

TABEL I. – *Begin der astronomische seizoenen van 1580 tot het jaar 2400*

jaar	lente (mrt)	zomer (jun)	herfst (sep)	winter (dec)
1580	20.52	21.58	23.05	21.60
1600	20.37	21.42	22.89	21.45
1620	20.22	21.25	22.73	21.31
1640	20.06	21.08	22.58	21.17
1660	19.91	20.91	22.42	21.02
1680	19.76	20.75	22.26	20.88
1700	20.60	21.58	23.10	21.73
1720	20.45	21.41	22.94	21.59
1740	20.30	21.25	22.78	21.44
1760	20.14	21.08	22.63	21.30
1780	19.99	20.91	22.47	21.15
1800	20.84	21.74	23.31	22.01
1820	20.69	21.58	23.15	21.86
1840	20.53	21.41	22.99	21.72
1860	20.38	21.24	22.83	21.58
1880	20.23	21.07	22.67	21.43
1900	21.07	21.91	23.52	22.29
1920	20.92	21.74	23.36	22.14
1940	20.77	21.57	23.20	22.00
1960	20.62	21.40	23.04	21.85
1980	20.46	21.24	22.88	21.71
2000	20.31	21.07	22.72	21.56
2020	20.16	20.90	22.56	21.42
2040	20.01	20.73	22.40	21.27
2060	19.86	20.57	22.24	21.12
2080	19.70	20.40	22.08	20.98
2100	20.55	21.23	22.92	21.83
2120	20.40	21.06	22.76	21.69
2140	20.25	20.90	22.60	21.54
2160	20.09	20.73	22.44	21.40
2180	19.94	20.56	22.28	21.25
2200	20.79	21.40	23.12	22.11
2220	20.64	21.23	22.96	21.96
2240	20.48	21.06	22.80	21.81
2260	20.33	20.89	22.63	21.67
2280	20.18	20.73	22.47	21.52
2300	21.03	21.56	23.31	22.38
2320	20.88	21.39	23.15	22.23
2340	20.72	21.22	22.99	22.08
2360	20.57	21.06	22.83	21.94
2380	20.42	20.89	22.67	21.79
2400	20.27	20.72	22.51	21.64

TABEL II. *Correcties voor andere jaren*

jaar	correctie	jaar	correctie
0	+0.00	10	+0.42
1	+0.24	11	+0.66
2	+0.48	12	−0.09
3	+0.73	13	+0.15
4	−0.03	14	+0.39
5	+0.21	15	+0.63
6	+0.45	16	−0.12
7	+0.70	17	+0.12
8	−0.06	18	+0.36
9	+0.18	19	+0.60

## Wolkenkamers

### C. Floor

#### Inleiding

Eén van de bestanddelen van de lucht, die in variërende hoeveelheden aanwezig is, is water, dat zowel in gasvormige toestand als in vloeibare- (waterdruppeltjes) of vaste vorm (ijsdeeltjes) voorkomt.

Druppelvorming, – de overgang van waterdamp naar water, dus condensatie – treedt in een afgesloten ruimte op bij een relatieve vochtigheid van 100%.

Wel vindt de condensatie dan alleen aan de wanden plaats. In de atmosfeer zijn deze wanden niet aanwezig. Experimenteel blijkt dat druppelvorming in een dergelijke situatie pas optreedt als naast de aanwezigheid van een oververzadiging (relatieve vochtigheid > 100%) een tweede voorwaarde vervuld is: de aanwezigheid van vreemde deeltjes, de z.g. *condensatiekernen*. In dat geval is een oververzadiging van 0,1% reeds voldoende. Condensatie zonder deze kernen zet pas in bij een oververzadiging van 400%.

Condensatiekernen vormen hierdoor een belangrijk studieonderwerp van de wolkenfysica, het onderdeel van de meteorologie dat zich met het ontstaan van wolken en alle natuurkundige processen, die zich daarbij voordoen, bezighoudt.

