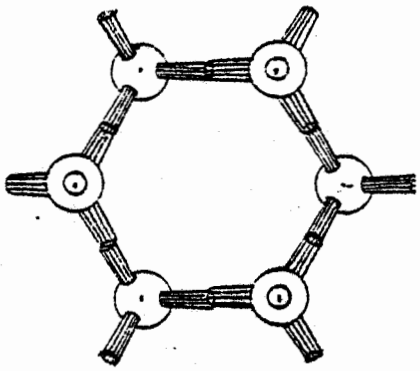
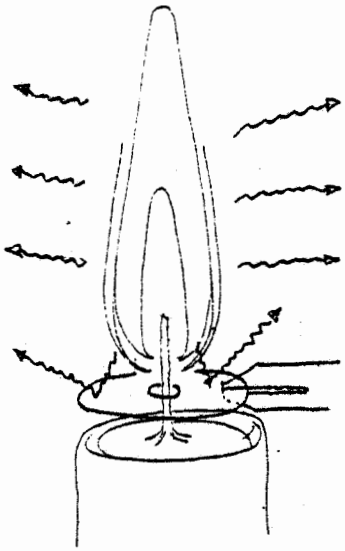
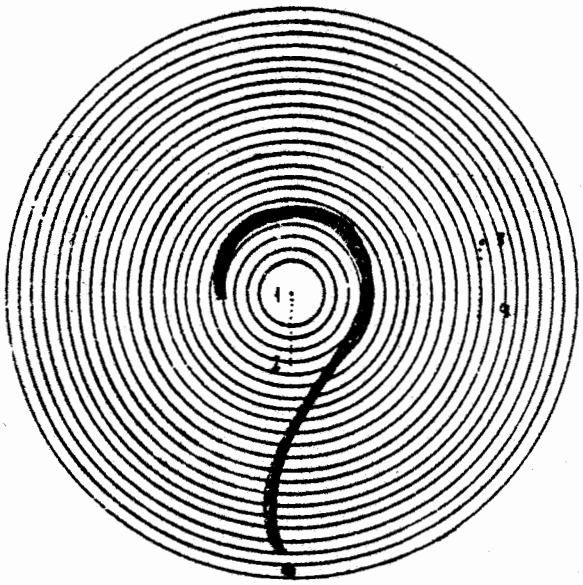
NATUURKUNDE RONDOM KERSTMIS EN NIEUWJAAR



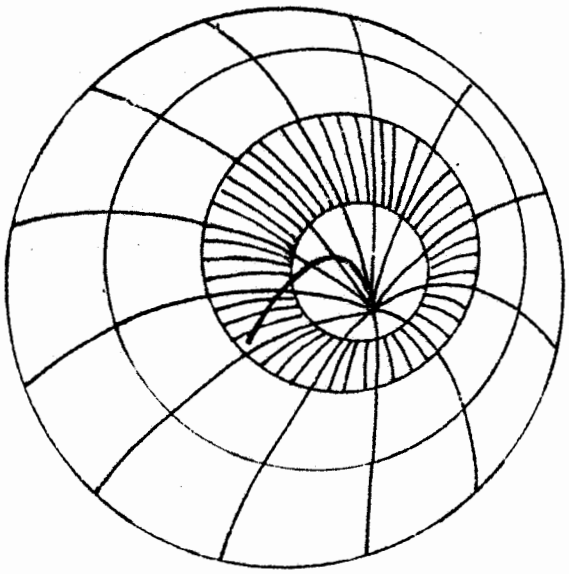
SNEEUW



DE KAARS



ENGELENHAAR



VUURWERK

Inhoud

blz.1-2 Inleiding
blz.3-10 Sneeuw
blz.11-18 Vuurwerk
blz.19-27 Engelenhaar
blz.28-38 De kaars.

Maarten van Woerkom,
Tijhofslaan 36,
7602 HH Almelo
Pius X College, Almelo

NATUURKUNDE RONDOM KERSTMIS EN NIEUWJAAR

Inleiding.

In deze voordracht komen een aantal heel verschillende onderwerpen aan de orde. Op het eerste gezicht hebben ze weinig met elkaar te maken. Maar naar mijn idee bezitten ze weldegelijk een gemeenschappelijke noemer.
Ten eerste koos ik ze uit omdat zij zich juist tegen deze tijd, vlak voor of direkt na de Kerstvakantie, lenen voor behandeling in de klas. Juist dan bezitten zij een zekere aktualiteit.
Ten tweede zijn het onderwerpen waaraan in eerste instantie nou eens niet gerekend hoeft te worden. Wel moet men goed waarnemen en eventueel tekenen en fotograferen.
Ten derde zijn het voorbeelden van verschijnselen waarin een leerling niet direkt natuurkunde ziet. Maar het frappeert heel sterk dat er zoveel natuurkundigs aan vastzit. Zij lenen zich voor een uitvoerige en vaak onverwachte en veelzijdige toepassing van allerlei heel oude maar ook van nieuwe natuurkunde.
Ten vierde zijn alle onderwerpen op dezelfde manier tot stand gekomen. De afgelopen jaren koos ik in november steeds een nieuw onderwerp,'huiselijk' van aard, verdiepte me erin en presenteerde het in de klas. In alle klassen, van de tweede tot en met de zesde! In de hogere klassen ging ik natuurlijk wel een stapje verder. Voor mij waren de onderwerpen zeldzaam motiverend. Omdat ze allen schijnbaar zo eenvoudig zijn. Maar de schijn bedriegt natuurlijk. Gaandeweg kwamen er steeds nieuwe mysteries bij. Maar ook werden een aantal aspekten mij toch allengs duidelijk.
Voor de leerlingen was het motiverend omdat de natuurkunde waarvan zij al enkele kleinigheden weten in onverwachte 'alledaagse' verschijnselen toepassing vindt en verklaringen biedt. Maar het meest motiveerde het de leerlingen omdat zij zagen dat hun leraar ook aan het ontkekken was en verbaasd was!
Uiteraard zijn er ontzaggelijk veel van zulke verschijnselen te vinden. En is geen enkele ervan in een kwartiertje grondig te bespreken. In de klas hebt U voor elk ervan wel een of twee uur nodig. Misschien vindt U mijn korte behandeling wel veel te oppervlakkig.

Maar wellicht wordt U geprikkeld om deze onderwerpen nader te overdenken en uit te werken. Wellicht ook kunt U daarbij mijn notities en tekeningen gebruiken. Als mijn keuze U voor een enkele van Uw lessen stimuleert dan heb ik een bijdrage kunnen leveren aan deze hopelijk motiverende Woudschoten-konferentie.

SNEEUW

Voor elke leerling is het een sensatie als het sneeuwt of als het gesneeuwd heeft. Iedereen raakt er opgewonden door; er valt nu veel te beleven, sneeuwballen gooien, sleeën, inzepen enz.
In mijn klassen reageer ik er altijd op.
Waarom is sneeuw wit? Is sneeuw wel wit?
Een sneeuwkristal onder de mikroskoop is doorschijnend als water.
Ik pak mijn boek met duizenden foto's van sneeuwkristallen en vertoon diverse soorten. (Lit. 4)

Hier wil ik twee heel verschillende aspekten van sneeuw bespreken:
- de zeskantige struktuur van de sneeuwkristallen,
- de sneeuwpatronen op daken van huizen.

Beide aspekten zijn uitvoerig in de klassen aan de orde geweest.

Waarom is het sneeuwkristal zeskantig?

Dat is de centrale vraag in het boekje van Johannes Kepler, getiteld: A New Year's Gift - On the Six-Cornered Snowflake.
Het antwoord op bovenstaande vraag schijnt heel lastig te zijn.
Ik heb er al heel wat mensen over aan het hoofd gezeurd. De hoogleraar waarbij ik afstudeerde in de theoretische natuurkunde, een vaste stof fysikus, die zich diepgaand met kristalvormen bezig houdt, gaf me een heel apart antwoord: 'Ik zeg niet tegen u wat ik ervan denk, want anders zou u misschien denken dat ik weet hoe het zit!'
Op een ander instituut vroeg ik er een dendrietoloog naar.
Die heeft me er het een en ander over verteld. Ik zal het gedeeltelijk navertellen.
In Natuur en Techniek heeft een schitterend artikel gestaan genaamd "Ijskristallen in de atmosfeer". Een deel van het antwoord is er zeker in te vinden. De auteur van het artikel heb ik onlangs nog eens naar details erover gevraagd. Jammer genoeg echter moest hij mij toch bepaalde antwoorden schuldig blijven!

Twee dingen vertel ik erover in de klas.
1. de hexagonale kristalstruktuur van ijs
2. de hexagonale uitwendige aangroei van kristallen.

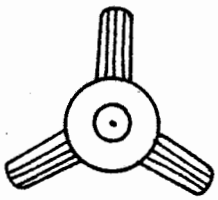
1. De hexagonale struktuur van het ijs-kristal

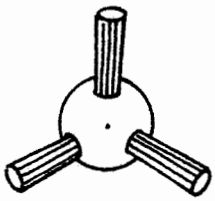
In de meeste leerboeken voor natuurkunde zijn plaatjes opgenomen van het ijskristal vanuit twee richtingen bekeken:

met de kijkrichting in de hexagonale kanalen (de c-as) of loodrecht daarop (één van de drie a-assen).

De plaatjes zijn moeilijk te interpreteren.
Vandaar dat het ruimtelijke model dat de scheikunde-collega's gebruiken heel verhelderend werkt.
Hier wil ik een aantal plaatjes tonen die wellicht een aanvulling zijn. In zekere zin ga ik het kristal eerst in lagen en vlakken ontleden. Daarna ga ik het kristal weer opbouwen met steeds twee vlakken die een laag vormen en ik stapel daarna de lagen op elkaar.

stand A

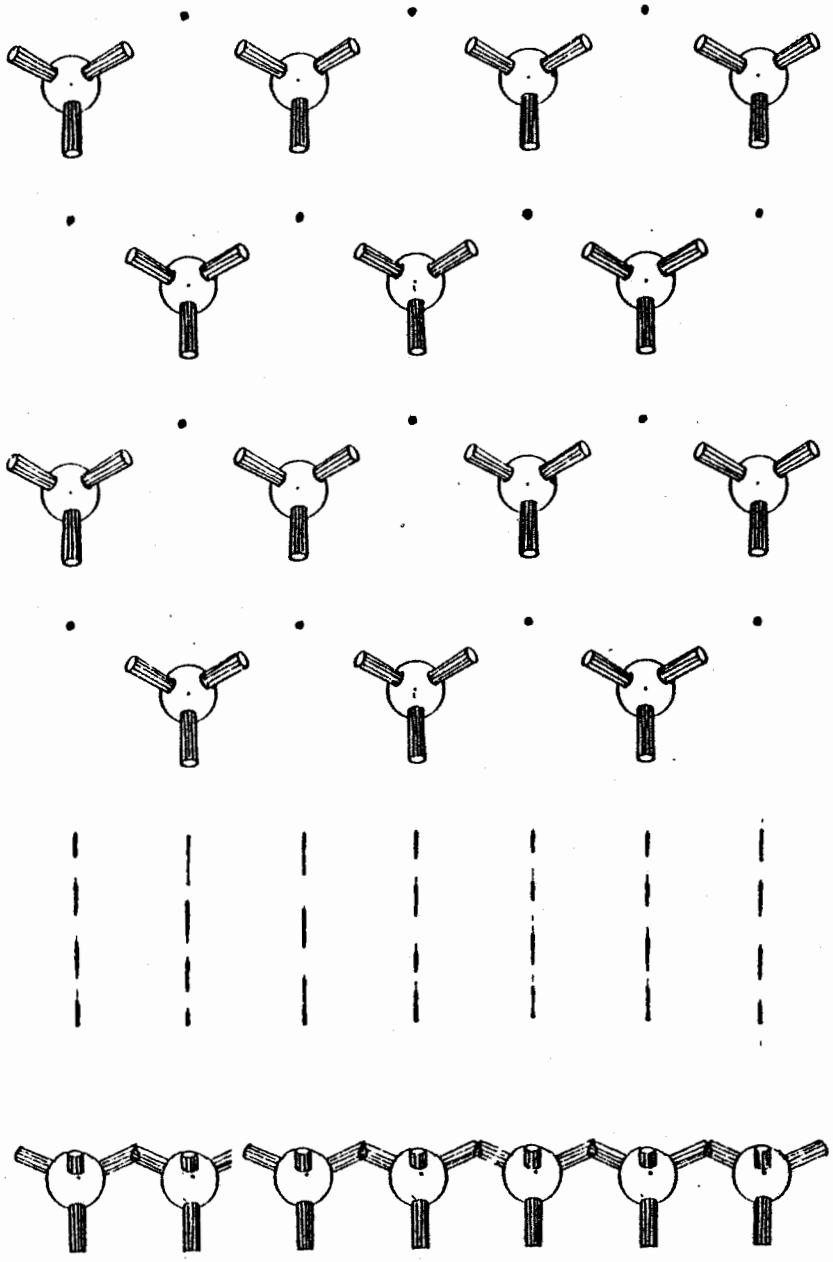




stand B

Deze bolletjes met vier poten stellen een kompleet watermolekuul voor: het zuurstofatoom met twee waterstofatomen.
Zo'n watermolekuul heeft om een of andere reden een tetraëdrische struktuur, vandaar die vier pootjes.
In stand A staan drie pootjes schuin naar beneden, en één omhoog.
In stand B staan drie pootjes schuin omhoog, en één naar beneden.
(Dat laatste pootje is nu onzichtbaar, want het is verscholen achter het bolletje).

In fig. 1a kijk je op een heel vlak vol met bolletjes in stand B.
Ze zijn op speciale wijze gegroepeerd; zodanig dat drie naar elkaar toewijzende pootjes een molekuul in stand A georiënteerd kunnen binden. Dit vlak heet vlak 1.
In fig. 1b is weergegeven hoe je vlak 1 van opzij ziet, dus kijkend in het vlak. Je ziet lijn 1.
In fig. 2a kijk je op een heel vlak met bolletjes in stand A.
Dit vlak heet vlak 2.
In fig. 2b zie je vlak 2 weer van opzij, je kijkt in het vlak.
Je ziet lijn 2.



