

2023 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180011

參展科別 地球與環境科學

作品名稱 Hello 凝結核

得獎獎項

就讀學校 國立臺灣師範大學附屬高級中學

指導教師 王靖華

作者姓名 林瑋庭、謝宜宸

關鍵詞 氣溶膠、雲室、液態水含量

作者簡介



我是師大附中的林瑋庭(左)。在國中參加園遊會時，看到表演者在汽水瓶中加壓，接著瞬間減壓，在瓶中形成雲朵。當下我產生疑問：「為何不用直接減壓，而是加壓後減壓？」為了解決我的問題，我決定自己設計減壓雲室瓶，並以此研究哪種粒子是較佳凝結核。很榮幸能參與 2023 國際科學展覽，也期許自己未來能繼續揭開大氣科學的面紗。

我是來自國立師大附中的謝宜宸(右)，從高一下開始和隊友一起進行這份專題研究，期間我學到許多大氣科學的知識，對於成雲致雨的原理也有更深入的了解。過程中最有成就感的部分莫過於我們改裝實驗裝置，成功優化實驗結果。很榮幸能參加此次國際科展，希望未來能更繼續探討這個主題，做更全面的研究分析，期望能對解決缺水問題有所貢獻。

摘要

在暖雲的形成過程中，吸濕性凝結核佔有舉足輕重的位置且在大氣層中常會有不同種類的凝結核。本研究以自製的減壓雲室瓶模擬絕熱膨脹情況，並探討不同凝結核之成雲效果。減壓使凝結成長的效果在消光量的測量上符合比爾定律。而且利用絕熱膨脹估計出本系統在 0.85 atm 環境下每立方公尺的液態水含量 LWC 大約落在 1.9~2.1 公克，0.93 atm 環境下每立方公尺的液態水含量 LWC 大約落在 0.3 公克，表示本實驗方法能擬合絕熱膨脹過程。且 0.85 大氣壓下，氯化鈉與線香粒子的成長可以達到 1.68 至 1.94 μm ；硫酸銨粒子成長則達到 1.01~1.12 μm 。而 0.93 大氣壓下，硫酸銨粒子成長則是 0.77~1.04 μm 。另外，比較水溶性粒子與固態微粒化學性質，發現水溶性粒子如氯化鈉和硫酸銨的確較適合做為水氣之凝結核。

Abstract

In the formation of warm clouds, hygroscopic condensation nuclei play an important role and there are often different types of condensation nuclei in the atmosphere. In this study, a self-made decompressed cloud chamber bottle was used to simulate the adiabatic expansion, and the cloud formation effects of different condensation nuclei were discussed. The effect of reduced pressure on condensation growth conforms to Beer's law in the measurement of extinction. Furthermore, using adiabatic expansion, it is estimated that the liquid water content LWC per cubic meter of the system in the 0.85 atm environment is about 1.9~2.1 grams, and the liquid water content per cubic meter in the 0.93 atm environment is about 0.3 grams, indicating that this experimental method can fit the adiabatic expansion process. And under 0.85 atmospheric pressure, the growth of sodium chloride and incense particles can reach 1.68 to 1.94 μm ; the growth of ammonium sulfate particles can reach 1.01 to 1.12 μm . At 0.93 atmospheres, the growth of ammonium sulfate particles is 0.77~1.04 μm . In addition, comparing the chemical properties of water-soluble particles and solid particles, it is found that water-soluble particles such as sodium chloride and ammonium sulfate are indeed more suitable as condensation nuclei for water vapor.

前言

壹、研究動機

水資源是台灣各種產業不可或缺的一部份。然而，台灣的降雨時間、空間皆不平均。夏秋是主要降水季節，一旦夏秋降雨少，春季就會面臨缺水問題。2020年未有颱風經過台灣，導致台灣面臨56年來最嚴重旱災。再者，台灣河流短小流急，地狹人稠。使台灣的年降水量雖為2500mm，為世界平均降水量的三倍左右，人均量卻是名列缺水國家的第十八位。

經由文獻探討，我們發現空氣中有許多次微米之懸浮微粒。這些懸浮微粒若是吸濕性粒子，就可以成為凝結中心，凝結空氣中之水蒸氣成為雲滴。而這些雲滴就可以彼此碰撞，增大並降雨，紓解台灣的旱災。所以我們希望可以對這些吸濕性微粒進行研究，探討其在大氣中之凝結與消光效果。

貳、研究目的

- 一、探討有效粒子數與壓力大小對凝結效果的影響
- 二、找出減壓過程中雲滴大小的變化
- 三、了解不同粒子凝結效果的差異

參、研究設備與器材

一、研究器材

- (一) 個人電腦與數據處理軟體 Microsoft Excel
- (二) 光度計(LM-81LX)
- (三) 550 奈米綠光雷射發射器
- (四) 可填充式打火機
- (五) Tes-5110 粒子計數器
- (六) 矽膠、橡膠塞
- (七) 球針
- (八) 抽氣針筒(70 ml*2+350 ml*2)