Men deelt de (condensatie) kernen in door te kijken naar de oververzadiging of de relatieve vochtigheid waarbij zich een druppel rond de kern begint te vormen. Deeltjes die pas bij grote oververzadigingen aangeslagen worden (met een straal van  $10^{-7} < r < 10^{-5}$  cm) noemt men *aitkenkernen*, naar de schotse fysicus John

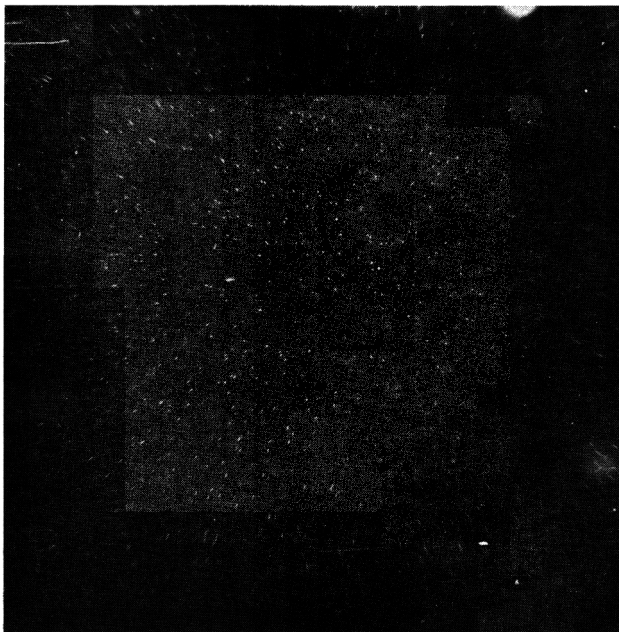


Fig. 1. Druppels in een wolkenkamer.

Aitken, die zich als eerste voor deze deeltjes interesseerde (1887). De grotere deeltjes die bij geringere oververzadigingen kunnen worden aangeslagen spelen vaak een rol bij de vorming van druppels in de atmosfeer en heten daarom *wolken-condensatiekernen*. De grootste bron van condensatiekernen is de bodem, waarvan zich, na verwarming door bestraling van de zon en onder droge omstandigheden, grote aantallen kernen kunnen losmaken. Daarnaast levert het zeeoppervlak kernen, b.v. wanneer luchtbellens aan het oppervlak uiteenspatten. Ook verbranding van allerlei brandstoffen levert condensatiekernen, maar hun aantal is, behalve in verontreinigde lucht in de buurt van verontreinigingsbronnen (fabrieken, steden, verkeerswegen), relatief klein.

Bij het onderzoek aan kernen, – vooral aan wolkencondensatiekernen – maakt men meestal gebruik van wolkenkamers. In dit artikel worden verschillende van die wolkenkamers besproken.

#### *Wolkenkamers*

Een wolkenkamer is een afgesloten ruimte, waarin men een luchtmonster kan binnenlaten om het op kernenaantal te onderzoeken. De afmetingen van die ruimtes verschillen sterk: de nu meestal gebruikte wolkenkamers hebben een inhoud van ongeveer 1 dl, de grootste kamers hebben een inhoud van duizend liter.

Het monster wordt geïntroduceerd door met behulp van een pomp de te onderzoeken lucht door de kamer

heen te zuigen. Daarna wordt in de kamer een bepaalde oververzadiging (= een bepaalde relatieve vochtigheid van meer dan 100%) ingesteld. Hoe dit wordt gedaan, wordt later besproken als de verschillende typen wolkenkamers aan de orde komen.

Door de aanwezigheid van de oververzadiging ontstaan druppeltjes rond de in het monster aanwezige kernen. Deze druppeltjes worden geteld en omdat men aanneemt dat rond elke kern die bij de ingestelde oververzadiging aangeslagen kan worden een druppeltje ontstaat, kent men dan meteen het aantal condensatiekernen bij die oververzadiging.

Hoe groter de oververzadiging, des te groter is het aantal kernen dat aangeslagen wordt.

Deze manier van kernen tellen is nodig, omdat de condensatiekernen zo klein zijn (zie inleiding) dat ze niet met het blote oog, en zelfs niet met behulp van een microscoop te zien zijn.

#### *Telmethode*

De visuele telmethode wordt weinig gebruikt: vooral bij grote concentraties is het bepalen van het aantal druppeltjes, die men als lichtvlekjes in de kamer ziet (zie fig. 1), erg moeilijk. Toch is het meestal wel mogelijk om visueel waar te nemen: het kan van belang zijn om te zien wat er in de kamer gebeurt, hoe de druppeltjes na een paar seconden opeens verschijnen en dan langzaam uitvallen tot er na verloop van tijd geen kernen meer in de kamer aanwezig zijn.