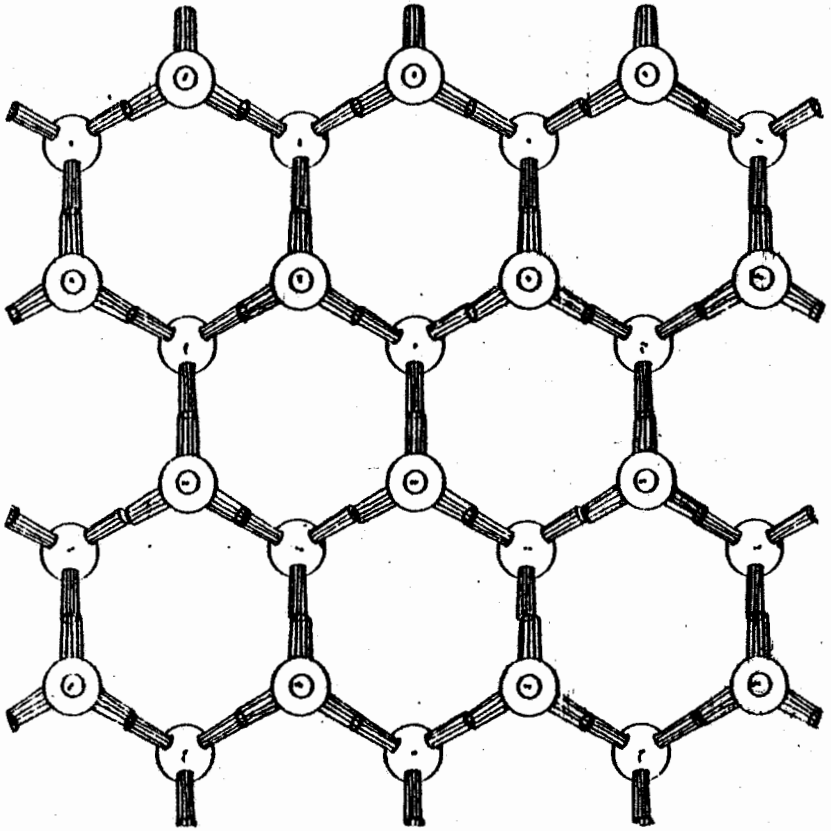
figuur 1a
vlak 1

figuur 2a
vlak 2

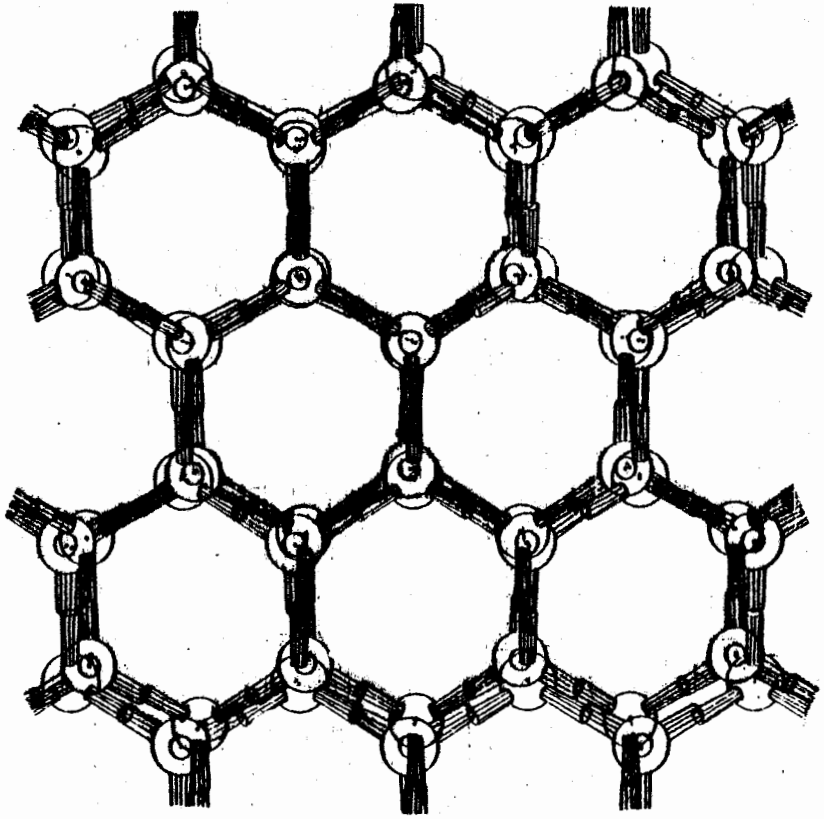
figuur 1b

figuur 2b
lijn 2

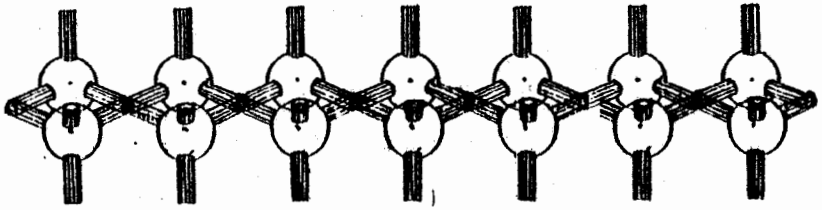
lijn 1



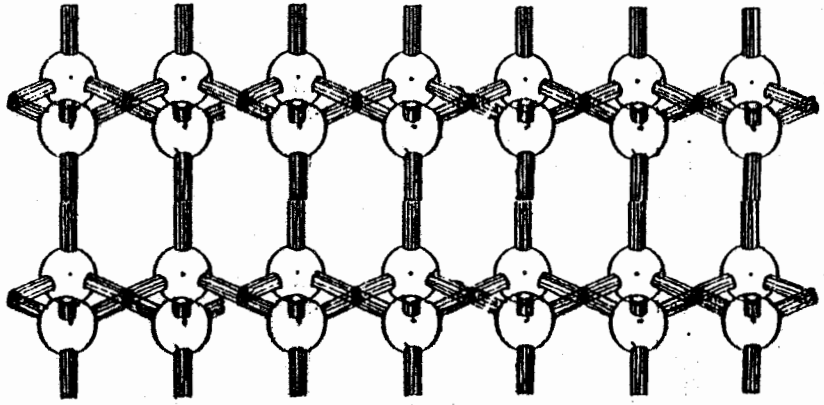
figuur 3a
laag 1



figuur 4a
twee lagen



figuur 3b
laag 1

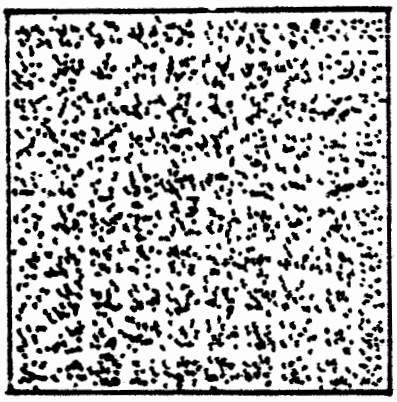


figuur 4b
twee lagen

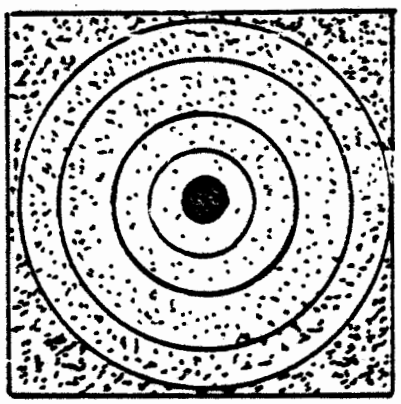
In fig. 3a is vlak 2 neergelegd op vlak 1: alle korresponderende pootjes stellen nu bindingen voor. Aldus is een ijslaag ontstaan, laag 1. Het is een vlak met een zadelstruktuur; immers een rijtje A-molekulen ligt hoger dan het naburige rijtje B-molekulen.
Fig. 3b toont weer een blik van opzij.
De zo gevormde ijslaag heeft aan de boven- en aan de onderkant uitstekende pootjes. Op deze pootjes past precies een tweede ijslaag. Zie fig. 4b.
In fig. 4a is die tweede ijslaag enigszins vergroot weergegeven.
Het is heel grappig om met transparanten van deze figuren te spelen. Probeert u er maar de diamant-struktuur mee te maken!
Het is mij gebleken dat deze figuren de ijsstruktuur heel bespreekbaar maakt voor de leerlingen.

2. De aangroei van dendrieten aan een ijskristal

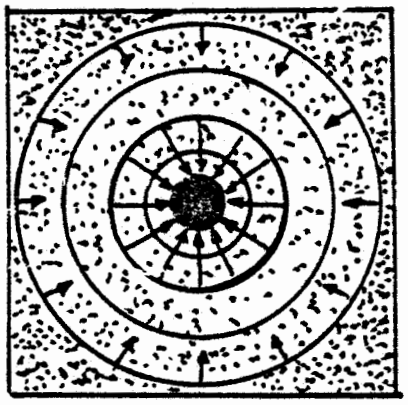
Fig. 5a stelt een koude ruimte voor met voor ijs oververzadigde waterdamp met bijvoorbeeld een maximale dampspanning zoals die bij $0^{o}C$ hoort.
Wanneer er nu een 'put' voor waterdamp in aangebracht wordt, zoals in fig. 5b is aangegeven, dan zal de dampspanning rondom die put lager worden en er ontstaat in die ruimte een gradiënt in de dampspanning. De cirkels stellen dampspannings-isobaren voor. De binnenste cirkel hoort bij de laagste dampspanning.
Ten gevolge van de gradiënt zal waterdamp naar het centrum stromen: de sterkste stroming bij de grootste gradiënt, dus waar de isobaren het dichtst opeen liggen: fig. 5c.
De put voor waterdamp is in de atmosfeer een vrieskern.
Dat kan een stofje zijn, een elementair kristalletje met een geschikte struktuur, het liefst een elementair ijskristalletje of ijssplintertje.
Vanwege de oververzadiging zal de dampstroom naar het elementaire kristal groter zijn dan de dampstroom er vanaf (zie fig. 6a).
Het kristal zal aangroeien en er ontstaat de geschetste gradiënt.
Maar de hoekpunten zullen verder in het gebied steken van rijkere oververzadiging. De hoekpunten zullen dus door een grotere dampstroom bereikt worden.
Het verhaal geldt in versterkte vorm voor de eenmaal gevormde dendriet: die zullen snel sterk uitgroeien (zie fig. 6b).
Het is mij in dit eenvoudige beeld geenszins duidelijk waarom een tweede generatie dendrieten ontstaat! In fig. 6c ziet u een plaatje van een sneeuwkristal. Het is afkomstig uit Lit. 2.



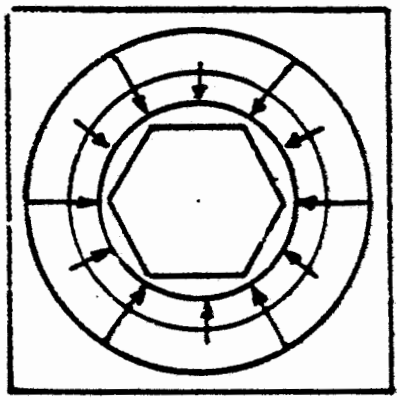
figuur 5a



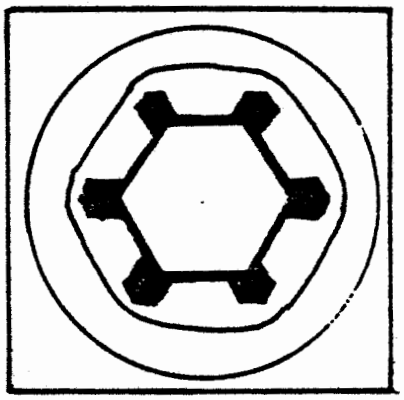
5b



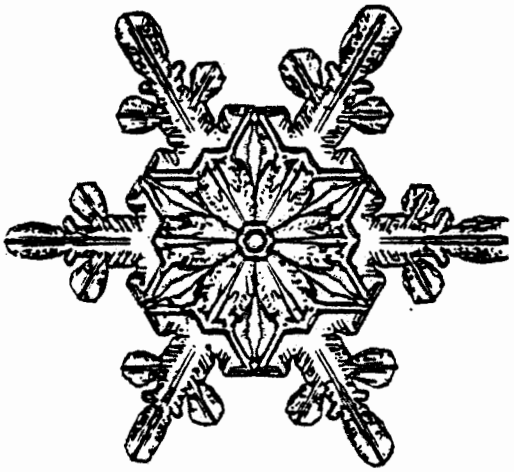
5c



figuur 6a



6b



6c

Thermische patronen op daken

Er is sneeuw gevallen en het ziet ernaar uit dat die enige tijd blijft liggen. Zeker op de daken van de huizen.
Dan krijgen de leerlingen van mij een huiswerk-opdracht die ze heel lang zal heugen!
Ze moeten namelijk het dak van hun overburen tekenen, met de sneeuwlaag erop. En wel gedurende enkele dagen achter elkaar, tot de sneeuw verdwenen is.
Nu is het tekenen van een dak nogal lastig voor de meeste leerlingen. Ze moeten dat wel voorgedaan krijgen.
Of de leraar tekenen moet meedoen!

Op het bord teken ik enkele daken. Met een krijtje in zijn lengterichting strijkend langs het bord breng ik witte sneeuw aan.
Dan ga ik met een spons op het bord die plaatsen achtereenvolgens schoonvegen waar sneeuw wegsmelt in de loop van de tijd. Het eind van het verhaal is een schoon bord.
Wanneer zonneschijn en wind even vergeten worden dan zal de sneeuw in het algemeen smelten ten gevolge van warmtelekken in het dak.
Omdat de temperatuur in de nok van het dak meestal het hoogste is zal daar de sneeuw het eerst verdwijnen. Behalve bij de daklijst die oversteekt buiten de muren. Ook rondom een schoorsteen is de sneeuw snel verdwenen.
Bij een blok van vier huizen zie je bijna altijd heel markante verschillen tussen de huizen onderling.

- bij het ene huis verwarmt men bijvoorbeeld een zolderkamer, bij de andere huizen niet;
- in een van de huizen is een extra kast op zolder gebouwd;
- een van de eigenaren heeft de zolder geïsoleerd, de anderen niet. Zonder isolatie smelt de sneeuw tussen de balken het eerst, de balken hebben enig isolatie-vermogen. Met isolatie zie je dat de sneeuw juist op de plaats van de balken het eerst smelt. Blijkbaar heeft de glaswol een groter isolerend vermogen dan de houten balken. Overigens begint het smelten weer bovenaan het eerst.
- boven de spouwmuren tussen de woningen is steeds een smeltstrookje te zien.

Wanneer de zon wél meedoet, wordt het ingewikkelder.

- sommige plaatsen van het dak liggen voortdurend in de schaduw van een dakkapel of zoiets; terwijl de zon andere plaatsen van

het dak wel gedurende een deel van de dag beschijnt.
- de dakrand die over een zuid-muur steekt raakt z'n sneeuw juist vlug kwijt: langs de voorgevel stijgt warme lucht op die de dakrand, aan de bovenkant het eerst, verwarmt.

Daken van boerderijen en schuren zijn ook heel interessant. Een van de tekeningen die ik van leerlingen te zien kreeg was van een dak van een boerderij; woonhuis en deel. Op een merkwaardig lage plaats op het dak van de deel was in een hoekje de sneeuw verdwenen. Mijn konklusie was dat er een kalf geboren was. Bij navraag bleek dat juist te zijn!

