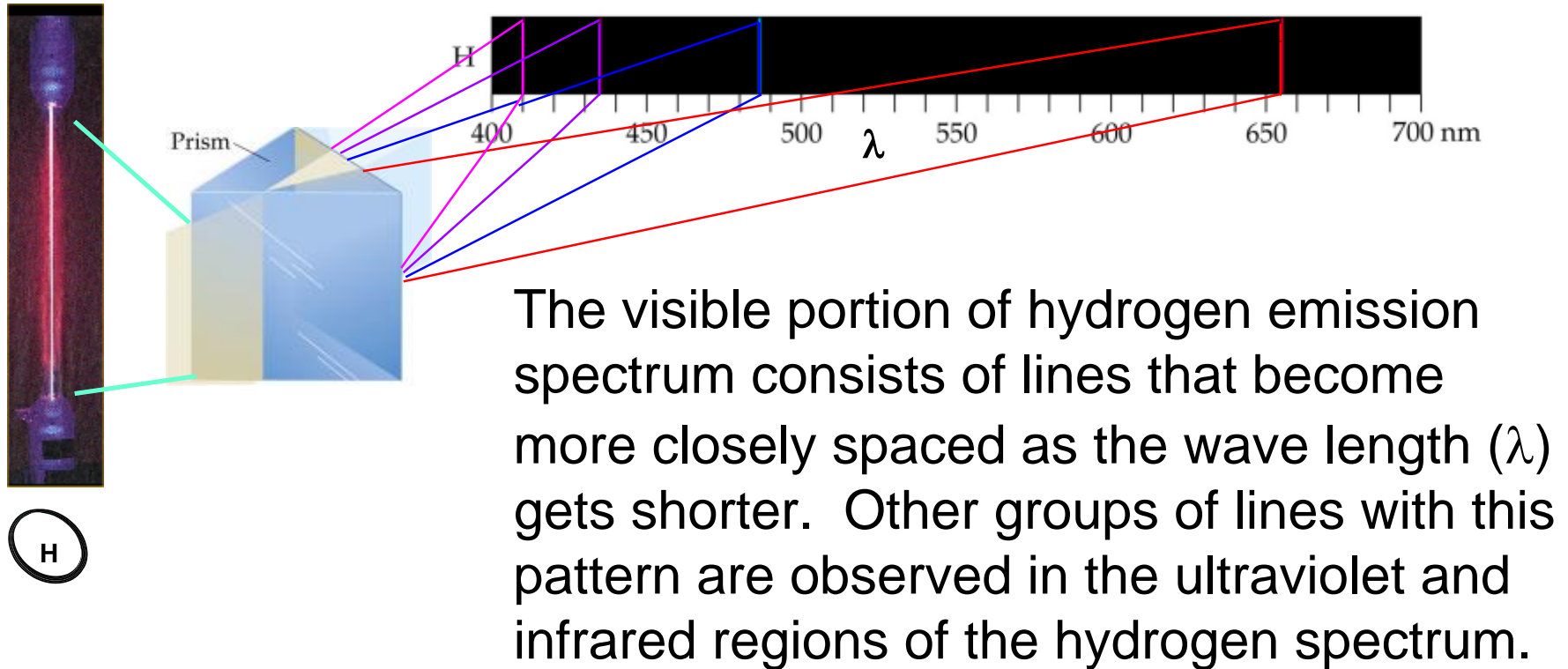


continu spectrum



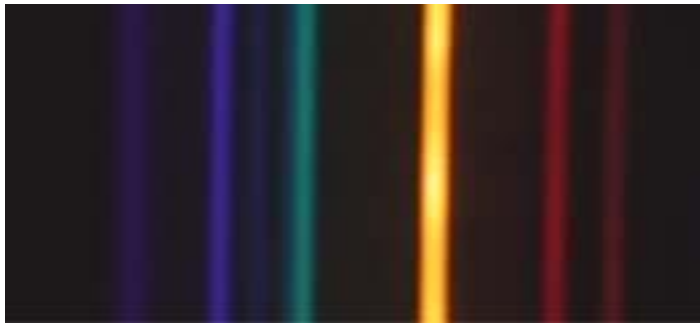
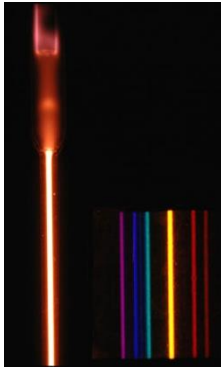
lijnenspectrum