Meestal telt men fotografisch (zie fig. 1). De camera staat dan loodrecht op een felle lichtbundel, die door het midden van de kamer loopt. Als lichtbron dient meestal een kwiklamp. Soms wordt ook gebruik gemaakt van een laser. Met het oog bepaalt men dan het meest geschikte moment van fotograferen. Zowel voor visuele als voor fotografische waarneming wordt wel gebruik gemaakt van een microscoop.

Een speciaal geval is de stereo-waarnemingsmethode, die met behulp van een stereomicroscoop en/of een stereocamera plaatsvindt. Men krijgt dan beelden of opnamen met een groot perspectief, zoals wel bekend van de stereo-viewers met toeristische opnamen, Walt Disney-films enz. Een voordeel hiervan is dat de druppeltjes gemakkelijker van andere lichtvlekjes onderscheiden kunnen worden en ook beter uit elkaar gehouden kunnen worden. Een andere telmethode, die wel wordt gebruikt is het opvangen van de druppeltjes op een met een gevoelige laag bedekte glasplaat of film om ze daarna met het blote oog, of met een microscoop te tellen.

Daarnaast past men fotoelectrische telmethoden toe. Men maakt dan gebruik van de eigenschap dat de druppeltjes het doervallende licht verstrooien. Door



Fig. 2. Aitkenkernenteller. Zijwanden en batterijen zijn verwijderd, zodat de ruimtes I (grote) en II (kleine buis) duidelijk zichtbaar zijn. Verder ziet men aan de buitenzijde van boven naar beneden: de vacuummeter; drie kranen; de meter, met schaalverdeling 0-100 waarbij elk getal een bepaalde kernenconcentratie hoort, die men in een bijgeleverde grafiek kan opzoeken; een controlelampje; twee knoppen voor de nulstelling (grof- en fijnregeling); de aan/uit-schakelaar; de luchtinlaat en de aansluiting voor de pomp.

de 'mist' in de kamer neemt het 'zicht' af. Een lichtgevoelige cel, die zich op de plaats waar een lichtbundel de kamer uittreedt bevindt, neemt het lampje dat de lichtbundel veroorzaakt minder goed waar, naarmate er meer druppeltjes, een dichtere mist en dus ook meer condensatiekernen zijn. De hoeveelheid licht die op het element valt wordt gemeten en is een maat voor het aantal condensatiekernen.

Ook worden de druppeltjes wel eens akoestisch geteld. Bij het verlaten van de kamer langs een microfoon veroorzaken zij hoorbare tikjes, die elektronisch worden geregistreerd.

Men deelt de wolkenkamers in volgens het principe

dat de oververzadiging veroorzaakt. Zo komen hieronder achtereenvolgens aan de orde het expansievat, de chemische diffusiekamer, de thermodiffusiekamer en de nevelkamer.

#### Expansievat

Een expansievat is een wolkenkamer met vochtige wanden, waarbij de oververzadiging wordt veroorzaakt door plotselinge uitzetting van het gasmonster, zonder dat daarbij temperatuuruitwisseling met de omgeving optreedt (z.g. adiabatische expansie).

Door de snelle expansie koelt het monster af, waardoor een oververzadiging ontstaat en in de kamer een groot aantal druppeltjes verschijnt. Het juiste aantal wordt fotoelectrisch gemeten (zie onder telmethoden).

Een voorbeeld van een expansievat is de aitkenkernenteller (zie fig. 2, 3).

De meetruimte I (fig. 3) is van binnen bekleed met nat vloeipapier. De vacuumpomp zuigt, als de 3 kranen (ook tussen ruimte I en II zit een kraan) openstaan, lucht door het apparaat. Als een nieuw monster is binnengelaten worden de beide kranen van vat I gesloten. De pomp zuigt dan het expansievat II leeg, waarna ook de kraan bij de vacuummeter wordt gesloten. Daarna opent men de kraan tussen I en II waardoor de lucht in I expandeert naar II en het aantal kernen kan worden bepaald.