Literatuur

1. Kepler, Johannes, 1966. The six-cornered snowflake. Oxford at the Clarendon Press.

2. Hage, J.C.H. van der, 1977. IJskristallen in de atmosfeer. Natuur en Techniek, 45 (1977) blz. 166-177.

3. Barlett, Albert A., 1976. Thermal patterns in the snow, I, II. The Physics Teacher, 14 (1976) blz. 14-18; 86-90.

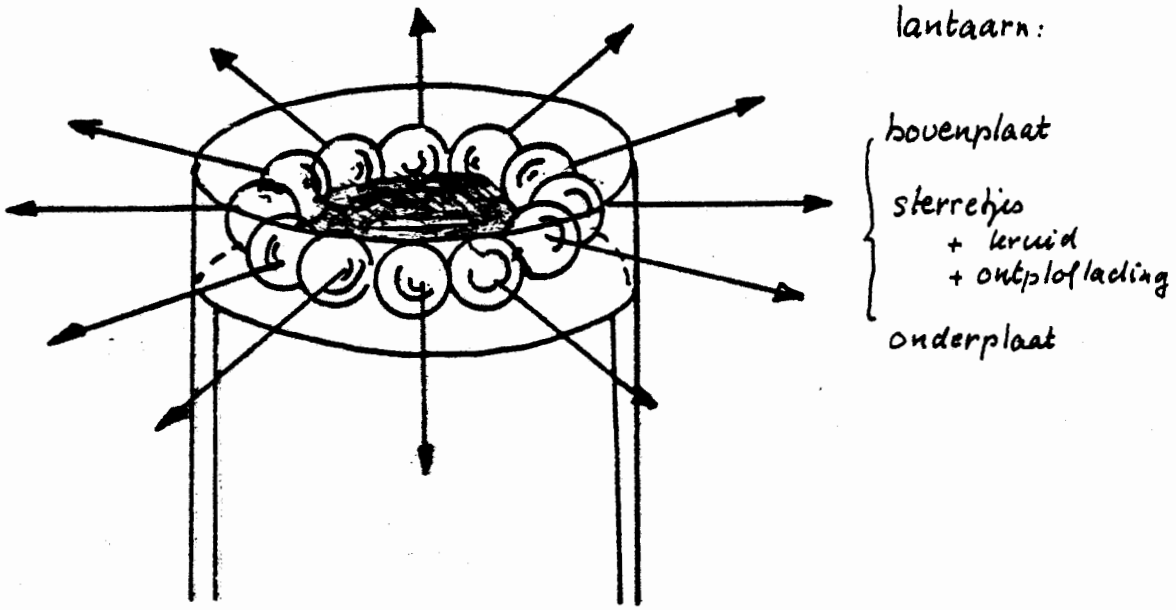
4. Bentley, W.A. and Humphreys, W.J. Snow Crystals. Dover Publications Inc., New York.

VUURWERK

Echt groots is het vuurwerkspektakel dat op nieuwjaarsnacht te zien is.
Elke leerling en zijn ouders zien het en de meesten doen er aan mee.
Bij navraag in al mijn klassen bleken veel mensen er foto's en dia's van gemaakt te hebben; van vuurpijlen, vuurpotten, draaiende pijlen, van wat al niet!
Een van de prachtigste dia's van een leerling uit de 4e klas laat ik u zien: een fascinerend patroon van 'parabolen'.
U hebt niet veel fantasie nodig om op allerlei vragen te komen.
Om er enkele te noemen:

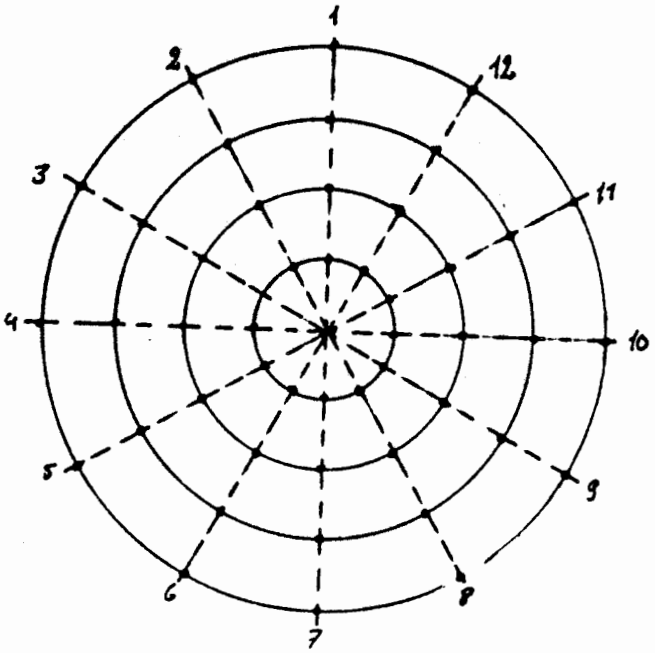
- ontplofte het vuurwerk op het hoogste punt van de baan?
- was er wind? uit welke richting?
- was er wrijving? hoe kun je dat dan zien?
- waarom zijn de lichtsporen in het hoogste punt vaak het helderst?
- kun je zien welke banen naar voren gericht zijn?
- hoe lang gloeiden de sterretjes?
- kun je zien hoe de kop van de pijl gekonstrueerd moest zijn?

Natuurlijk zijn veel van de vragen vaak heel moeilijk te beantwoorden.
Maar ik stel me hier ten doel één soort vuurwerk nader te analyseren en er de bijbehorende banen van te konstrueren.
Het bedoelde vuurwerk staat heel mooi afgebeeld op een foto in Archimedes, 14e jaargang, blz. 100. Daarvan toon ik u een dia.
Het gaat me om de paraplu-vormige figuren die temidden van allerlei andere sporen te zien zijn.
Deze paraplu heb ik de leerlingen laten construeren in de 4e klas, als toepassing van de zojuist geleerde kogelbanen en in de 5e en 6e klas als herhaling. Het was in een van de laatste lessen voor de Kerstvakantie. Naar ons idee een van de mooiste lessen in de mechanika, in het tekenen en in het waarnemen.
Na de vakantie mocht ik nog allerlei tekeningen en foto's bewonderen!



drijfraket

figuur 1



figuur 2

De siervuurwerkpijl, bouw en ontploffing

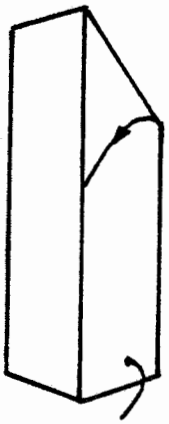
De kop van de pijl, die hopelijk pas hoog in de lucht ontploft, heet de lantaarn. Er zijn geweldig veel vormen in omloop, rond of plat, meervoudige ladingen, allerlei kleuren enz.
In fig. 1 staat een platte lantaarn getekend. Met twaalf sterretjes, heel regelmatig gegroepeerd, tussen een boven- en ondervlak. Door stofkruit overdekt, zodat ze allemaal tegelijk heel snel kunnen ontbranden.
Midden tussen deze sterretjes zit een ontploflading. Deze wordt op een juist moment vanuit de drijfraket ontstoken. Door de ontploffing vliegen de ontbrandende sterretjes door de dunne kartonnen wand naar buiten.
In mijn tekening is de optasting zo regelmatig dat de sterretjes in een cirkel liggen rondom hun zwaartepunt. In geval er geen wrijving is en de wind er dus ook geen vat op heeft blijven ze na de ontploffing ook steeds op een aldoor grotere cirkel liggen. Zie fig. 2.
Een van de aannames is natuurlijk dat de sterretjes gelijke massa hebben.
Aan de wet van behoud van impuls is in ieder geval voldaan! (Heel andere, asymmetrische, ontploffingen voldoen natuurlijk ook aan de wet van behoud van impuls).
Alvorens u de konstruktie van de sterretjes-banen te demonstreren eerst een komputer-simulatie van de banen. De numerieke procedures zijn door B. Wuite geprogrammeerd en uitgevoerd op een ZX-Spectrum machine. De baangegevens zijn voor een vijftal gevallen opgeslagen in het geheugen, na ongeveer 36 uur rekentijd.
Deze gevallen kozen wij uit:

1. Snelheid van de lantaarn bij ontploffing 0, sterretjes-cirkel horizontaal, geen wrijving.
2. Snelheid van de lantaarn bij ontploffing vertikaal omhoog, dus sterretjescirkel horizontaal, geen wrijving. (Alle sterretjes bevonden zich voortdurend in een horizontaal vlak).
3. Snelheid van de lantaarn bij ontploffing schuin omhoog, dus stand van sterretjes-vlak ook scheef
   a. geen wrijving
   b. wel wrijving
   c. met tegenwind, dus ook wrijving

Er zijn aan al deze banen heel wat details te zien, die leerzaam zijn.

Konstruktie van de banen

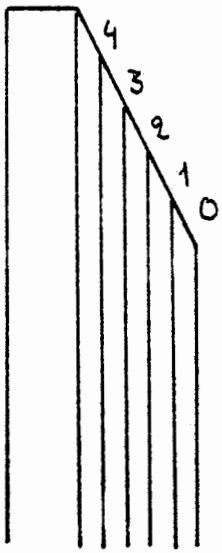
Hier wil ik beschrijven hoe een eenvoudige konstruktie-tekening gemaakt kan worden door de leerlingen. Voor de tekening heeft de leerling een 5 mm-ruitjes-blad nodig en een passer. Het kost één lesuur om alles netjes uit te werken.
Eerst maak ik een perspektief-tekening. Het is niet de bedoeling dat alle leerlingen die maken, daarvoor is het maken van zo'n tekening te lastig. Een enkele liefhebber doet het misschien thuis. Maar de perspektief-tekening is een inleiding tot de eenvoudige konstrukties voor de leerlingen.
De perspektief-tekening is nodig want de siervuurwerkpijl die ik beschouw ontploft op grote hoogte, terwijl de waarnemer vanaf de grond naar boven kijkt.



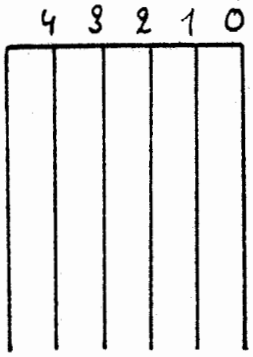
vlak waarin het zwaartepunt beweegt

Eigenlijk zou een koördinatenstelsel met assen getekend moeten worden in een figuur zoals hiernaast. Maar ook dat is wat te ingewikkeld om voor te doen. Vandaar dat ik een heel vereenvoudigde perspektief neem!

In de figuren 3 staan de lijnen 0, 1, 2, 3, 4 getekend waarop het voorwerp zich achtereenvolgens bevindt t.g.v. een eenparige horizontale beweging.
Fig. 3a: van onderen gezien; fig. 3b van opzij gezien.
In de figuren 4 staan de lijnen 0, 1, 2, 3, 4 getekend waarop het voorwerp zich achtereenvolgens bevindt t.g.v. een vrije val, dus t.g.v. een eenparige versnelling.
Fig. 4a: weer van onderen gezien; fig. 4b weer van opzij gezien.
In fig. 5 staat het koördinatenstelsel voor een horizontale worp: dus een kombinatie van de figuren 3 en 4. Als u van de figuren 3 en 4 elk een transparant maakt, kunt u ze op elkaar projekteren. Wanneer u op het bord projekteert, kunt u op het bord de bijbehorende parabool heel mooi intekenen!

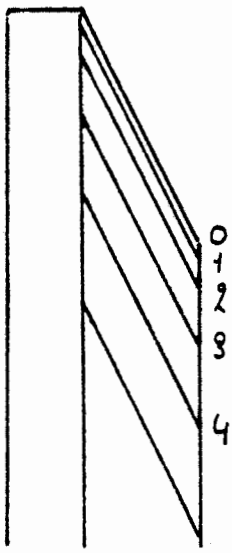


figuur 3a

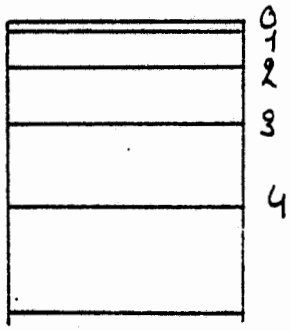


figuur 3b

eenparige beweging

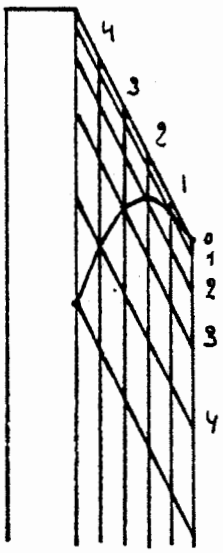


figuur 4a

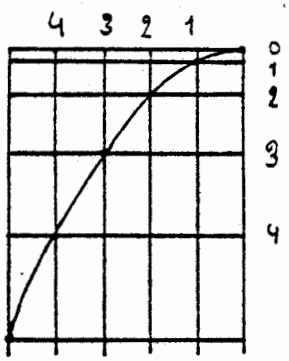


figuur 4b

vrije val



figuur 5a

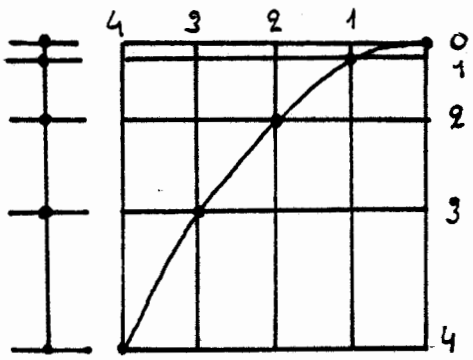


figuur 5b

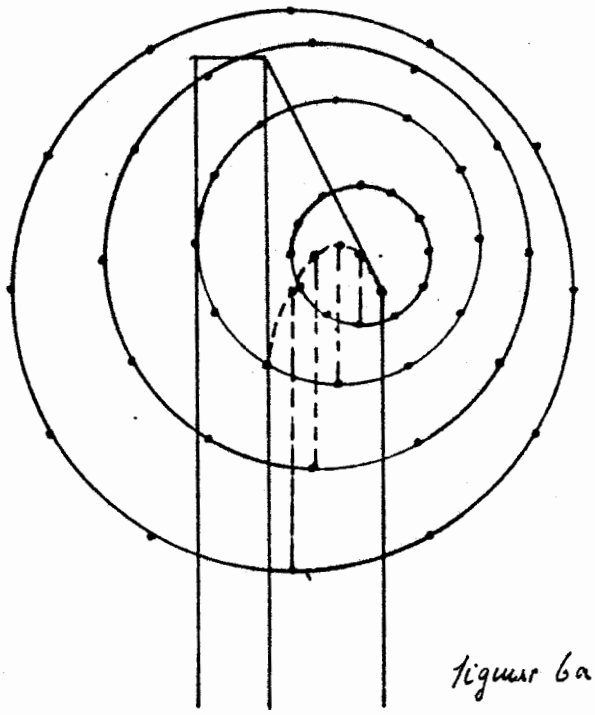
horizontale worp

In de nu volgende banen-konstruktie laat ik de lantaarn ontploffen in het hoogste punt van de baan, en wel met een horizontale beginsnelheid. Dan is de sterretjes-cirkel vertikaal. Want anders moeten er straks allemaal veel ingewikkelder ellipsen getekend worden i.p.v. cirkels.
Ik vergeet de wrijving van de lucht, een ernstige nalatigheid!
De in fig. 5 ingetekende parabool is de baan van de vuurpijl, indien deze niet zou ontploffen. (U kunt natuurlijk eenvoudig de horizontale beginsnelheid variëren).
Nu ontploft de lantaarn echter in punt O. Het gevolg is dat de punten O, 1, 2, 3 en 4 nog slechts de (massa-)middelpunten zijn van de sterretjes-cirkels. Eenparig groter wordende cirkels.
In fig. 6a zijn ze getekend. Op de cirkels is de plaats van de sterretjes weergegeven.
Nu moeten de korresponderende punten nog verbonden worden. Het resultaat is in fig. 6b weergegeven. Trouwens ook nog de zwaartepuntsbaan.
Naar mijn gevoel verrassend hoe deze wellicht overgesimplificeerde konstruktie een herkenbaar resultaat oplevert. Het lijkt sprekend op de u getoonde Archimedes-dia.
Tot zover de demonstratie voor de leerling.
Nu moet hij zelf aan het werk. En wel met een vereenvoudigde zienswijze: de leerling-waarnemer bevindt zich op gelijke hoogte met het ontploffende vuurwerk. En dan nog zijn er maar twee standpunten eenvoudig:

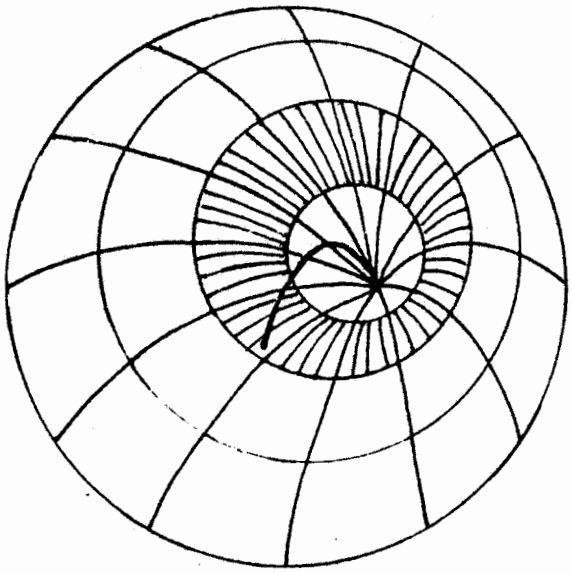
- De horizontale snelheidsvektor van de vuurpijl is naar een leerling-waarnemer 1 gericht.
  De sterretjes-cirkels worden nu ook echt als cirkels gezien.
- Een leerlingwaarnemer 2 kijkt van opzij tegen de snelheidsvektor aan. Een sterretjes-cirkel wordt nu in projektie gezien, dus als diameter van die cirkel.