30.4 Dispersie in Prisma's - Spectra



30.4 Dispersie in Prisma's - Spectra

He-spectrum



Helium
wavelengths (nm)

443.755 w

447.148 s

471.314 m

492.193 m

501.567 s

587.562 s

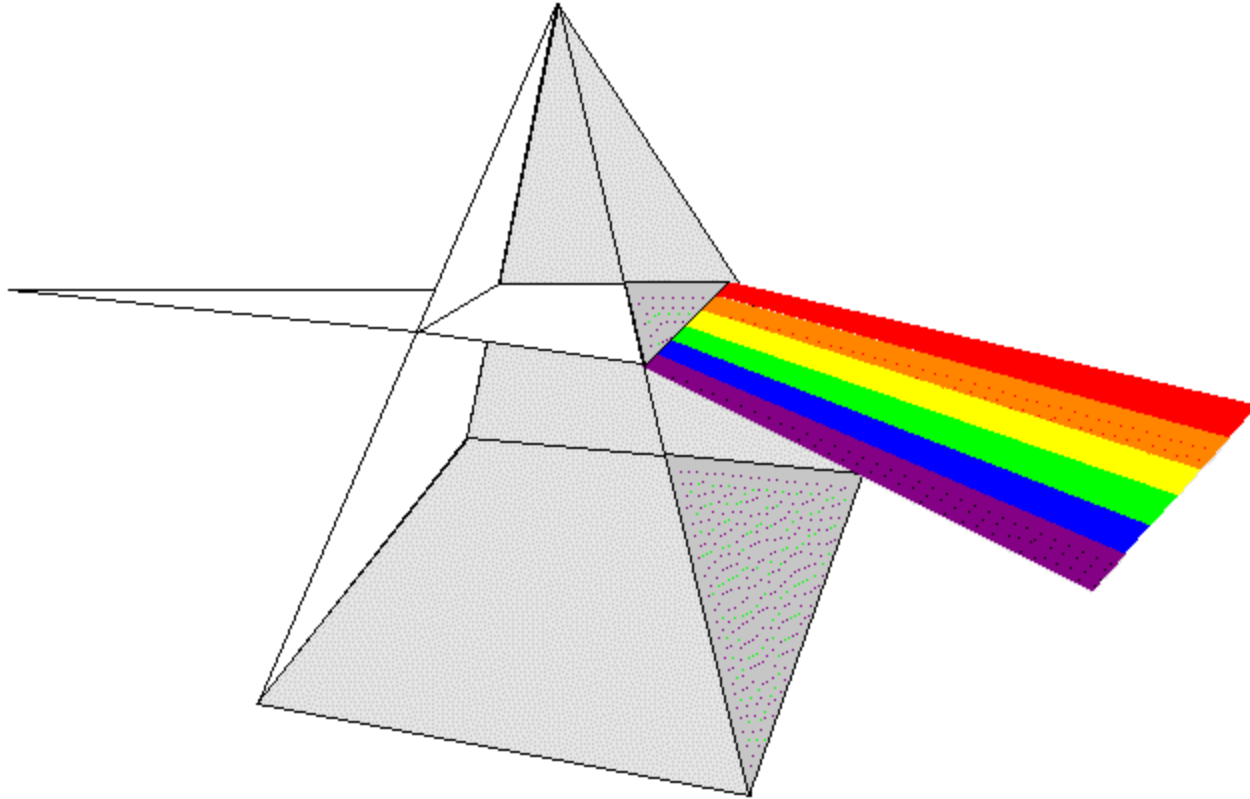
d-lijn van He

667.815 m

s=strong, m=med, w=weak

30.4 Dispersie

- Wat is hier verkeerd?