- (九) 氯化鈉
- (十) 線香
- (十一) 負壓計、正壓計
- (十二) 銅管與單向閥

二、實驗裝置：

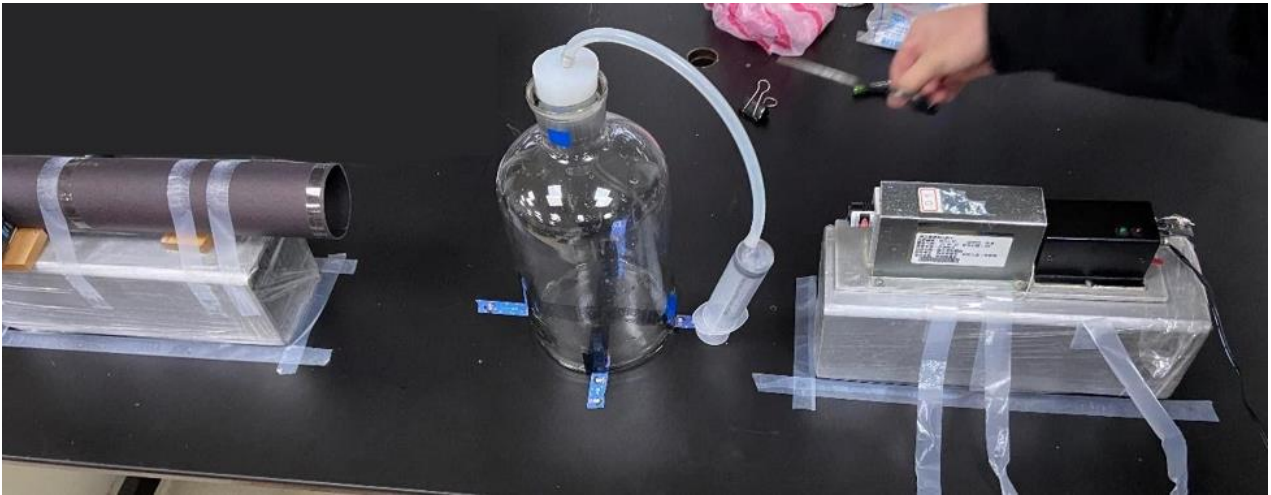


圖 1 第一代雲室瓶(作者自行繪製)

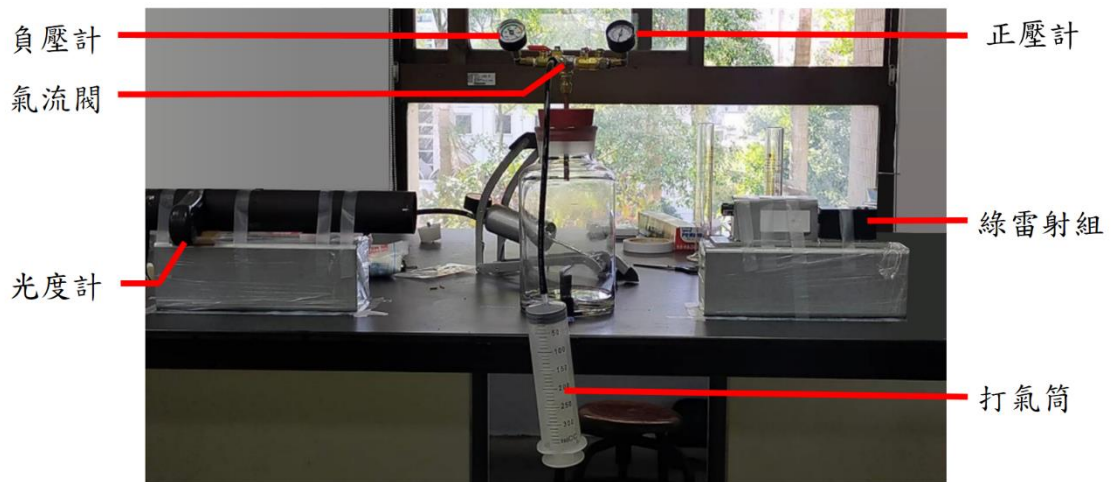


圖 2 第二代雲室瓶(作者自行繪製)

肆、文獻回顧

一、凝結核與凝結成雲之關係

考慮一個絕熱容器，容器中裝有水、含有水蒸氣之空氣。在水面之分子可能脫離水分子之束縛而成為水蒸氣。反之，空氣中的水蒸氣也可能與水面產生碰撞而成為水。凝結與蒸發會同時發生。而當環境中溫度固定時，最終凝結與蒸發之速率會相等，也就是不再有淨蒸發與淨凝結。我們稱在這狀態下的空氣達飽和狀態，而在這個狀態下之水氣分壓稱為飽和水氣壓。

在水氣蒸發的過程中，因為同溫度之水蒸氣比起同溫度之水具有更高的內動能，所以這個過程與熱息息相關。因為在本實驗之溫度範圍內，潛熱之變化相對不顯著，故可假設水的潛熱為一定值，那水的蒸氣壓與溫度關係可寫成式 1，也就是 Clausius-Clapeyron equation。

$$\ln \frac{e_s(T)}{e_{s0}} = \frac{L}{R_v} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \dots\dots \text{式 1}$$