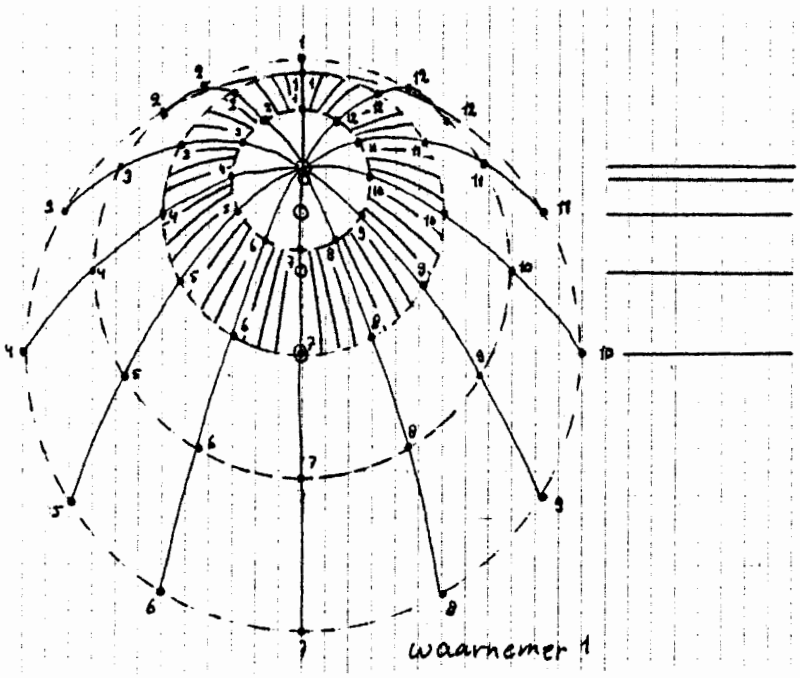
waarnemer 1 waarnemer 2



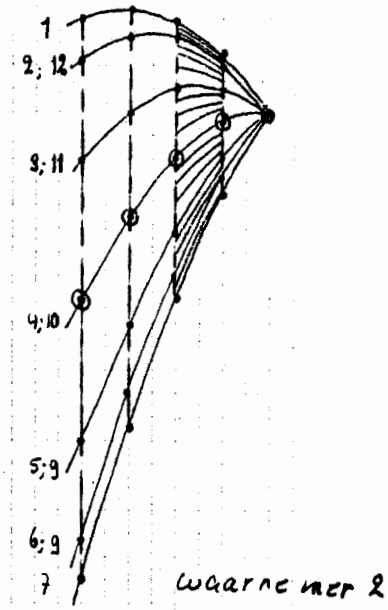
figuur 6a



figuur 6b



figuur 6c



figuur 6d

In fig. 6c zijn de cirkels ingetekend, de sterretjes-plaatsen aangegeven en de korresponderende punten verbonden. U ziet nu weer de waaier van parabolen ontstaan.
Merk op dat parabool 3 het verlengde is van parabool 8 enz.
In fig. 6d zijn de diameters ingetekend en is de figuur anderszins afgemaakt.
Bij mij in de klas werkten de leerlingen in groepjes van twee: de ene was waarnemer 1, de ander waarnemer 2.
Over het resultaat van deze leerzame en prachtige exercitie waren leraar en leerlingen heel tevreden!

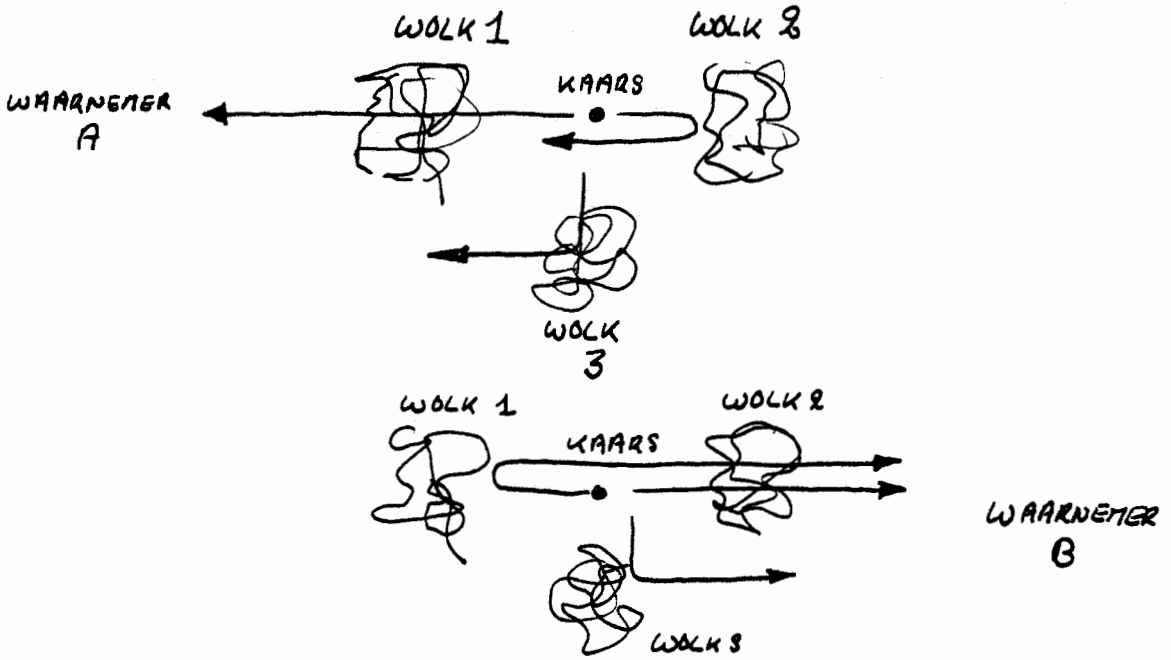
ENGELENHAAR

Wanneer men in een kerstboom rondom de (elektrische) kaarsjes wolkjes engelenhaar drappeert, is een heel opvallend verschijnsel waar te nemen.
Het lijkt of er een hele verzameling oplichtende cirkeltjes te zien is. De middelpunten ervan vallen samen met de kaars. Die cirkeltjes zijn opgebouwd uit heel veel lijnstukjes. Het mooiste is het te zien als je het engelenhaar boven de kaars houdt: dan zie je weliswaar minder cirkelfragmentjes, maar de cirkeltjes zijn gaver.
Ook het fotograferen levert mooiere resultaten op als je het verschijnsel van bovenaf opneemt.
De illusie heldere, lichtgevende cirkels te zien noem ik verder het cirkel-schijnsel.

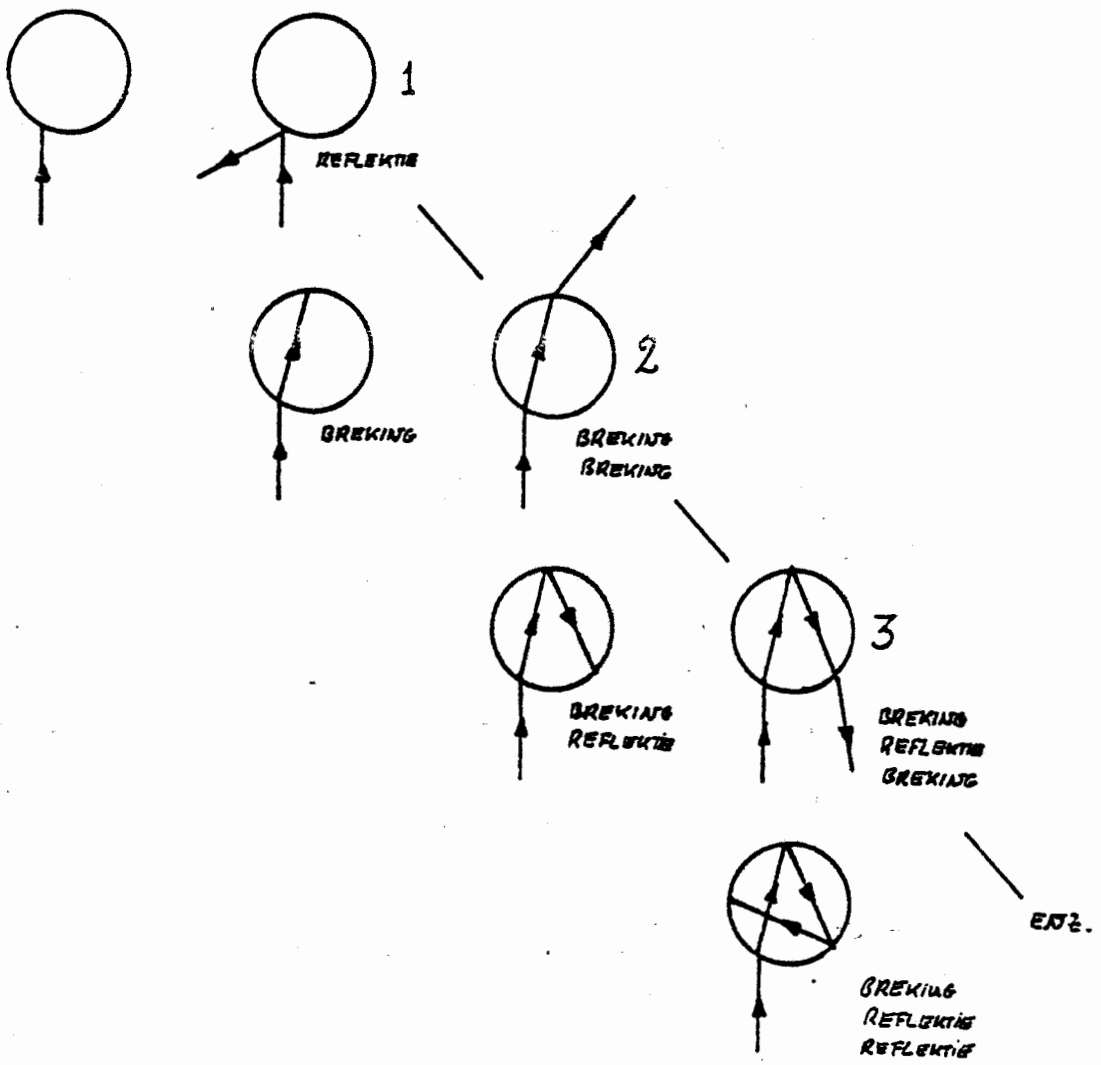
Waarom zie je cirkels? En zie je wel cirkels?
Waarom geen radiaal patroon, lijntjes uitgaande van de kaars?
Zoals lichtzuilen op het golvend wateroppervlak beschenen door een straatlantaarn?
Waarom bewegen de cirkels met de waarnemer mee?
Waarom worden de cirkels geen ovalen als je het engelenhaar uiteentrekt?
Waarom zie je geen cirkels als je het engelenhaar achter de kaars houdt?
Hoe wordt engelenhaar gemaakt?

Ik kan bijna geen literatuur vinden over engelenhaar.
In Minnaert staat er een enkele regel aan gewijd (Lit. 1).
In Lit. 2 wordt het ook even genoemd.
Beide bronnen spreken over reflektie. Mijn indruk is evenwel dat brekingsverschijnselen een hoofdrol spelen, maar dat reflektie ook mee doet.

Een fysikus die ik ernaar vroeg dacht enige tijd na en zei: Het enige dat ik van engelenhaar weet is dat mijn moeder me vroeger zei dat ik engelenhaar had!
Het is de vraag of zij toen het genoemde cirkel-schijnsel waarnam of iets anders.



figuur 1



figuur 2

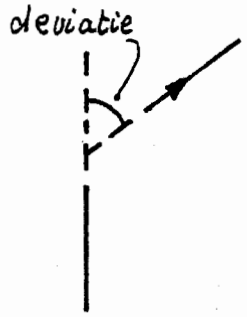
Nadere beschrijving van het cirkel-schijnsel

Zie fig. 1. Om een kaars zijn drie wolkjes engelenhaar gegroepeerd: wolk 1, wolk 2 en wolk 3.
Voor waarnemer A bevindt zich wolk 1 vòòr de kaars, wolk 2 erachter en wolk 3 ernaast.
Hij ziet in wolk 1 heldere, lichtgevende 'cirkels', opgebouwd uit kleine lijnstukjes. Die cirkels hebben hun middelpunten op de as kaars-waarnemer.Enkel die speciale engelenhaartjes vallen op, terwijl andere nauwelijks te zien zijn.
In wolk 2 valt niets bijzonders op, er zijn geen bevoorrechte engelen haartjes. Van een cirkel-schijnsel is geen sprake.
In wolk 3 is heel zwak nog iets te zien van opvallende engelenhaartjes, weer in cirkelvormige patronen, met de kaars als middelpunt.
Voor waarnemer B bevindt wolk 1 zich nu achter de kaars, wolk 2 ervoor en wolk 3 ernaast.
Hij ziet een beeld analoog aan dat van waarnemer A, alleen hebben wolk 1 en 2 hun rol verwisseld!
(De engelenhaartjes die waarnemer A goed ziet, ziet B juist niet meer

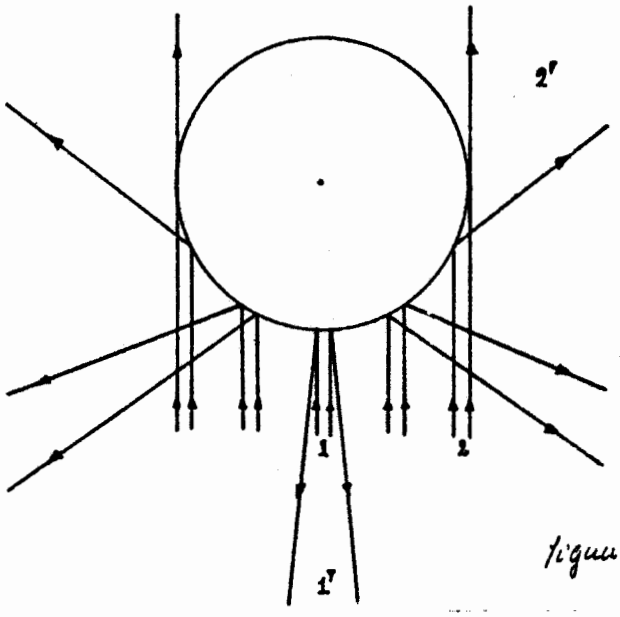
Reflektie en breking bij de cilinder-lens

Engelenhaar is gemaakt van glas. Eén haar is een zeer dunne glazen cilinder. De diameter is in de orde van driehonderdste milimeter.
De doorsnede loodrecht op de lengte-as van de cilinder is een cirkel.
Als licht op een glazen 'cirkel' valt doet zich een veelheid aan verschijnselen voor: (zie fig. 2).