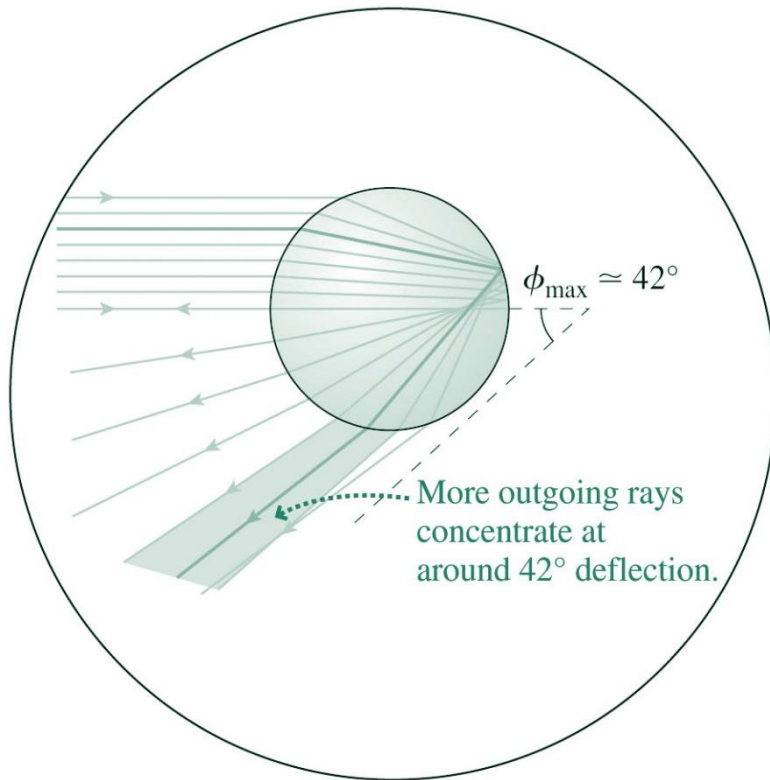


30.4 Dispersie



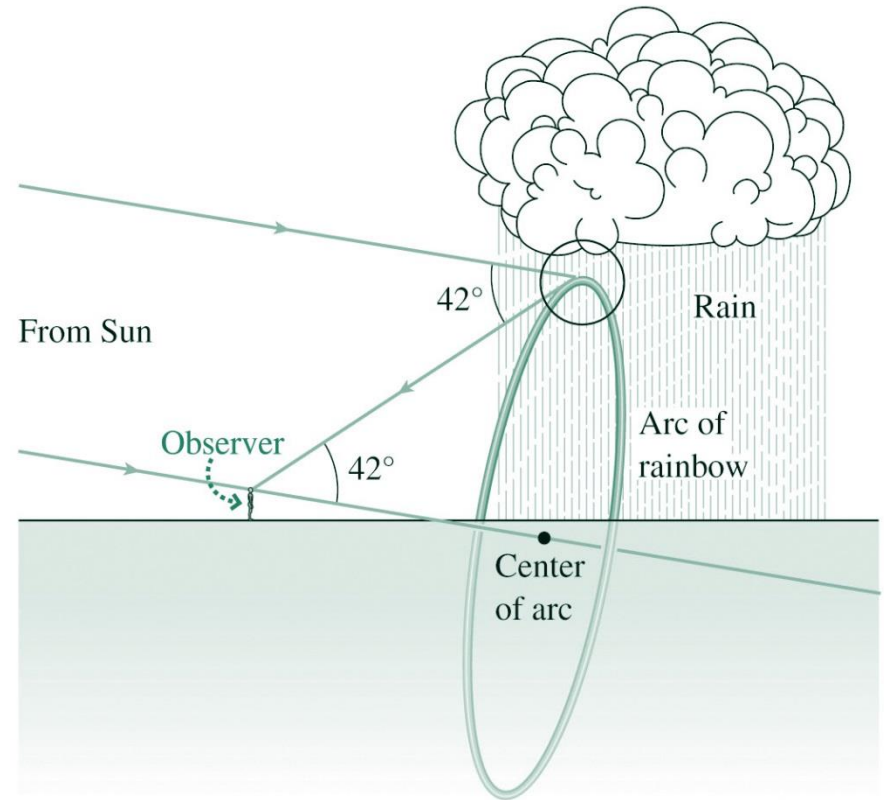
30.4 Dispersie in de natuur: regenboog

- Dispersie en totale inwendige reflectie in regendruppels veroorzaken regenbogen.