在式 1 中之 $e_s(T)$ 、 e_{s0} 分別代表在溫度在 T 與 T_0 下的飽和水氣壓。L 則是水的潛熱， R_v 是水的理想氣體常數。而 e_{s0} 可經實驗，測得當 $T_0 = 0$ 時， $e_{s0} = 611 \text{ Pa}$ 。而水溫 0 度時水之潛熱約等於 $2.50 \times 10^6 \text{ J/kg}$ 。將以上數據代入式 1 中並化簡，即可得到：

$$e_s(T) = A e^{-B/T} \dots\dots \text{式 2}$$

在上述代入之條件下， $A = 2.53 \times 10^8 \text{ kPa}$ ， $B = 5.42 \times 10^3 \text{ K}$ 。

Clausius-Clapeyron equation 可以解釋關於在絕熱容器中，純質蒸氣壓的平衡。然而，對於大氣中的小水滴而言，因其形成受到活化障礙的限制，所以並不會在達到飽和水氣壓後就立刻形成。事實上，在純水蒸氣中，相對濕度需達 400% 才有可能有水滴形成。

雖然在純水蒸氣中難以形成水滴，但在我們的大氣中充斥著大量吸濕性，次微米的小粒子。這些小粒子會成為凝結中心，故被稱為凝結核(condensation nuclei)。水氣在凝結核上凝結之過程被稱為異質成核(heterogeneous nucleation)，相對的，純水氣在極度過飽和環境下形成的水滴稱為均相成核(homogeneous nucleation)。均相成核在大氣中極難發生，因此較不重要。

在大氣中有許多不同種類之凝結核。相對較大的凝結核，有可能逐漸成長成雲滴。當濕空氣在絕熱狀態被冷卻時，相對溼度會逐漸靠近 100%。此時，吸濕性凝結核

就開始擔任凝結中心。如果空氣繼續冷卻——也可說是氣塊繼續上升，則空氣會達過飽和，並迅速被凝結核凝結水氣直到相對溼度回到 100%。通常大氣都具有足夠的凝結核，讓相對溼度不超過 101%。

一朵雲是由半徑 10 微米的小雲滴組成，密度約是每立方公分數百個小雲滴。雲在平時是極為穩定的，且不會隨意改變大小，除非所有雲滴一起改變。但有兩種狀況會使雲變得不穩定：雲滴受可能因素影響而彼此碰撞，或雲頂溫度過低結冰。當雲不穩定時，雲滴會開始彼此結合形成增長。

雲滴下降的過程中，太小的雲滴，將無法掉落至地面形成雨。如果雲朵發生了碰撞引起的不穩定而使雲滴成長到 18 微米左右或更大，雲滴才有可能掉到地面產生降雨。

而在雲頂溫度過低導致粒子結冰時，因為冰晶表面的水氣壓較低，導致如果冰晶與水滴共存，冰晶會吸收水滴周圍水氣而成長，水滴持續蒸發而消失。這種因蒸氣壓差氣而導致冰晶成長的最佳條件是 -15°C 。