De aitkenkernenteller wordt overal ter wereld gebruikt en is, althans in de U.S.A., in de handel verkrijgbaar. Voor het tellen van wolkencondensatiekernen is het expansievat echter minder geschikt. De erin

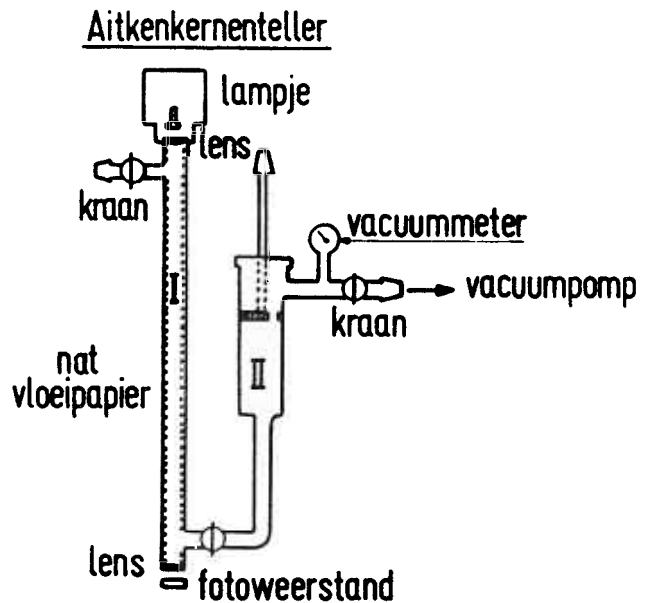


Fig. 3. Schema Aitkenkernenteller. Verklaring: zie tekst.

opgewekte oververzadigingen zijn te groot en bovendien niet voldoende nauwkeurig bekend. Men werkt daarom meer met andere typen wolkenkamers, die aan de atoomfysica ontleend zijn en daar, evenals het expansievat, gebruikt worden voor het volgen van de sporen van door de kamer vallende radioactieve deeltjes.

#### Chemische diffusiekamer

Sommige vloeistoffen, zoals zoutzuur en salpeterzuur 'roken' wanneer ze aan vochtige lucht worden blootgesteld. Dit 'roken', deze mistvorming, is een gevolg van de condensatie van een waterige zuuroplossing op stofdeeltjes, kernen en ionen in de lucht. Dit verschijnsel wordt bij de chemische diffusiekamer benut. Het principe berust op het volgende.

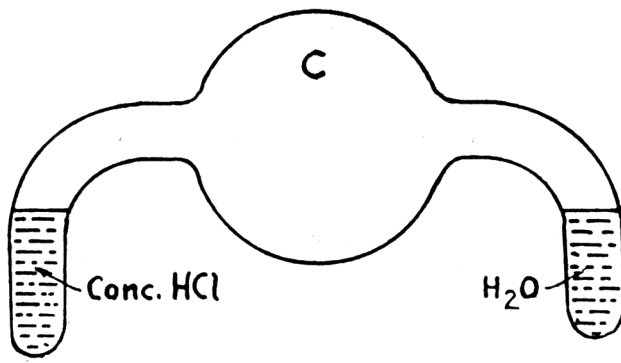


Fig. 4. Principe chemisch diffusiekamer.

In fig. 4 is de ruimte C verbonden met 2 kamers, waarvan de ene zuiver water en de andere geconcentreerd zoutzuur bevat. Als de temperatuur in het vat overall dezelfde is, bevat C zowel verzadigde waterdamp als verzadigd zoutzuur. Door diffusie beweegt er waterdamp van het wateroppervlak naar het zoutzuuroppervlak en omgekeerd. Dit proces gaat net zo lang door tot de beide vloeistoffen dezelfde samenstelling hebben.

Daarvoor heerst er in C een oververzadiging (zowel t.o.v. waterdamp als t.o.v. de zoutzuurdamp), waardoor kernen kunnen aangeslagen, waargenomen en geteld. De op deze manier verkregen oververzadigingen zijn vrij groot, zodat men een dergelijke wolkenkamer als aitkenkernenteller kan gebruiken. Men giet dan voor gebruik zoutzuur op de bodemplaat en bevestigt vochtig filtreerpapier tegen de bovenplaat van de wolkenkamer.

Door in plaats van geconcentreerd zoutzuur een verdunde oplossing te gebruiken kunnen ook kleine oververzadigingen ingesteld worden, waardoor men de

chemische diffusiekamer tevens voor het tellen van wolkencondensatiekernen kan gebruiken.

Wel heeft men dan voor elke gewenste oververzadiging een andere concentratie nodig.

Naast dit praktische bezwaar zijn een aantal theoretische bezwaren tegen de chemische diffusiekamer in te brengen. Om deze redenen is hij thans minder gangbaar en wordt voor het tellen van wolkencondensatiekernen bijna altijd een thermodiffusiekamer gebruikt.