(b)

© 2012 Pearson Education, Inc.



(a)

© 2012 Pearson Education, Inc.

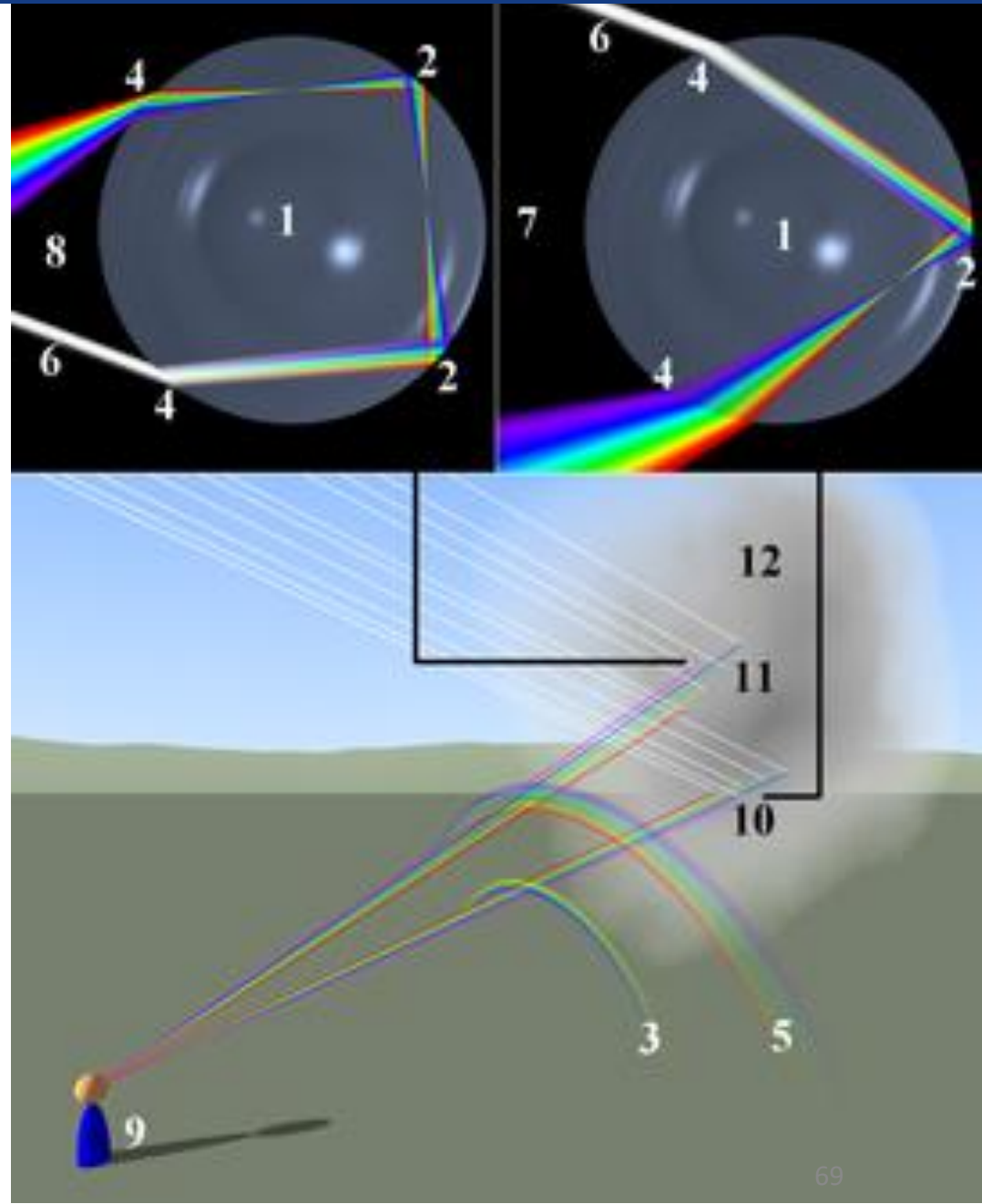
30.4 Dispersie in de natuur: regenboog

[http://nl.wikipedia.org/wiki/Regenboog_\(optica\)](http://