在雲物理學中，粒子的濃度、大小可能會有很大的差異。圖 3 中顯示，雲滴與雨滴、雲滴與凝結核，即便各項前者均是由後者形成，他們的濃度、墜落終端速度也有極大差異。

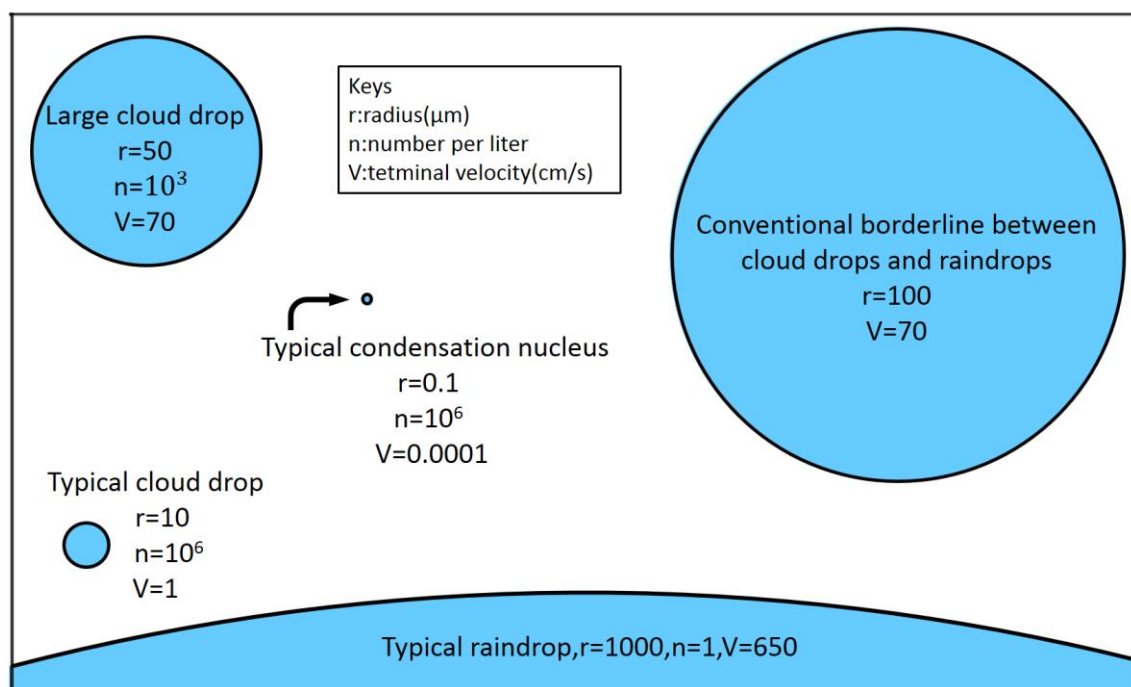


圖 3 凝結核、雲滴、雨滴大小示意圖

資料來源：資料來源十

在異質成核的過程中，雲由氣膠中的凝結核形成。異質成核的雲形成效率與形成量是由空氣中凝結核數量決定的，而不包含上述提到的碰撞不穩定。整體而言，氣膠還可以再依對水的親和力分成兩種：親水性與疏水性。要讓疏水性凝結核凝結需要的過飽和水氣量，與純水蒸氣差不多。親水性凝結核則不然，它們常是可溶性鹽類，且比均相成核需要更少的水氣量，故常在大氣中發生。

根據拉午爾定律，非揮發性、可溶的溶質會降低溶液的飽和水氣壓。這個現象可粗略的用以下方法思考：當溶質融入液體時，在液體表面的一些粒子會被溶質粒子所取代。而如果溶質的飽和蒸氣壓比溶劑還要低，那麼蒸氣壓的下降量就會與含有溶質粒子數成正比。這個現象對於水氣而言，當環境水氣量相同時，具有溶質的水氣飽和水氣壓降低，相對濕度於是提高，更容易凝結成雲。因此溶有溶質之液體比起純水更容易凝結。

在大氣中，主要能形成雲的粒子在 0.1 到 4 微米間。0.1 微米以下之粒子因太小，需要更多水氣方可凝結成大雲滴。

二、粒子大小、數量與消光量之關係

在大氣中，存在許多數微米的懸浮微粒。這些懸浮微粒會使光反射、繞射，減少接受器收到的光度。

粒子之消光效果與符合比爾定律：

$$Z = \frac{I}{I_0} = e^{(-\varepsilon_{ext} \times x)} \dots\dots \text{式 3}$$

其中 I 與 I_0 分別為末光度與初光度， ε_{ext} 稱為消光係數(extinction coefficient)，x 為光線之行經路徑長。在式 3 中，我們將 I 除以 I_0 定義為消光量 Z，以利後續數據處理與討論。

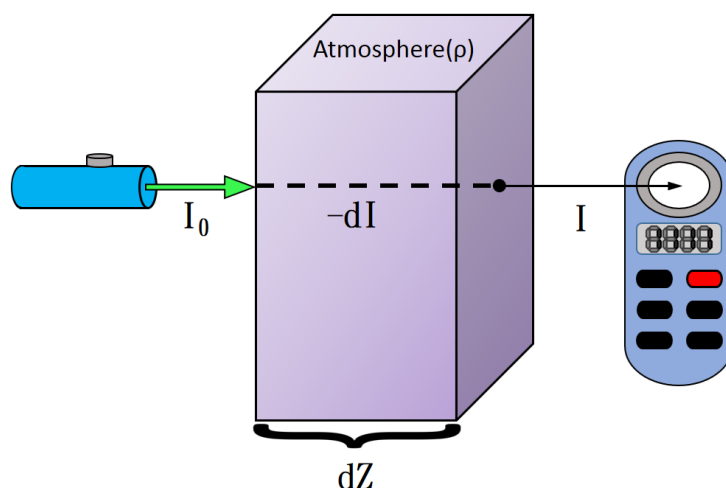


圖 4 大氣消光示意圖

資料來源：資料來源 四

三、消光係數 ϵ_{ext} (extinction coefficient) 與消光效率 Q_{ext} (extinction efficiency)

對於空氣中的雲滴與霧滴，消光能藉由兩種方式進行：散射與吸收。吸收會使雲滴溫度增加，但對整體消光貢獻較少。散射又可區分為折射、反射與繞射圖 5。

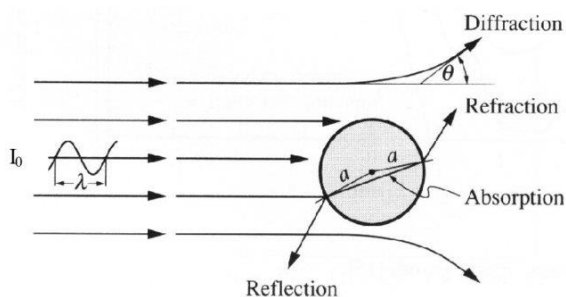


圖 5 單一粒子消光示意圖

資料來源：參考資料 十三

而對於一個已知粒徑與折射率的粒子而言，我們可以求出他的複數折射率形式。

$$m(\lambda) = n(\lambda) + ik(\lambda) \dots\dots \text{式 4}$$

式 4 中 $n(\lambda) + ik(\lambda)$ 均為受波長影響的常數，其中 n 為光折射率，而虛數部分 k 則與吸收係數 $4\pi k/\lambda$ 有關。比起折射率只與散射有關，複數形式多考慮了光的吸收。故消光係數、消光效率均用複數折射率進行計算。