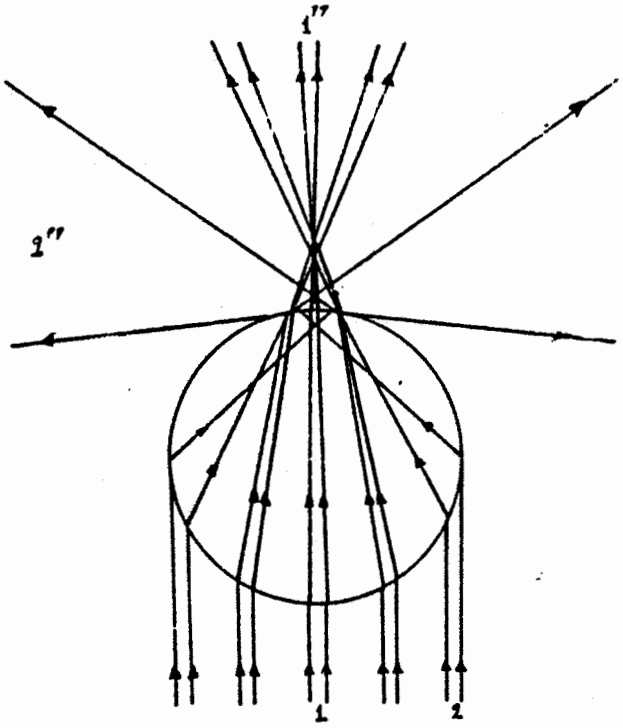
1. Externe reflektie
   (denk aan een kerstbal; dit is een interessant objekt omdat een kerstbal werkt als een 'topological synthesizer' d.w.z. er kan een beeld in worden waargenomen van nagenoeg de hele omringende ruimte. Zie lit. 4).
2. Breking naar binnen en weer naar buiten (denk aan de positieve lens).
3. Breking naar binnen, interne reflektie, en breking naar buiten. (Denk aan de verklaring van de regenboog).
4. Breking naar binnen, meerdere interne reflekties, en breking naar buiten.



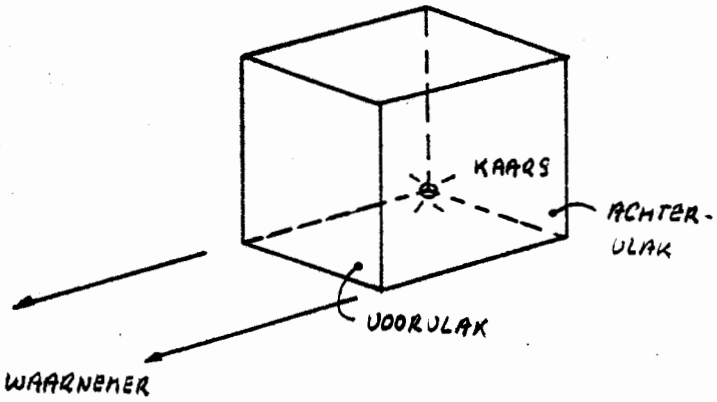
Onder deviatie versta ik hier: de hoek tussen de oorspronkelijke richting van de lichtstraal en de richting van de straal na reflektie of breking.



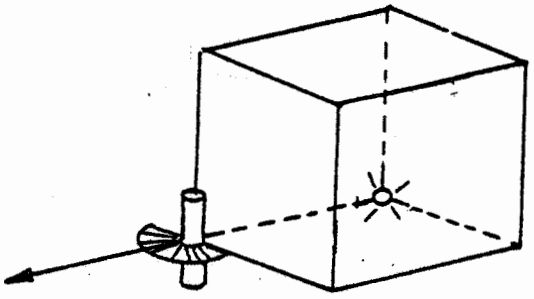
figuur 3a



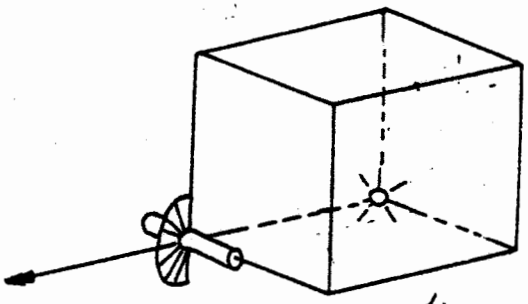
figuur 3b



figuur 4



figuur 5a

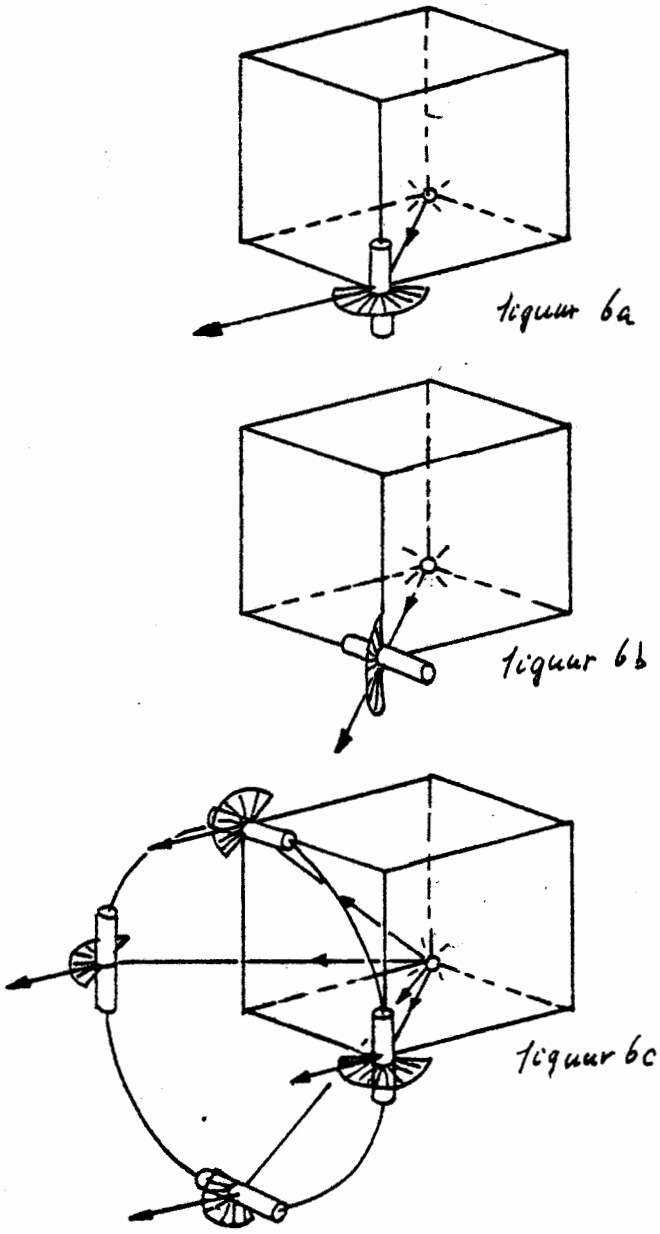


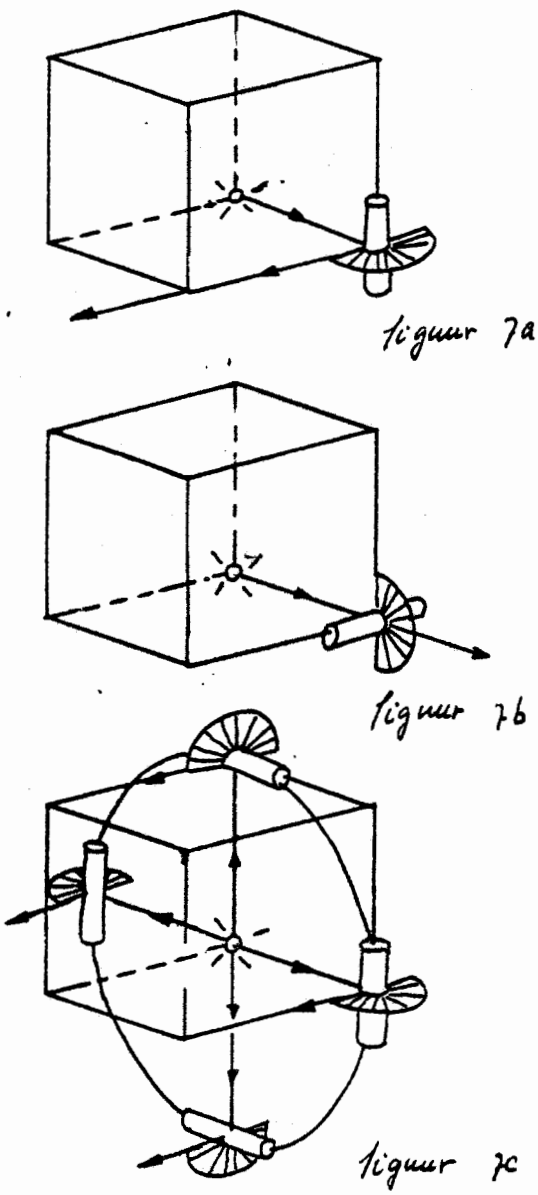
figuur 5b

In de figuren 3a en 3b is in meer detail getekend wat er met een aantal bundels lichtstralen die op de (cilinder)lens vallen gebeurt t.g.v. reflektie en (tweemaal) breking. De andere mogelijkheden zijn hier van geen belang.
Lichtbundel 1 valt nagenoeg loodrecht in en splitst in twee bundels: een die reflekteert, 1', en een die na twee maal breking doorgaat, 1''.
Lichtbundel 2 valt scherend in en splitst in 2' en 2''.
De deviatie van 1' is ongeveer 180°, van 2'' ongeveer 90°, maar de deviatie van 2' en 1'' zijn veel kleiner, bijna 0°.
De verhouding van de intensiteiten van 1'en 1 is heel klein: bij loodrechte inval gaat bijna alle licht gebroken verder.
De verhouding 2'' en 2 is ook heel klein: hij scherende inval wordt bijna alle licht weerspiegeld!
Resultaat:
De lichtbundels die de kleinste deviatie ondergaan behouden de grootste intensiteit.
Bij engelenhaar blijken deviaties tot ongeveer 90° nog opvallend bij te dragen tot het cirkel-schijnsel.
Ik geef dat hiernaast in een tekeningetje weer.

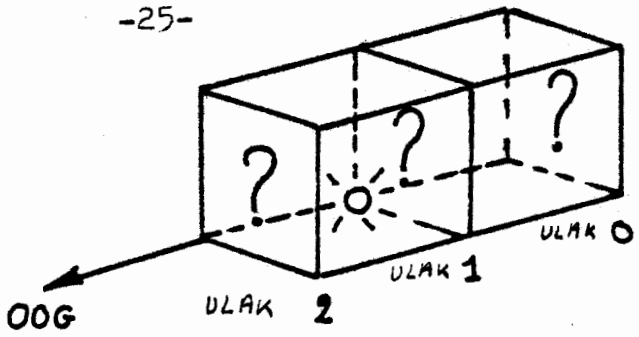
Waarom zijn er cirkels te zien?

Het symbool is een gevolg van de konklusie dat licht dat op een engelenhaartje valt voornamelijk rechtdoor gaat. Daarbij is slechts gekeken naar licht dat invalt in het vlak loodrecht op de lengterichting van het engelenhaartje.
Nu passeren enkele posities en standen van het engelenhaar de revue. Om ons ruimtelijk te oriënteren maak ik gebruik van een oriëntatie-kubus: fig. 4.
Links onderin het achtervlak bevindt zich de (voorlopig) puntvormige kaars. De waarnemer stelt zich vóór de kubus op. Zie fig. 5a en b. Een engelenhaartje wordt doorsneden door de as kaars-waarnemer en het ligt in het voorvlak. Blijkbaar bereikt onder deze voorwaarde, onafhankelijk van de oriëntatie in dat voorvlak, intens licht de waarnemer.
Zie fig. 6a. Een engelenhaartje op deze plaats zal slechts in deze oriëntatie enig licht naar de waarnemer zenden.

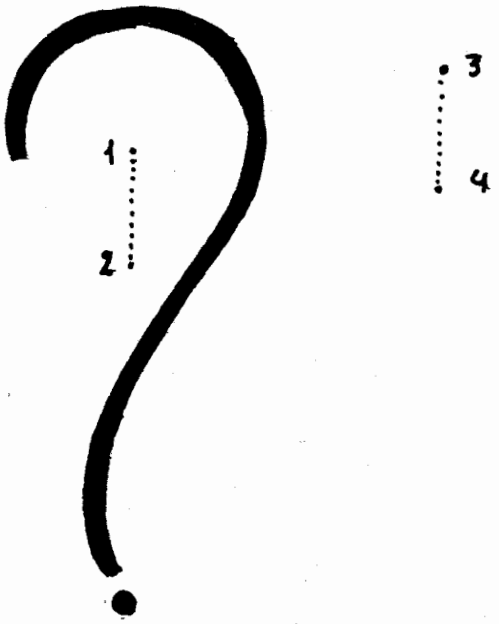




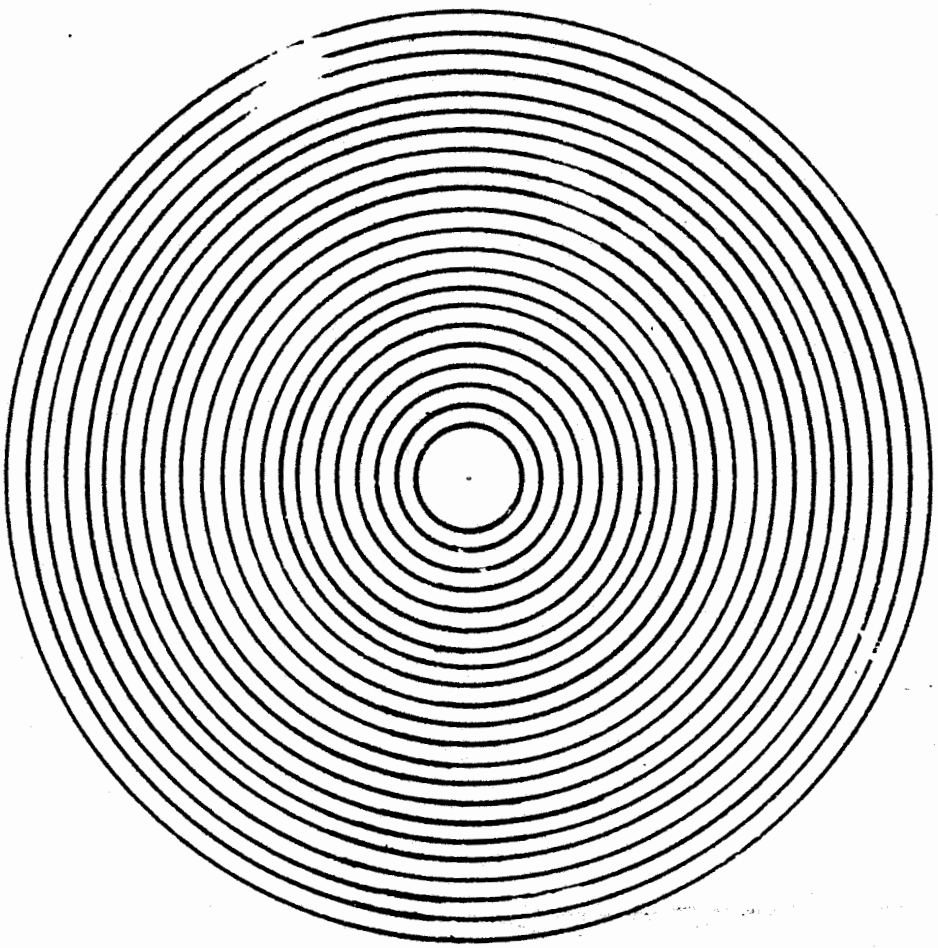
Zie fig. 6b. Dit plaatje is een grove vereenvoudiging van de werkelijkheid. Een nauwkeurige analyse van de stralengang is in dit geval heel lastig en voor de leerling oninteressant.
Maar wel juist is het gemis aan enige lichtstraal naar het oog van de waarnemer!
Zie fig. 6c. Hier is een cirkel getekend in het (uitgebreide) voorvlak van de kubus. Het is een generalisatie van fig. 6a: als een engelenhaartje raakt aan deze cirkel draagt het in het raakpunt bij aan het cirkel-schijnsel.
De figuren 7a, b en c zijn analoog aan de figuren 6a, b en c. Het engelenhaar bevindt zich nu niet in het voorvlak maar in het achtervlak. Omdat het licht dat bijdraagt aan het cirkel-schijnsel nu een deviatie van 90° moet ondergaan is het slechts heel zwak.