#### Thermodiffusiekamer

De thermodiffusiekamer heeft zowel tegen de onder als tegen de bovenplaat een vochtig filtreerpapierje of (alleen op de onderplaat) een laagje zuiver water. De bovenplaat (temperatuur  $T_2$ ) met bijbehorend vochtig filtreerpapier heeft een iets hogere temperatuur dan de onderplaat (temperatuur  $T_1$ ). Dicht bij de platen is de dampspanning gelijk aan de verzadigingsdampspanning van water, bij de temperatuur van het natte oppervlak. De verzadigingsdampspanning, soms ook evenwichtsdampspanning genoemd, is de dampspanning waarbij de relatieve vochtigheid een waarde van 100% heeft. Hij neemt toe met toenemende temperaturen en wordt grafisch weergegeven door de getrokken lijn in fig. 5.

In de figuur zijn ook de verzadigingsdampspanningen  $p_2$  en  $p_1$  voor  $T_2$  en  $T_1$  (boven- en onderplaat) aangegeven.

Ten gevolge van langzame wervelingen en diffusie van waterdamp, die in de kamer na het instellen van een temperatuurverschil optreden, heerst er vanaf enkele seconden na het inlaten van een luchtmonster in een

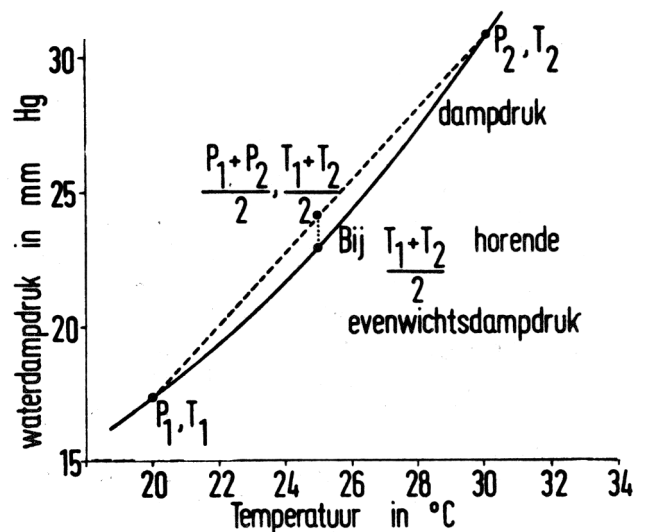


Fig. 5. Dampspanningskromme en principe thermodiffusiekamer.

groot gebied rond het midden van de ruimte tussen de platen een evenwichtstoestand, waarbij de temperatuur

$$T_3 = \frac{T_2 + T_1}{2} = \text{gemiddelde temperatuur en de dampspanning}$$

$$p_3 = \frac{p_2 + p_1}{2} = \text{gemiddelde dampdruk is.}$$

De evenwichtsdampdruk bij  $T_3$  is echter lager dan  $P_3$  zoals we in de figuur kunnen zien, zodat er in de kamer een oververzadiging optreedt en er druppeltjes in de kamer ontstaan. Fig. 6 is een afbeelding van een thermodiffusiekamer in proefopstelling. De peltier elementen (koelementen) geven de onderplaat een lagere temperatuur dan de bovenplaat.

### Thermodiffusiekamer

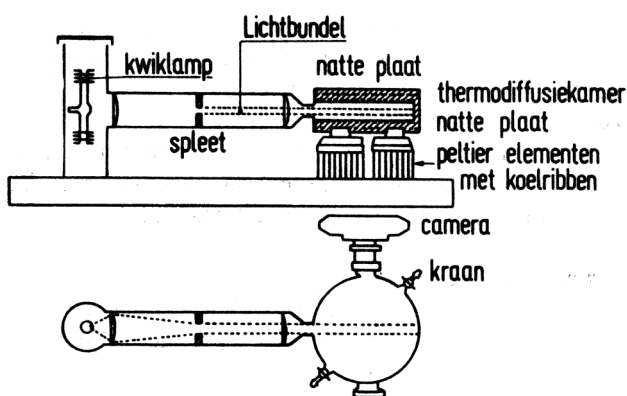


Fig. 6. Thermodiffusiekamer van W. H. Slob (K.N.M.I.).

De afgebeelde thermodiffusiekamer (K.N.M.I.) is tevens te gebruiken als expansievat door zijn luchtdichte uitvoering met goed afsluitende kranen. Op deze manier kunnen de expansiemethode en de thermodiffusiemethode met elkaar worden vergeleken.