在得到前文所述之複數折射率 m 後，搭配粒子大小 D 與波長 λ ，我們可利用 Mie theory 經複雜計算得出散射效率 Q_{scat} 、吸收效率 Q_{abs} 與消光效率 Q_{ext} 。且 $Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{scat}$ 。消光效率為粒子半徑與波長之函數，對於粒徑相同之粒子而言，消光效率僅與粒子本身化學性質有關。

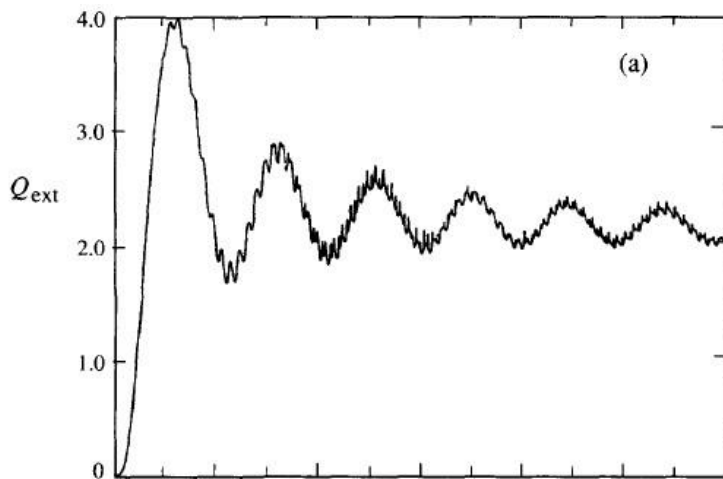


圖 6 波長=0.5 微米，粒徑與消光效率關係圖

資料來源：參考資料 十五

求出消光效率後，再考慮各粒子大小與數量，可得消光係數 ϵ_{ext} 與消光效率 Q_{ext} 之關係，即：

$$\epsilon_{ext} = Q_{ext} \times N \times \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \dots\dots \text{式 5}$$

式 5 中， N 為該粒徑之總粒子數， $\frac{\pi D^2}{4}$ 就是粒徑平面表面積之計算式。因此，在粒子相同，即 Q_{ext} 為定值時， ϵ_{ext} 與所有粒子平面表面積成正比。同理， Q_{abs} 和 ϵ_{abs} 、 Q_{scat} 和 ϵ_{scat} 均有類似關係。

然而，以 Mie Theory 計算複數折射率的方式，僅在光波長 \approx 粒子大小時可用。

當波長 \gg 粒子大小時，使用雷利散射，即 $Q_{scat} \approx \lambda^{-4}$ ， $Q_{abs} = \lambda^{-1}$ 。

當波長 \ll 粒子大小時，用幾何光學求出散射量。此時之 Q_{ext} 趨近 2。

四、霾、能見度與 Koschmieder equation

在大氣中，如果空氣具有比普通情況更多的氣體、粒子(懸浮微粒)且對消光有額外貢獻，我們通常稱這種氣體為霾(Haze)。霾可能是自然形成，也可能是人工污染造成。當空氣中有過多的懸浮微粒時，除了會造成能見度降低，也會對健康產生不良影響。

而空氣中之能見度(Visibility)，就是在空氣中能分辨兩物體時，觀察者與物體之最大

距離，其值與空氣中之亮度無關。而在科學上之定義，就是在背景為純白的背景下能分辨一個完美黑體之距離。此時我們可以定義在距離物體 x 時，視覺對比(Visual contrast, $C_v(x)$)

$$C_v(x) = \frac{I_B(x) - I(x)}{I_B(x)} = \frac{I}{I_0} \dots\dots\dots \text{式 6}$$

式 6 中 $I_B(x)$ 、 $I(x)$ 分別為距離物體 x 時之背景亮度與物體亮度。在先前提到之能見度定義中，當 $x=0$ 時，因為物體為完美黑體，故 $I(0) = 0$ 且 $C_v(0) = 1$ 。

而當人眼在進行能見度之測量時，人在白天可以分辨之 $C_v(x)$ 通常介於 0.18 到 0.3 間，而在大氣科學中常採用 $C_v=0.02$ 進行計算。將此值代入(式 4-)中，可得到 Koschmieder equation，即

$$X_v = \frac{3.92}{\epsilon_{ext}}$$

X_v 為能見度。在海平面，乾淨空氣對 520 奈米光線的 $\epsilon_{ext} = 1.32 * 10^{-5} m^{-1}$ 。代表在海平面空氣最乾淨時，能見度約 296 km。

基於日常生活中難以找到完美的黑體、不同人的視力差異、難以多次觀察比較……等多種不確定因素，利用 Koschmieder equation 測出之消光係數僅能做定性的討論，而難以定量。

五、粒子計數器(aerosol particle counter)原理

粒子計數器主要功能，是對特定環境之空氣粒子濃度與大小，進行快速且準確的測量。氣膠中的粒子只有幾微米大小，難以直接拍攝或用肉眼觀察測量，因此粒子計數器利用粒子對雷射光之散射測量粒子數量與大小。