figuur 8

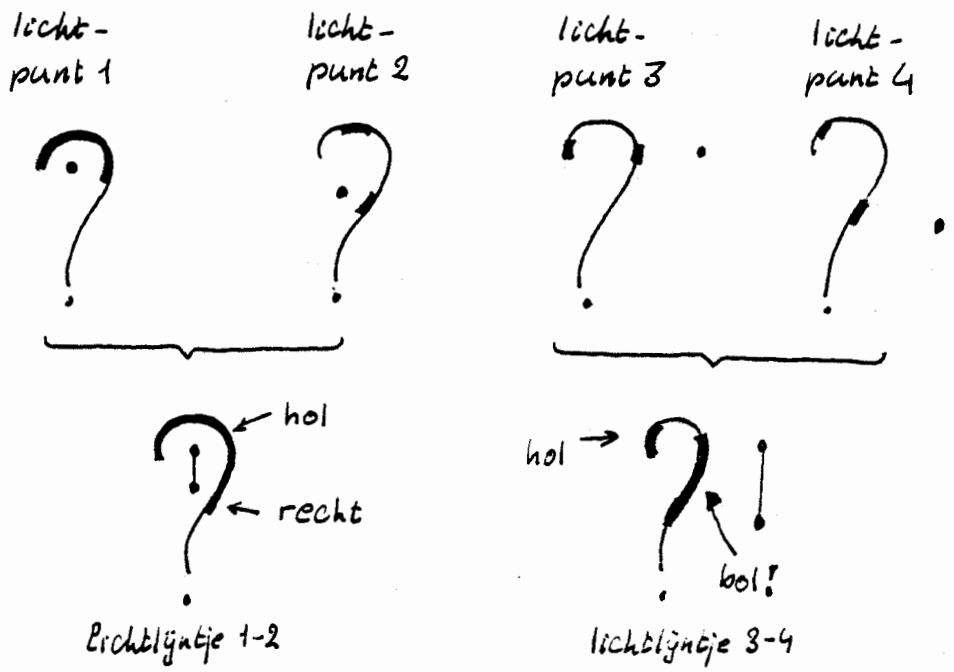


figuur 9a



figuur 9b

Laten we nu de beschouwing veralgemenen door op de eerste plaats een engelenhaartje van een willekeurige vorm te nemen en door op de tweede plaats een lijnvormige lichtbron te nemen, zoals de kaars (dus niet een puntvormige bron).
Als willekeurig gevormd engelenhaartje neem ik ereen in de vorm van een vraagteken, "?".
Zie fig. 8. We behoeven niet te kijken naar het vraagteken in vlak 0. Of het ? in vlak 1 of 2 ligt is niet van belang voor de volgende redenering.
Welk deel van het ? zal bijdragen tot het cirkelschijnsel?
Zie fig. 9a en 9b. Dat zullen die delen zijn die raken aan cirkels, cirkels met middelpunten op de as kaars-waarnemer.
Om zulke delen op te sporen maakte ik een transparant van een verzameling koncentrische cirkels: fig. 9b.
Dit cirkel-transparant leg ik op fig.9a, dus op het ?-vormige engelenhaartje. Eerst met het middelpunt op punt 1, dan met middelpunt op punt 2, enz. Het is nu vlug te zien welk deel van het ? raakt aan cirkels. In onderstaande figuur is met een verdikking aangegeven welke delen dat zijn. Deze stukjes lichten op. Als de lichtbron lijnvormig is, bijvoorbeeld zo groot als lijntje 1-2, of lijntje 3-4, moet je als volgt handelen. Leg het middelpunt van de cirkels eerst op punt 1 en verschuif het middelpunt dan over lijntje 1-2 naar 2. Kijk welke delen van het ? beurtelingsraken aan de cirkels. Een zelfde werkwijze geldt uiteraard voor het lichtlijntje 3-4.



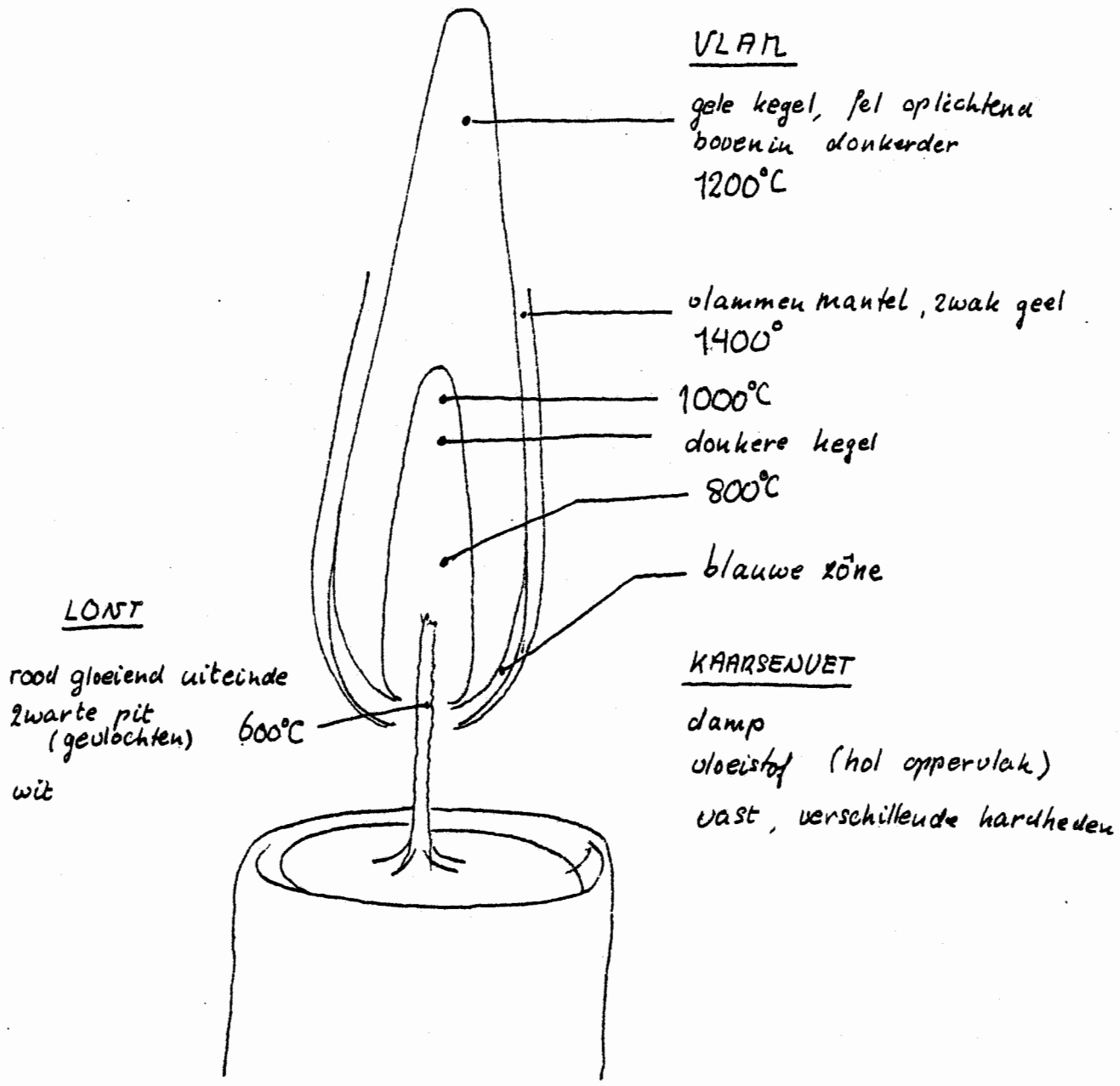
Het vreemde is dat bij niet-puntvormige lichtbronnen niet alleen holle stukjes engelenhaar meedoen maar ook rechte stukjes en zelfs bolle stukjes.
Wanneer je een bosje engelenhaar voor de kaars houdt en nauwkeurig toeziet is het frappant hoe weinig cirkelfragmentjes delen zijn van de bedoelde koncentrische cirkels! Er zijn er zelfs bijna geen. Alleen als de bron puntvormig is zie je echte cirkelstukjes. Het zijn er echter heel weinig, want ook al zijn er heel veel haartjes, er zijn er maar weinig die zo mooi georiënteerd zijn, dat ze meedoen aan het cirkel-schijnsel.
Je ziet dat bijvoorbeeld als je van boven af neerkijkt op een kaars, waarboven je wat engelenhaar houdt. (Laat het niet smelten!)

Samenvatting

Licht dat van een enkel engelenhaartje afkomstig is (na reflektie of breking) is het meest intens als de deviatie het geringst is. De intensiteit bij kleine deviaties is echter zo groot, dat het engelenhaartje licht lijkt te geven als een mini-TL-buisje.
Een engelenhaartje dat bijdraagt aan het cirkel-schijnsel moet een speciale positie en een speciale oriëntatie hebben, d.w.z.
1. Het moet gelegen zijn in een vlak vóór de kaars dat loodrecht staat op de as kaars-waarnemer.
2. Het haartje moet zo georiënteerd zijn dat het raakpunten heeft aan een cirkel* met middelpunt op de as kaars-waarnemer.
In 2,5 gram engelenhaar bevinden zich ongeveer 10.000 minuskule haartjes van elk ± 10 cm. Aan genoemde speciale voorwaarden kunnen best enkele engelenhaartjes voldoen!

Literatuur

1. M. Minnaert. De natuurkunde van het vrije veld, deel I, hoofdstuk 1.
2. N.T.v.N. 39, (1973), blz. 1. Foto engelenhaar bij nieuwjaarswens.
3. Baghuis, L. en Hagedoorn, H. Reflektie aan lijnen-patronen. N.T.v.N. 40, (1974), blz. 20-22.
4. Berry, M.V. Reflections on a Christmas-tree bauble. Phys. Ed. 7, (1972), blz. 1-6.



verschillende kleuren en temperaturen
wijzen op verschillende chemische reakties.

figuur 1

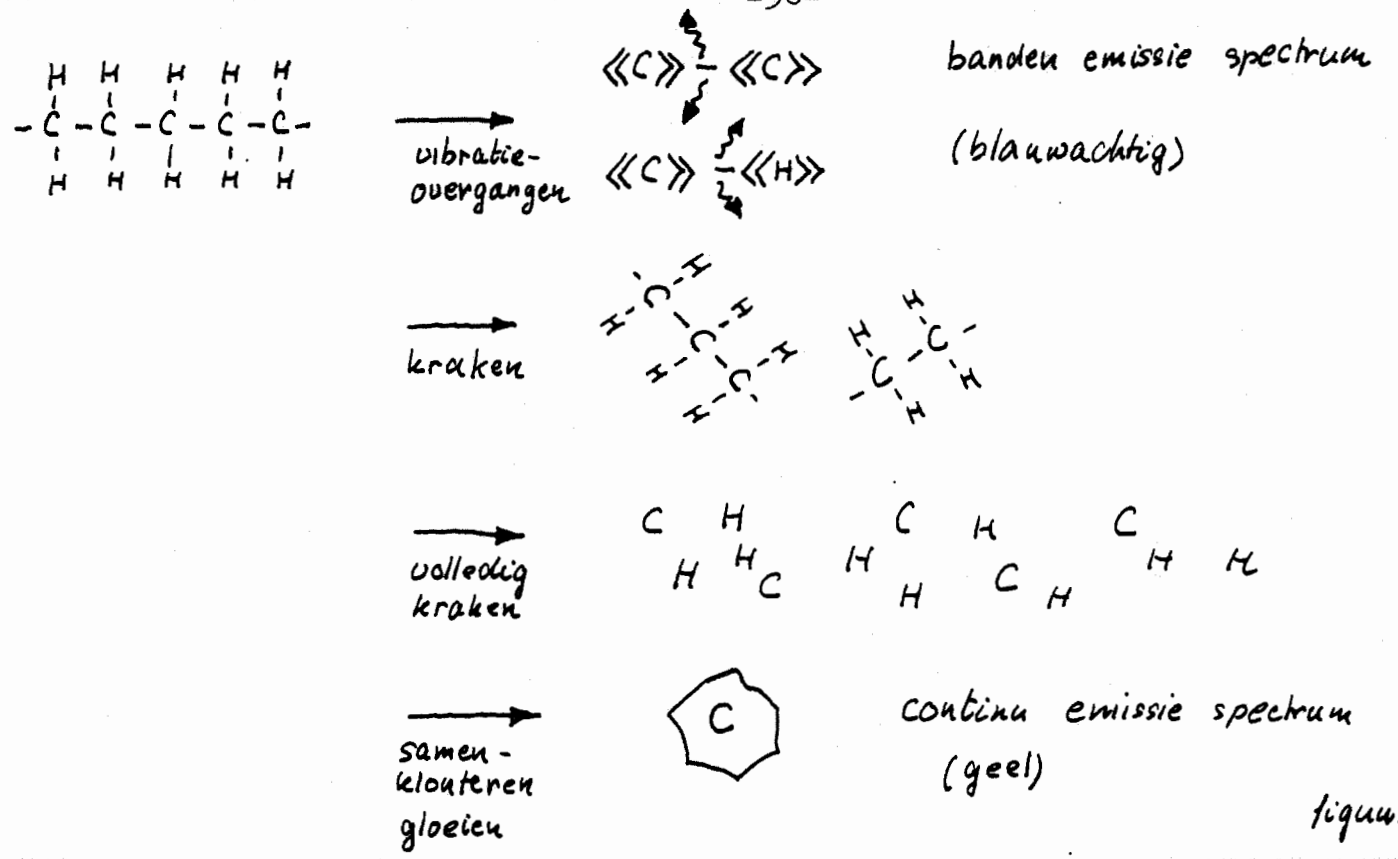
(De figuren 1 en 3 zijn bijna 'letterlijk' overgenomen uit het artikel Lit.2)