De thermodiffusiekamer wordt veel gebruikt voor het onderzoek aan wolkencondensatiekernen, omdat de verschillende oververzadigingen betrekkelijk gemakkelijk instelbaar zijn. In werkelijkheid stelt men geen oververzadiging maar een temperatuurverschil tussen boven- en onderplaat in, waarna men de bijbehorende oververzadiging kan berekenen of uit fig. 7 kan aflezen.

In deze figuur zien we, dat de oververzadiging niet alleen afhankelijk is van het temperatuurverschil  $T_2 - T_1$  maar ook enigszins van de temperatuur van de onderplaat  $T_1$ . Dit houdt verband met de kromming van de dampspanningskromme, die bij hogere temperaturen groter is dan bij lagere.

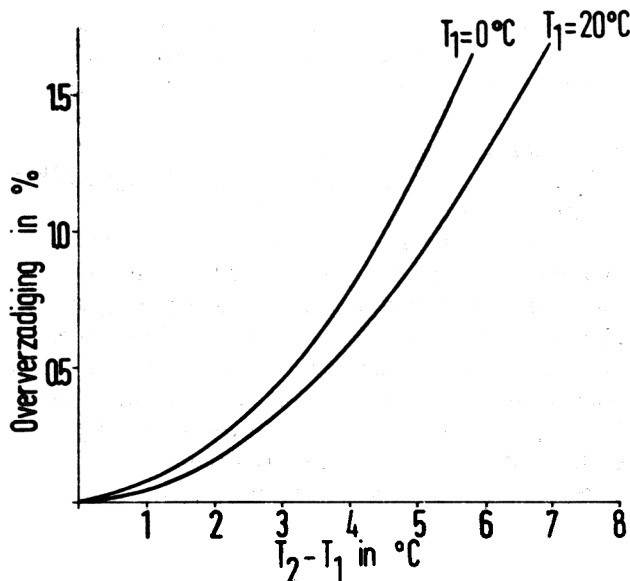


Fig. 7. De oververzadiging in een thermodiffusiekamer voor verschillende temperatuurverschillen  $T_2 - T_1$  tussen boven- en onderplaat.

### Nevelkamer

Het laatste type wolkenkamer dat zal worden besproken is de nevelkamer. Deze is alleen geschikt voor hygroscopische kernen. Dit zijn kernen die sterker dan andere waterdamp kunnen aantrekken en vasthouden. Vaak worden zij al aangeslagen bij relatieve vochtigheden van minder dan 100%. In een nevelkamer heerst een bepaalde relatieve vochtigheid, die kleiner is dan 100%. Hiertoe zijn tegen de boven- en onderplaat filtreerpapierjes met een waterige zoutoplossing bevestigd. Boven dergelijke oplossingen is de relatieve vochtigheid altijd kleiner dan boven zuiver water, waar hij 100% is.

Zo heerst boven een verzadigde keukenzout ( $\text{NaCl}$ )oplossing een relatieve vochtigheid van 75%; boven een ander zout ( $\text{KNO}_3$ ) 94%. Als de temperatuur van de nevelkamer overal dezelfde waarde heeft, heeft men voor elke relatieve vochtigheid een andere zoutoplossing nodig.

Dit bezwaar wordt verholpen door het principe van de nevelkamer te combineren met dat van de thermodiffusiekamer.

Met de dan ontstane zoute thermodiffusiekamer (= thermodiffusiekamer met zout water = nevelkamer met instelbaar temperatuurverschil tussen onder- en bovenplaat) kan men bij  $\text{NaCl}$  alle relatieve vochtigheden boven 75%, bij  $\text{KNO}_3$  alle relatieve vochtigheden

boven 94%, nauwkeuring instellen. Bij relatieve vochtigheden van 100% of meer verdient het gebruik van een gewone thermodiffusiekamer echter de voorkeur.

#### *Wolkenkamers voor zelfbouw*

Een wolkenkamertype dat men gemakkelijk zelf kan maken is de thermodiffusiekamer.