粒子計數器有幾樣重要組成原件，以下分別介紹其功能：

- (一) 雷射二極體(laser diode)：輸出同波長，同強度之光線在空氣樣本上。
- (二) 穩定流量控制器：控制空氣中粒子在計數器中被測量的時間，確保每粒子散射光之時間相同。
- (三) 光感測器：為一感光元件，測量收到的光度，依據光強度發出不同電壓之電流。
- (四) 脈衝高度分析器：根據電流之波高，將電流分流到不同的電路
- (五) 暗箱：除了隔絕外界光線外，暗箱也裝有數據處理電腦，除了能對已分流之電路進行脈衝數計算外，也可進行濃度換算、粒子數算濃度等數據初步處理。

當我們了解這些原件之功能後，可開始了解粒子計數器之運作原理搭配圖 7：

- (一) 粒子計數器吸入空氣，將空氣壓縮後，以管路將其導至雷射光所在處。
- (二) 當粒子通過雷射光時，會產生散射而使光線偏折至兩側蚌形匯聚面鏡區。
- (三) 兩側之匯聚面鏡聚焦光線在光感測器上，感測器發出電流。
- (四) 脈衝高度感測器與暗箱將觀測數據進行處理，傳換成粒子數與濃度

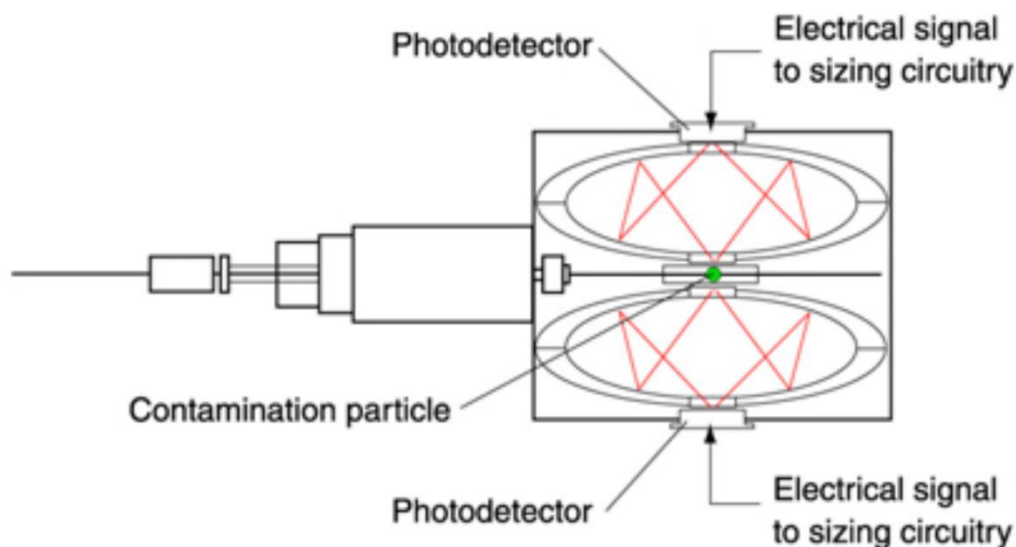


圖 7 粒子計數器運作概念圖

資料來源：參考資料 八

由此可知，粒子計數器其實並非在「算」粒子。而是利用粒子散射之光轉換成電流訊號，並以此推算成大氣中之粒子數。因此，粒子之形狀與光學性質可能會影響計數器之計算結果。粒子計數器預設計算的是空氣中之球形粒子，如果樣品是不規則形，可能會導致測量錯誤。而對於粒子本身光學性質而言，以矽粒子與從熱源產生之微粒舉例：矽粒子具有較高反光特性，所以在測量時可能誤測為較大粒子；熱源產生之粒子則反之，較會吸收光線，就可能誤測為較小粒子。

因為用光學測量，粒子計數器也有飽和濃度的問題。當空氣中粒子濃度太高時，光感測器將無法正確分辨不同粒子散射之光線，使得數個小粒子被誤認成一個大粒子。

六、絕熱膨脹下，凝結量與雲滴之成長大小與溫壓之關係

當我們減少雲室瓶中之壓力時，隨著壓力降低，會有更多水氣得以凝結，促使雲滴擴大。而當在絕熱膨脹情況降低壓力時，大小不同之粒子會如圖 8 中，成長呈相近大小。雲中環境數值遵守式 7：

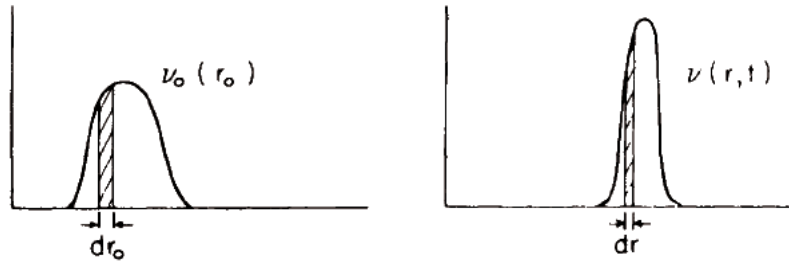


圖 8 粒子成長前後，大小範圍示意圖(縱軸為粒子數)