nl.wikipedia.org/wiki/Regenboog_(optica))

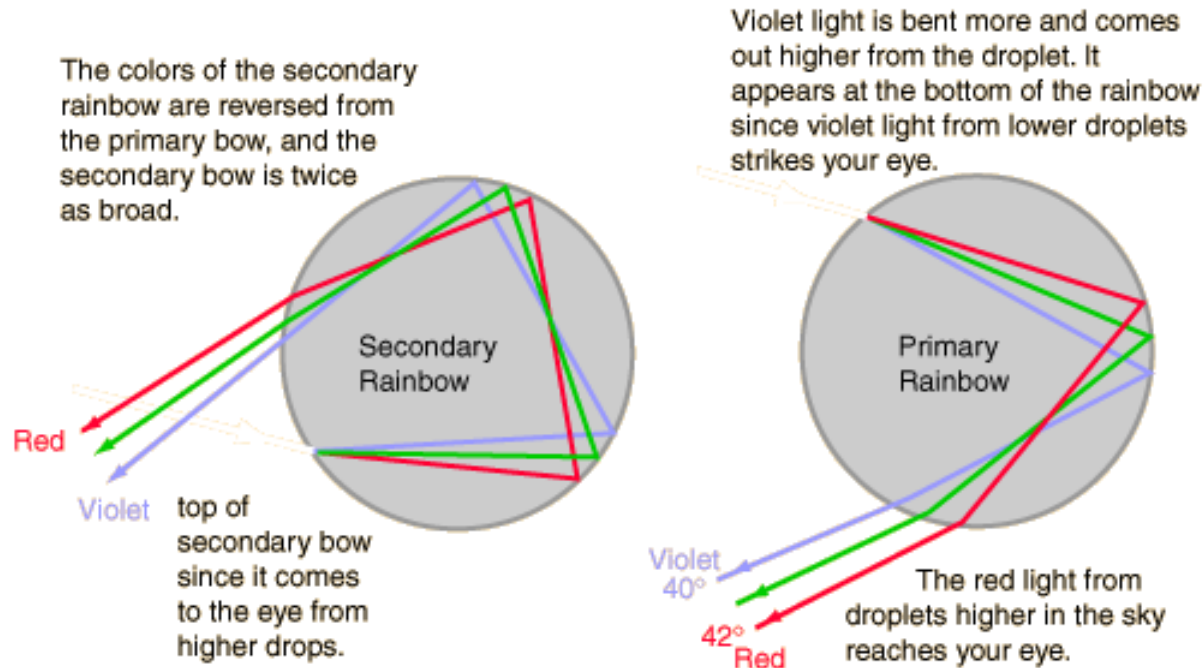
Rechtsboven: oorsprong in waterdruppel van eerste (primaire) regenboog.

Linksboven: oorsprong van tweede (secundaire) regenboog.