Als kamerwand gebruikt men een ring van regenpijp van ongeveer 1 cm hoog. Bij gebruik van ander pvc of plastic pijp, (gebruik voor de wanden geen geleidend materiaal) is 5 à 10 cm een bruikbare doorsnede. De bovendeksel maakt men van aluminium of een ander metaal van 1 à 3 mm dikte, waartegen vochtig filtreer-, keukenpapier of iets dergelijks wordt bevestigd. De onderplaat kan men net zo uitvoeren, maar ook een waterlaagje van enkele mm dikte kan de onderste begrenzing van de kamer vormen. In de kamerwand boort men 2 gaatjes ongeveer (niet precies) recht tegenover elkaar. Het ene gat dient om een lichtbundel in de kamer te kunnen laten binnenvallen. Deze lichtbundel kan b.v. afkomstig zijn van een zaklamp. Het andere gat dient om door te kijken en ligt niet precies recht tegenover de lichtinlaat, omdat men dan recht in de lamp van de lichtbron kijkt.

Het temperatuurverschil in deze zelfbouwthermodiffusiekamer stelt men in door de bovenplaat met de hand of met behulp van een warm stuk metaal een hogere temperatuur te geven dan de onderplaat of het onder in de kamer liggende laagje water.

In ons geval is het verwarmen van de bovenplaat eenvoudiger dan het koelen van de onderplaat en voor de werking van de thermodiffusiekamer maakt het in eerste instantie geen verschil.

Een monster kan men binnenlaten door snel het bovendeksel op te lichten, en weer op de kamerwand te leggen.

Men moet dan aannemen dat bij het snel omhoog trekken van het deksel het grootste gedeelte van de lucht in de kamer door de daarbij optredende luchtbewegingen is weggestroomd.

Deze aanname is juist, naarmate de kamer lager is. Nadat het bovendeksel weer op de kamerwand is gelegd, en men ervoor gezorgd heeft dat zijn temperatuur hoger blijft dan de temperatuur onder in de kamer, begint de waarneming. Bij het kijken door het kijkgat ziet men druppeltjes ontstaan, die na enige tijd uitvallen. Hoe groter het temperatuurverschil des te duidelijker neemt men de druppeltjes waar.

Vervangt men het waterlaagje onderin de kamer door zoutzuur (HCl) en houdt men de temperatuur van kamer + wanden en deksels constant, dan heeft men een chemische diffusiekamer. (Neem hierbij de agressieve eigenschappen van HCl in acht!).

Introductie van het monster en waarneming geschieden als bij de thermodiffusiekamer.

Op dezelfde manier kan een nevelkamer gemaakt worden. Men giet zout water in de thermodiffusiekamer en houdt de temperatuur constant of brengt weer een temperatuurverschil aan om een zoute thermodiffusiekamer te krijgen. Van experimenten hiermee moet men echter weinig verwachten; de lucht in de huiskamer, keuken of buiten bevat in het algemeen zo weinig hygroscopische kernen dat er weinig is te zien.

Het principe van het expansievat is als volgt te demonstrenen:

In een doorzichtige fles zit wat water, zodat de lucht in de fles verzadigd is. Bij snel zuigen aan de opening 'expandeert' de overgebleven lucht in de fles en treedt druppelvorming op. Dit is vooral erg mooi te zien in het donker met als lichtbron weer een zaklamp of iets dergelijks.

Door het inblazen van rook kan men veel condensatiekernen in de fles brengen, zodat het verschijnsel nog duidelijker zichtbaar wordt. Houdt men op met zuigen en laat men de buitenlucht weer de fles binnestromen, dan wordt het opeens weer helder in de fles. Alle druppeltjes zijn dan ineens weg, want de toestand van voor de expansie is dan weer hersteld.

#### *Druppelvorming in de natuur*

De druppelvorming die in de atmosfeer plaatsvindt treedt vaak op bij oververzadigingen, die volgens het expansieprincipe ontstaan zijn. Bij het omhoog gaan van warme vochtige lucht zet deze langzaam uit, waardoor hij afkoelt, minder waterdamp kan bevatten (zie fig. 5) en er druppeltjes ontstaan.

Aan de bijkomende eis, dat er voldoende condensatiekernen aanwezig moeten zijn, is in de praktijk altijd voldaan.

---

## Kunstmanen, september-december 1970

*Jean Meeus*

In de tabel geven we achtereenvolgens: de benaming; de plaats en de datum van lancering; de oorspronkelijke waarden van de omlooptijd  $P$  (in minuten), van de perigeum-hoogte  $h$  en van de apogeum-hoogte  $H$  (beide in km); de baanhellings  $i$  op de evenaar