DE KAARS

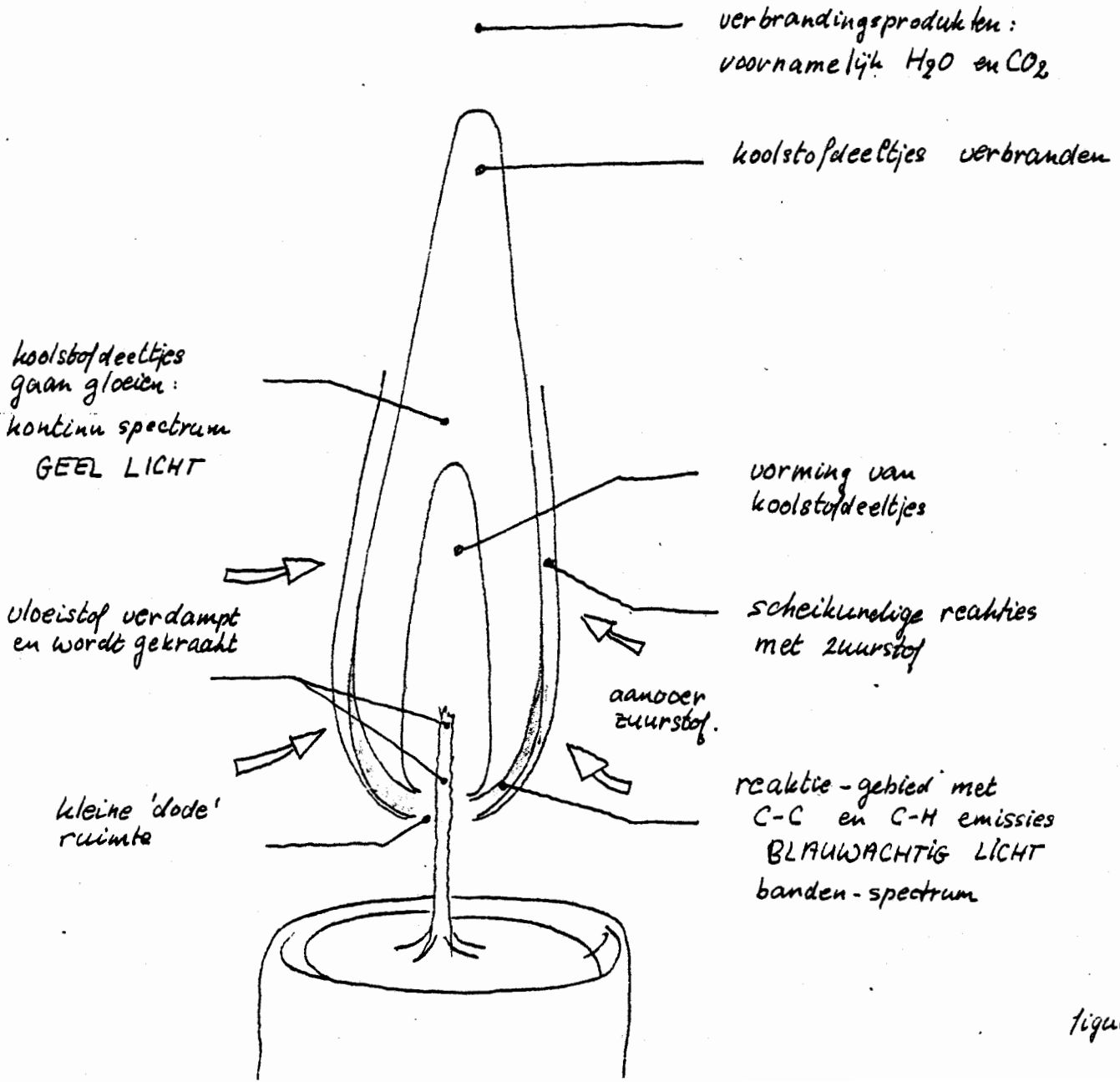
In 1860 hield Faraday zijn beroemd geworden Christmas performances voor een jeugdig publiek in the Royal Institution: the chemical history of a candle. Van deze demonstraties is een mooi boekje uitgegeven. Een zeldzaam motiverend verhaal! Lit.1
Enkele jaren geleden verscheen in Scientific American een fraai overzichtsartikel over de kaars. Lit.2
In alle klassen van onderbouw en bovenbouw heb ik een les besteed aan de kaars vlak voor de Kerstvakantie. In de hogere klassen de wat ingewikkelder verschijnselen, in de lagere klassen de meer eenvoudige. Hier wil ik u even een aantal natuurkundige en scheikundige aspekten rond het fenomeen kaars uiteenzetten. Het is mij gebleken dat leerlingen de behandeling van de kaars erg op prijs stellen en ook het samenbrengen van natuurkundige en scheikundige verschijnselen weten te waarderen. Thuis blijken ze er vaak aandachtig op door te gaan. U zult bovendien telkens weer nieuwe dingen van ze te horen krijgen. Iedereen weet er het zijne van.
Er zijn veel oude vragen, met oude antwoorden. Maar ook rijzen veel vragen die nog beantwoord moeten worden. Enkele voorbeelden:
Waarom vraagt iemand een kaarsje voor hem op te steken voor een tentamen?
Brandt een kaars in het space-lab dat in zijn baan om de aarde draait?
In moderne natuurkundeboeken komt u de kaars alleen nog tegen vanwege de eenheid candela. Deze heeft echter nog maar weinig te maken met een doodgewone kaars!

Beschrijving van de kaars en zijn vlam

De steel van een kaars is van onderen hard en van boven zacht. Blijkbaar is de vaste stof via een smelttrajekt van vast naar vloeibaar aan het smelten. In een badje, omgeven door een dijkje bevindt zich gesmolten kaarsvet. Deze vloeistof wordt door de capillaire werking van de lont opgezogen en in de vlam verdampt. Aldus zijn de drie fasen vertegenwoordigd!
De lont is aan het uiteinde, aan de rand van de vlam, roodgloeiend. Hij is daar in de lucht aan het verbranden. En wel asloos. De lont blijft precies op de goede lengte. Niet te lang, niet te kort. In de vlam is de lont zwart, onder de vlam wit.
Van de vlam valt de gele lichtgevende grote kegel 't meest op. Bovenin is die gele kegel donkerder. De temperatuur bedraagt 1200°.



figuur 2



figuur 3

Binnen en onder deze gele kegel is een donkere kegel waarneembaar. De temperatuur kan van 800° tot 1000° oplopen. Onderaan de vlam zie je een blauwe schaalvormige zône. De vlam is aan de zijkanten omgeven door een zwak gele vlammenmantel. Daarin is de temperatuur het hoogst: 1400° C.
Dit alles staat in fig. 1 schematisch weergegeven.

Het licht van de vlam en enige scheikundige bijzonderheden

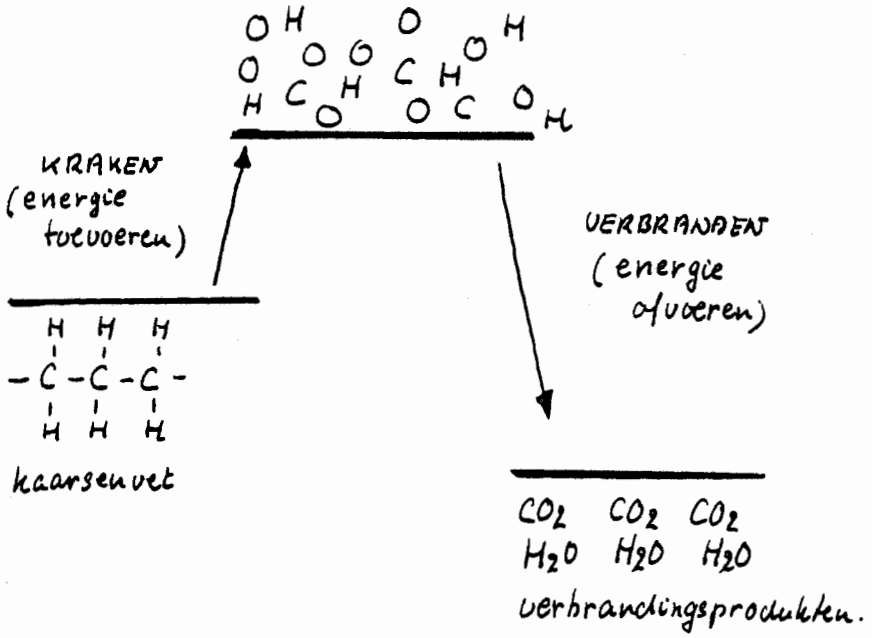
1. In fig. 2 en fig. 3 staan enige scheikundige bijzonderheden afgebeeld. De lange C_nH_m-delen van het verdampte kaarsvet zijn door de warmte heftig gaan trillen. Daarbij zullen vibratie-overgangen plaatsvinden tussen de C-C en de C-H bindingen. Dit geeft een molekulair-banden-emissie-spektrum, voornamelijk in het blauwe deel van het spektrum en resulteert in de blauwe kleur aan de onderkant van de vlam.

2. Wanneer de trillingen al te heftig worden breken de bindingen: het molekuul wordt gekraakt. Dit kraken blijft voortduren totdat er losse koolstofatomen ontstaan. Deze klonteren weer samen tot minuskule roetdeeltjes: dat gebeurt bovenin de donkere kegel. Als u op die plaats de vlam stoort, door er een lepel of zo in te houden, slaat die roet neer.
Kan de vlam ongestoord branden dan gaan de roetdeeltjes fel opgloeien in de daardoor gele kegel: aldaar wordt een kontinu spektrum uitgezonden.
De roetdeeltjes gaan vervolgens volledig verbranden in het bovenste deel van de vlam. Boven de vlam zijn de verbrandingsprodukten CO_2 en H_2O te vinden.

"schaduw" bij verlichting door Na-lamp

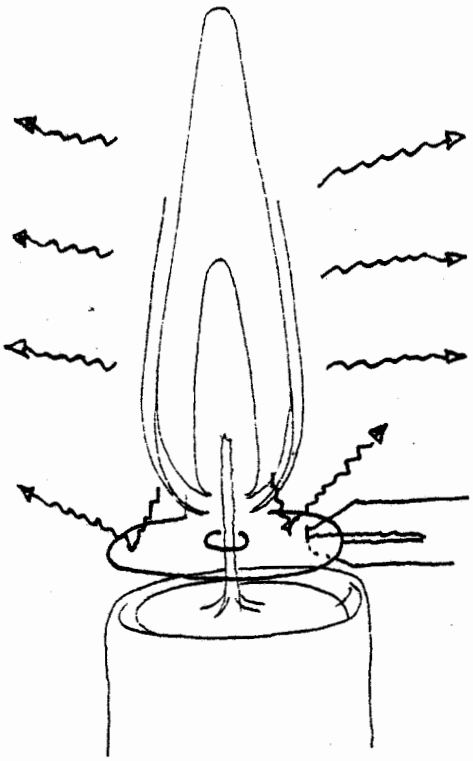
3. Ook is er nog op eenvoudige wijze de gele natrium-emissie-lijn terug te vinden; kijkt u maar door een zakspektroskoop naar de vlam. Als de vlam in een donkere ruimte wordt belicht met een natriumlamp, dan ziet u van de vlam geen 'schaduw', maar net boven de uit de vlam stekende lontpunt ziet u een zwart veegje: het natriumlicht dat van de lamp afkomstig is, werd geabsorbeerd; u ziet dus de omkering van de natrium-lijn. Inderdaad blijkt de lont met Na-zouten geprepareerd te zijn.

Aansteken, branden en uitblazen van de kaars



Aan het kaarsvet-molekuul moet warmte worden toegevoerd om het te ontleden, kraken. In het tekeningetje is alleen het C_nH_m-deel van het molekuul weergegeven.
Deze warmte is aanvankelijk van de lucifer afkomstig: de kaars moet immers worden aangestoken. Als de kaars eenmaal brandt zorgt de vlam van de kaars voor de warmte. Want als de C- en H-atomen bij het verbrandingsproces nieuwe bindingen aangaan komt er energie vrij. En wel meer dan er in het kraakproces verbruikt wordt. Vandaar dat de kaars zichzelf brandend houdt én licht en warmte geeft.
Ik denk dat het uitblazen van de kaars betekent: reaktie-warmte afvoeren en daarmee het kraakproces stoppen.

Het smelten en stollen van kaarsvet



Als men een kaars aansteekt, begint het kaarsvet vlak bij de lont het eerst te smelten. Na enige tijd is een badje van gesmolte kaarsvet ontstaan. De benodigde warmte is natuurlijk niet door stroming toegevoerd maar door straling. Wanneer u die straling laat weerspiegelen zal het kaarsvet niet verder smelten. De vloeistof zal gaan stollen en de kaars gaat uit.
Dat weerspiegelen bereikte ik door een klein metalen plaatje waarin een gaatje zit, vastgehouden door een tangetje, snel over de lont te schuiven. De vlam blijft nog even aan maar dooft na een enkele minuut.
Bij het stollen van het kaarsvet komt er weer warmte vrij. Ik meen dat als volgt te kunnen laten merken
Ga met het topje van de wijsvinger door het badje gesmolten kaarsvet. Het vloeistofkapje van vet overdekt nu het topje. Dat voelt warm aan. Na een paar tellen echter wordt het echt heet: het kaarsvet stolt. Het aldus gevormde vaste kapje voorzichtig loswrikken van de vinger en van binnen bekijken: u ziet een mooie vingerafdruk.
Verklaar de druipslierten en de verdikking ervan aan de onderkant!

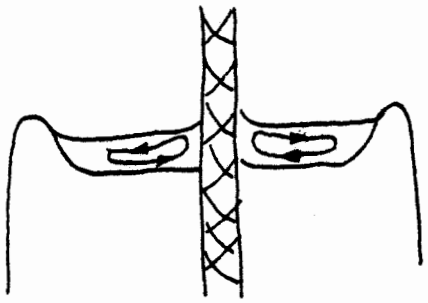
Stroming in het gesmolten kaarsvet

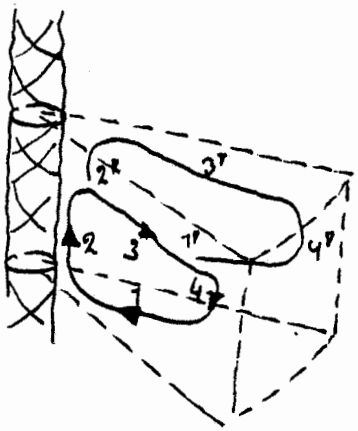
Het gesmolten kaarsvet ligt geenszins rustig in het badje. Het oppervlak ervan heeft een holle vorm bij de lont, vanwege de adhesie tussen kaarsvet en lont. Ook bij het dijkje is de vloeistof-oppervlakte hol vanwege de cohesie tussen het gesmolten en nog vaste kaarsvet (of heet dat adhesie, die aantrekking tussen molekulen van dezelfde soort in twee verschillende fases?)