資料來源：參考資料十

$$\frac{T}{pR(C_p+C_wQ)} \times \exp\left(\frac{W_sL}{T(C_p+C_wQ)}\right) = \text{constant} \dots \text{式 7}$$

以下定義式 7 所使用之代號：

T：環境之溫度，K

P：壓力，Pa

R：理想氣體常數，8.314 J/K*mole

C_p：定壓莫爾熱容，在 S.T.P = 1.005 J/g*K，在本計算中視為定值

C_w：水蒸氣之定壓莫爾熱容，在 S.T.P ≈ 1.86 J/g*K

W_s：氣塊之水蒸氣混合比

L：水之潛熱，常數

Q：氣塊之水混合比

在式 7 中，W_s、Q 均是 T 之函數。C_p、C_w 也是 T 之函數，不過因在我們考慮的溫度範圍內，兩者變化量很小，故可視為定值。經化減後，可得到一個只有 T 的一元非線性方程，利用勘根定理求解。這個方法雖然極為準確，然而實際計算極為複雜，難以執行。為此，我們找到了另一個多估計、分段但較易操作的方法。內容如下：

以下定義 P₁、T₁ 為初壓力、溫度，P₂、T₂ 為恰凝結時之壓力、溫度，P₃、T₃ 為舉升到所求壓力之壓力、溫度。H_a 為氣塊自地面舉升到恰凝結，需要上升的高度。H_b 為氣塊自恰凝結高度舉升到所求壓力對應之高度，需要上升的高度，如圖 9 所示。

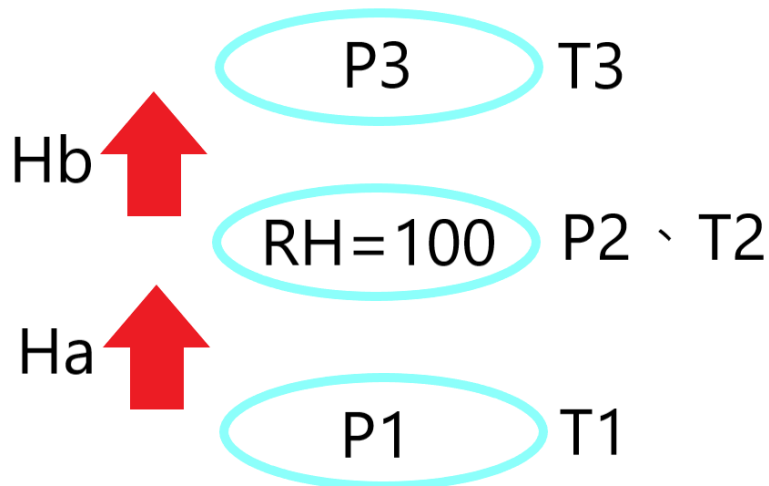


圖 9 氣塊舉升高度與溫壓代號圖與雲滴增大示意圖(作者自行繪製)

以下介紹以較簡易方法，計算雲滴成長大小之步驟。

(一) 求出舉升到氣塊恰飽和，氣塊應舉升之高度：

利用式 8、式 9：

$$\Delta RH = Q_1 \times H_a \dots \text{式 8}$$

$$Q_1 = \frac{g}{T_1 R} \left(\frac{\varepsilon L}{c_p T_1} - 1 \right) \dots \text{式 9}$$

以下定義式 9 使用的代號：

g ：地表重力加速度， 9.8 m/s^2

R' ：乾空氣理想氣體常數 $287 \text{ J/K} \cdot \text{kg}$

ε ： R' (乾空氣氣體常數)/ R_v (水氣之氣體常數)=0.622

C_p ：定壓莫爾熱容，在 S.T.P = $1.005 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ，在本計算中視為定值

L ：水氣之潛熱 = 2260 KJ/kg

就可用 RH、 T_0 等初始環境條件，根據式 9 求出 Q_1 後，根據 RH 與 100 之差，求出舉升高度 H_a 。

(二) 以此高度，求出氣塊恰飽和之溫度與壓力：

利用壓高公式：

$$\Delta P = \rho g \Delta h \dots \text{式 10}$$

式 10 中， ρ 代表大氣之密度， g 代表地表重力加速度。在式 10 代入 H_a 後，可求出 P_1 。

再將 P_1 代入乾絕熱膨脹公式：

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^k \dots \text{式 11}$$

式 11 中， $k = \text{定值} = 0.286$ 。在式 10 代入 P_2 後，就可求出 T_2 。只要是絕熱的乾氣塊都可以利用本公式，進行壓力與溫度的換算。