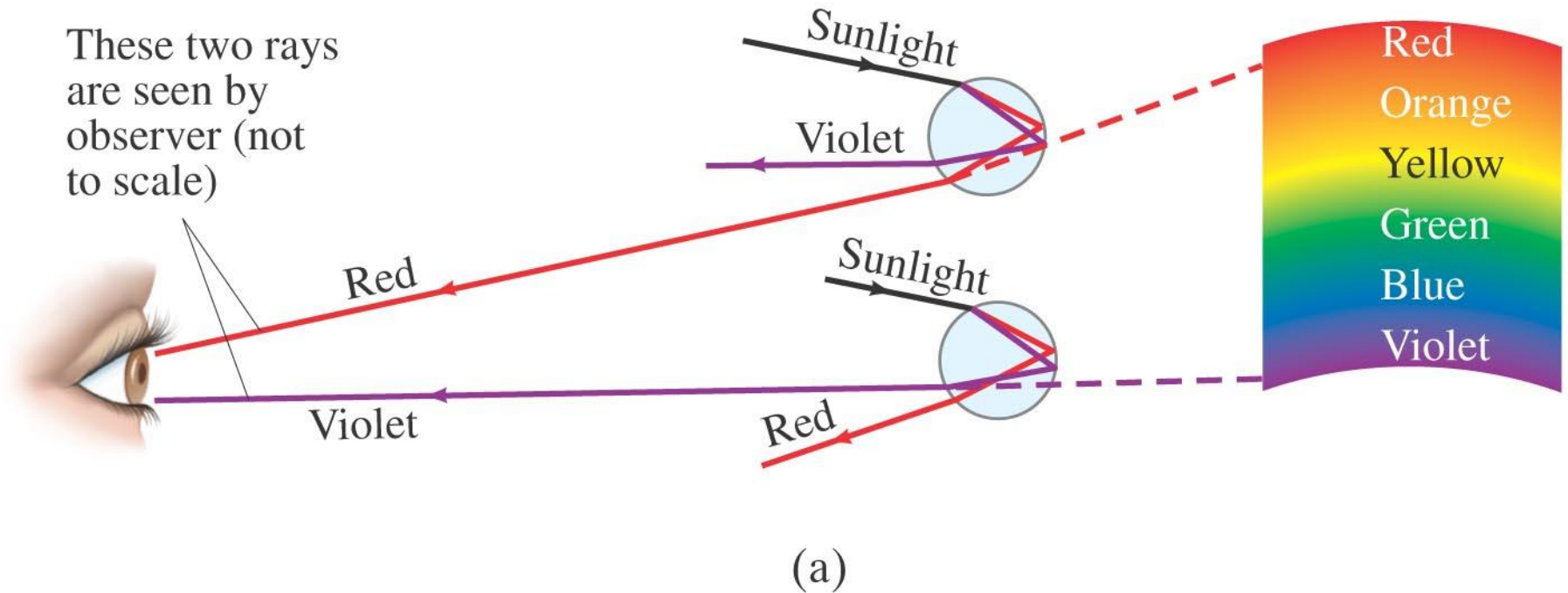
1. Ronde druppels
2. Plaats interne reflectie
3. Eerste regenboog
4. Plaats breking ([refractie](#)) van het licht
5. Tweede regenboog
6. Invallende straal wit licht
7. Lichtweg eerste regenboog
8. Lichtweg tweede regenboog
9. Waarnemer
10. Vormingsgebied eerste boog
11. Vormingsgebied tweede boog
12. Nevel of wolk