Gesmolten kaarsvet is tamelijk doorzichtig. Stroming erin moet dan ook zichtbaar gemaakt worden door kleine goed zichtbare deeltjes aan het kaarsvet toe te voegen.
Heel eenvoudig gaat dat door de achterkant van een tweede kaars in de vlam te houden. De vlam doet een paar druppels smelten van kaars twee. In die druppels bevinden zich echter roetdeeltjes van de vlam (de volledige verbranding in de vlam werd nl. even verstoord).
Als nu die verontreinigde druppels in het badje geplonst zijn is het stromingspatroon prachtig te zien.

- Onderin, 1-1', stroomt de vloeistof samen en gaat daardoor steeds sneller;
- bij de lont, 2-2', stroomt de vloeistof door de geringere dichtheid omhoog;
- aan het oppervlak kan de vloeistof weer in bredere banen, 3-3', terugstromen,
- en tenslotte, bij 4-4', daalt de vloeistof en keert weer terug.

De snelheid van stromen is bij de lont verbazend groot. (De onderstroom is langzamer dan de bovenstroom op dezelfde afstand van de lont. Blijkbaar is bij de onderstroom een dikkere laag betrokken. Dit nu lijkt me het gevolg van het verschil in viskositeit van de vloeistof. Hoe koeler, hoe stroperiger).

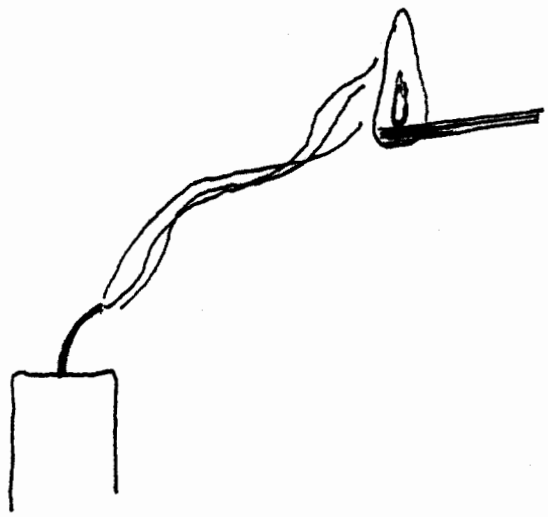




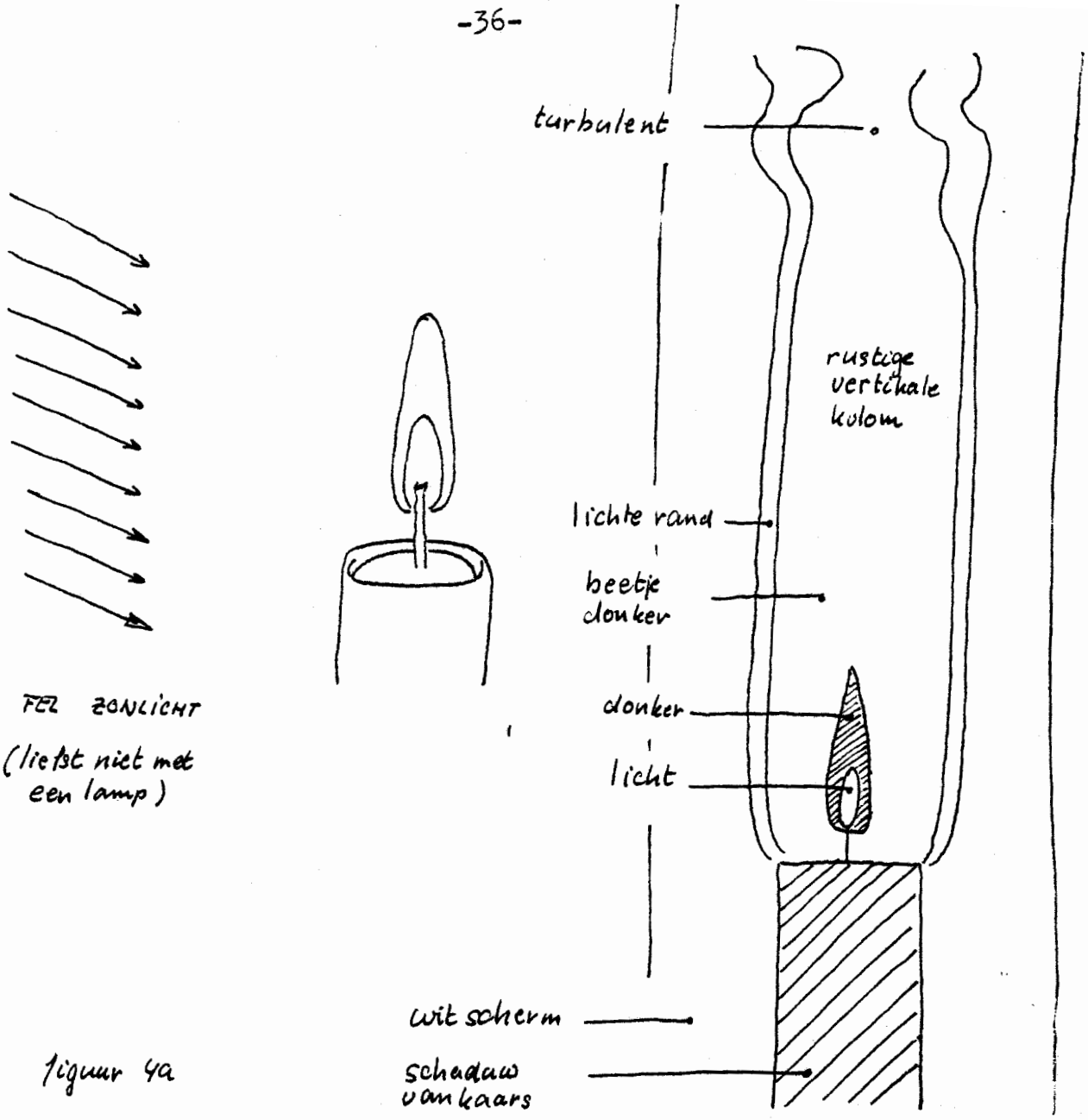
De opzuigende werking van de lont

De lont van de kaars zuigt het gesmolten kaarsvet op. Dit als gevolg van de capillaire werking van de lontvezels, d.w.z. door de aantrekkende kracht tussen de molekulen van het kaarsvet en de lont.
De massa van een kaars met een lengte van 15 cm is bijvoorbeeld 50 gram. De kaars brandt over een lengte van 1 cm op per half uur.
Dus: 50/ 15 x 1800 = 1/600 gram per sekonde = 0,002 gram/sek.
De hele lengte van de vrije lont doet mee. Immers, knip je er een stukje af, dan brandt de kaars met een kleinere blauwe vlam; er is blijkbaar een kleinere toevoer van kaarsvet.

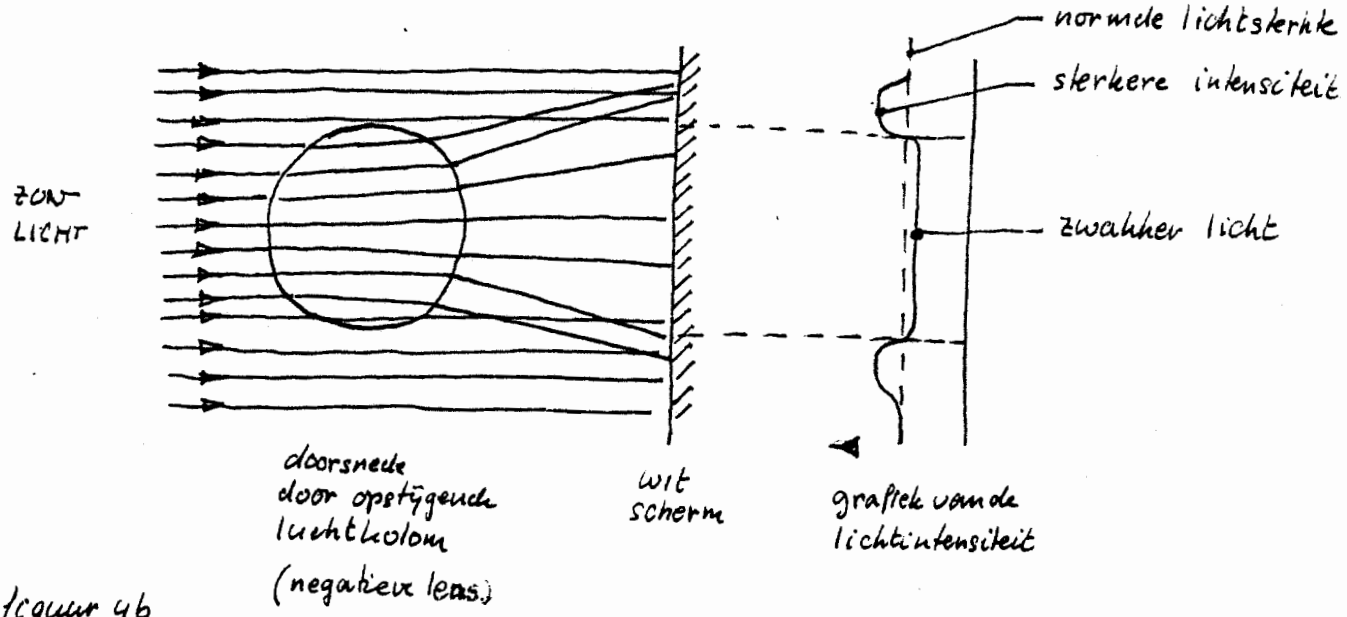
Ook zonder vlam zuigt de lont de vloeistof op. Want als de kaars net uitgeblazen is, dan stijgt er van de top van de lont een witte walm kaarsvetdamp op. Deze damp is nog flink brandbaar. Dit kun je zien als je een brandende lucifer in die walm houdt, bijv. op een afstand van vijf tot tien centimeter boven de lont. Het hele dampsliertje vat vlam en de kaars gaat weer aan.



(In een kaarsenstandaard stonden bij mij drie kaarsen op een rijtje. Toen ik de voorste uitblies ging het witte walmsliertje toevallig door de vlam van de tweede kaars. De walm werkte als 'lont': de eerste kaars sprong weer aan!)



figuur 4a



figuur 4b

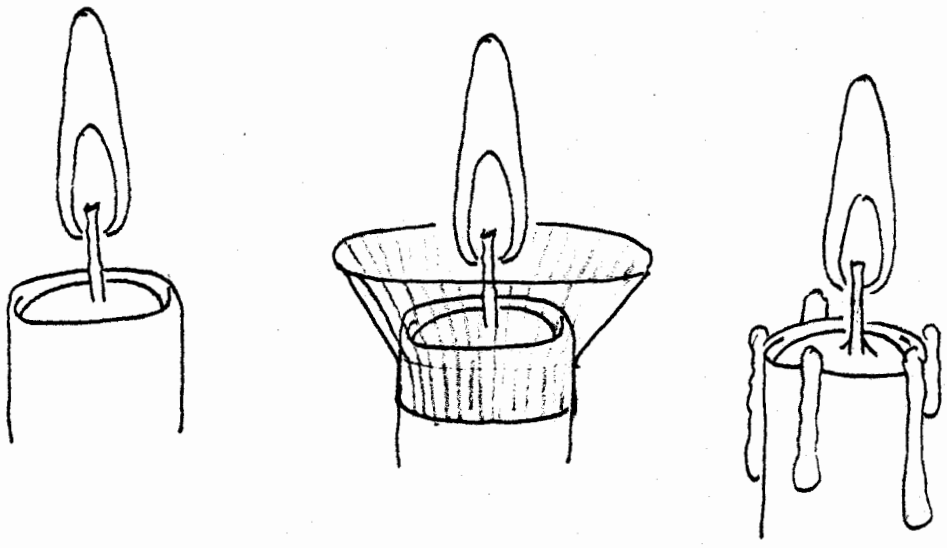
Stroming van de lucht rondom de kaars en de vlam

Plaats een brandende kaars in het felle zonlicht en zet een wit scherm op ongeveer 30 cm erachter. Dan is het volgende te zien (zie fig. 4a):

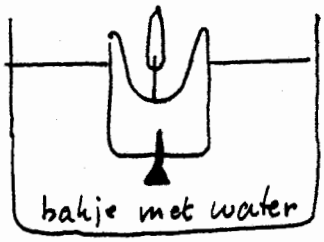
- de schaduw van de kaars en de lont
- de 'schaduw' van de vlam;
  de donkere kegel van de vlam is licht op het scherm; de lichtgevende gele zône van de vlam is donker; blijkbaar absorberen de koolstofdeeltjes het zonlicht
- een ongeveer vijf cm brede kolom, blijkbaar veroorzaakt door de opstijgende gassen en lucht. Deze kolom is donkerder dan het rechtstreeks beschenen scherm. De kolom wordt echter omzoomd door een lichte rand.
  De verklaring voor het zichtbaar zijn van de luchtkolom is als volgt:
  De hete lucht is ijler dan de omringende lucht.
  De brekingsindex van deze hete lucht is kleiner dan die van de lucht van kamertemperatuur. De luchtkolom is dus een negatieve cilinder-lens. Een ruwe verklaring hiervoor wordt zichtbaar in fig. 4b.
  Na twintig tot veertig centimeter gestegen te zijn wordt de stroming, door afkoeling van de lucht, turbulent.
- de aanstromende lucht onder de vlam is niet te zien; die is immers nog van dezelfde (optische) dichtheid als de omgevingslucht

De lucht die langs de bovenkant van de kaars stroomt voorkomt dat de kaars gaat druipen. De van onder aangezogen lucht stroomt namelijk langs de rand van de kaars en koelt deze. Vandaar dat aan die rand een dijkje blijft bestaan waarin het badje blijft opgesloten.

De rand van de kaars wordt blijkbaar voldoende afgekoeld door de aangezogen lucht, dat het dijkje blijft bestaan.
Wanneer de lucht niet meer langs de rand kan stromen, bijvoorbeeld omdat een kapje (van karton gemaakt) rondom de bovenkant van de kaars wordt aangebracht, verdwijnt het dijkje en gaat de kaars druipen.
Als de kaars druipslierten heeft en het kapje wordt weggehaald, smelten de slierten het laatst. Ze gaan boven de rand uitsteken: de koele lucht, die nu weer langs de bovenkant van de kaars kan stromen, voorkomt lange tijd het smelten van deze kaarsvet-slierten.



Een devotiekaarsje (of theelichtje) dat brandt in een bakje, dat het kaarsje helemaal omhult, smelt volledig.



Een kaars die, verzwaard met een spijker in water wordt neergelaten, krijgt een merkwaardig hoog dijkje. De mate van afkoeling door het omringende water is groter dan wanneer de kaars door lucht wordt omgeven.

Literatuur

1. Faraday, Michael, 1962. The Chemical History of a Candle. Collier Books, New York

2. Walker, J. 1978. The physics and chemistry underlying the infinite charm of a candle flame. Scientific American, 238, (april 1978), blz. 154-162.

3. Gruijter, J.J. de e.a. De kaars, Moller Instituut, Tilburg.