30.4 Dispersie in de natuur: regenboog



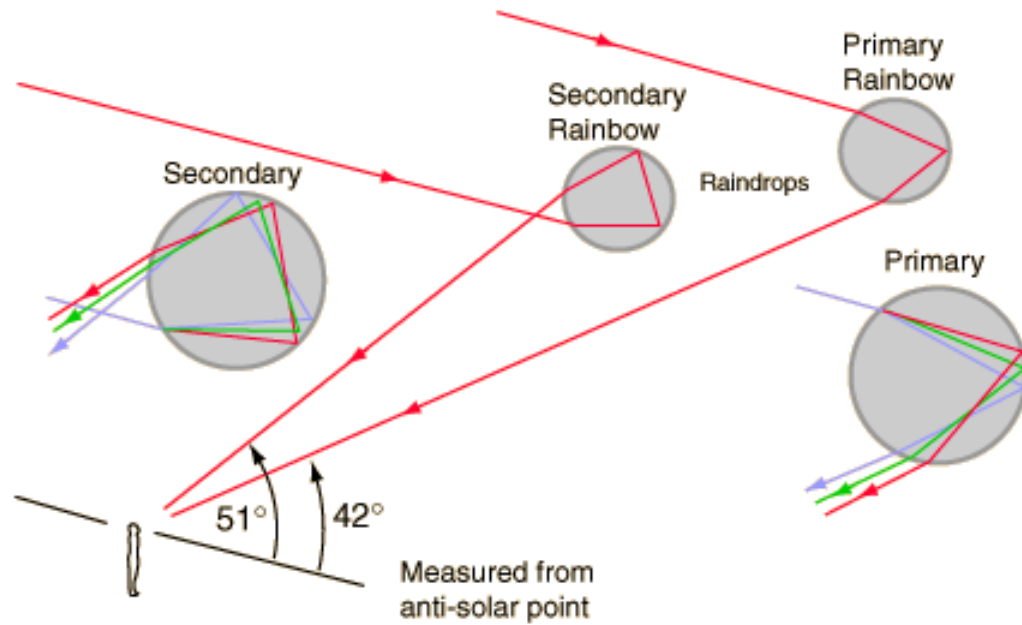
30.4 Dispersie in de natuur: regenboog



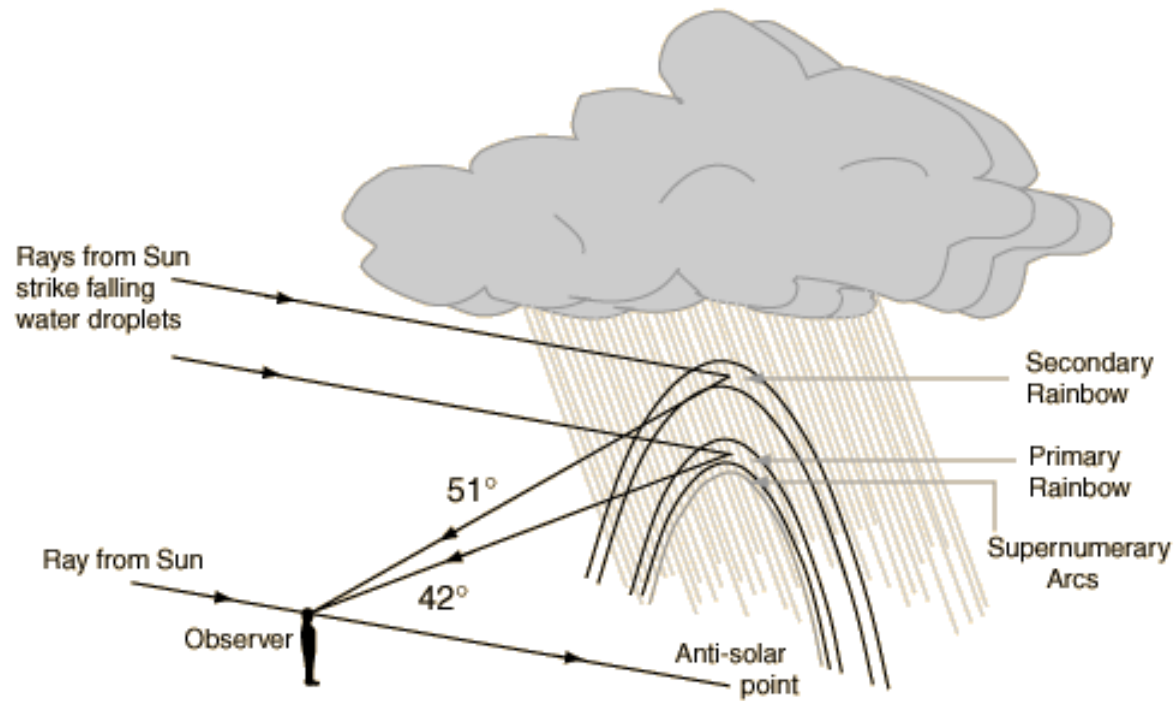
Copyright © 2008 Pearson Education, Inc.

Primaire regenboog

30.4 Dispersie in de natuur: regenboog



30.4 Dispersie in de natuur: regenboog



30.4 Dispersie