(三) 求出常數 C_q ：

我們定義：

$$C_q = \frac{C_p}{L} (\Gamma_d - \Gamma_s) \dots \text{式 12}$$

以下定義式 12 使用的代號：

C_p ：定壓莫爾熱容，在 S.T.P = 1.005 J/g*K，在本計算中視為定值

L ：水氣之潛熱 = 2260 KJ/kg

Γ_d 、 Γ_s ：分別代表空氣之乾絕熱遞減律與濕絕熱遞減率。雖然均為溫度之函數，不過在本計算中因溫度變化不大，可視為 10 K/km 與 6 K/km

求出 C_q 後，對於淺雲而言(雲之厚度小於 500m)，整朵雲之 C_q 可視為和雲底相同。

(四) 解出凝結量 LWC 與雲滴大小：

先由式 10，由 P_3 - P_2 求出 H_b 後，可再由式 13 求出 LWC：

$$LWC = \rho C_q H_b \dots \text{式 13}$$

LWC 之因次為 $[M]^{-1} * [L]^3$ ，算出來為一體積濃度單位。

求出 LWC 後，再利用式 14：

$$\frac{\Delta LWC}{\rho} = \frac{\pi}{6} (D_{p0}^3 - D_{p1}^3) \times N_p \dots \text{式 14}$$

在式 14 中，我們定義：

D_{p0} 、 D_{p1} ：分別代表粒子膨脹前與膨脹後之粒子直徑。

N_p ：一公升空氣內的粒子數，也就是粒子濃度

透過式 14，本研究得以會對粒子的成長進行分段計算，求出壓力降低後粒子之成長大小。

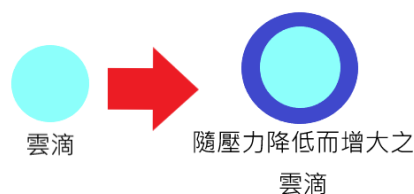


圖 10 粒子成長示意圖(作者自行繪製)

研究方法與過程

壹、實驗設計

本研究採用自製雲室瓶(cloud chamber bottle)的方式，在瓶中輸入水氣與凝結核後，瞬間減壓，並以消光量 Z (接收器光度/發射器光度)作為間接測量凝結量的依據。雲室瓶除了容易輸入凝結微粒外，也能以減壓加速凝結，且環境密閉空間也較易觀察凝結量、測量罐內凝結核數量。是不能在實際大氣進行實驗時，兼具經濟性與便利性的良好實驗裝置。

一、第一代雲室瓶之設計

第一代雲室瓶之實驗步驟如下：

- (一)把雲室瓶倒立，並在瓶口以打火機加熱物質。先在罐中燒入水氣後，將 NaCl 燒入雲室瓶中作為凝結核。
- (二)以 TES 粒子計數器測量燒入的凝結核量。重複取樣，直到相對濕度(RH 值)維持在 88~92 間。
- (三)將玻璃罐放於桌上與十字準心對齊，避免玻璃罐折射導致初始光度差異。(見問題討論(二))
- (四)開啟綠雷射發射器，經過玻璃罐中水氣消光進入右側光度計。測量消光量(發射光度減去接收光度)作為間接測量水氣凝結情況的依據。
- (五)蓋上裝有單向閥之瓶蓋後，以抽氣筒搭配單向閥，進行減壓並持續測量消光量 Z 的變化。

第一代雲室瓶的討論與改良：

- (一)抽氣筒主要抽的對象是液體，對於氣體無法完全密封，減少之壓力可能隨時間回復至 1 atm。
- (二)罐內之凝結核數量難以控制，只能採取粒子計數器之測量結果做為參考，而無法以實驗方法控制罐內粒子數。
- (三)粒子計數器之採樣體積為 1 公升，相較於雲室瓶之體積 2.9 公升太大，可能導致室外空氣流入改變罐內原有空氣性質。
- (四)雲室瓶中，雲的形成在第一次抽氣時就已被決定。進行分段抽氣僅會擴大雲室瓶中

雲滴之大小，而不會增加雲滴之數量。

為了改善以上提及之問題，我們對實驗裝置進行改良，而有了第二代雲室瓶。

二、第二代雲室瓶

在第二代雲室瓶中，我們針對第一代雲室瓶之缺點逐一改良，改良內容如下(對應上方)：

- (一) **加裝氣流閥**，在抽氣後關閉，避免抽氣筒材質導致氣體回流。並加裝負壓計與正壓計，確切得知抽氣後之罐內壓力。
- (二) 改在另一玻璃罐中燒入凝結核後，再以打氣筒將罐中含有凝結核之空氣打入雲室瓶中。以輸入至雲室瓶中之含凝結核空氣量，**控制雲室瓶中凝結核數**。
- (三) **降低粒子計數器取樣量為 0.5 公升**。
- (四) 改以較原容量大五倍之針筒進行單次迅速抽氣，避免雲滴不再凝結之問題。

進行以上幾點改動後之實驗步驟如下：

- (一) 先將凝結核燒入備用之玻璃罐中，蓋上蓋子備用。
- (二) 將雲室瓶倒立，加熱沸水使水氣進入，後以打氣筒打入凝結核。
- (三) 以 TES 粒子計數器測量罐內粒子數，重複取樣，取 RH 介於 88~92 之數據。
- (四) 開啟綠雷射發射器，經過玻璃罐內水氣消光進入右側光度計。測量消光量作為間接測量水氣凝結情況的依據，後進行抽氣減少雲室瓶內數據。
- (五) 觀察光度變化與負壓計數據，並計算消光量。

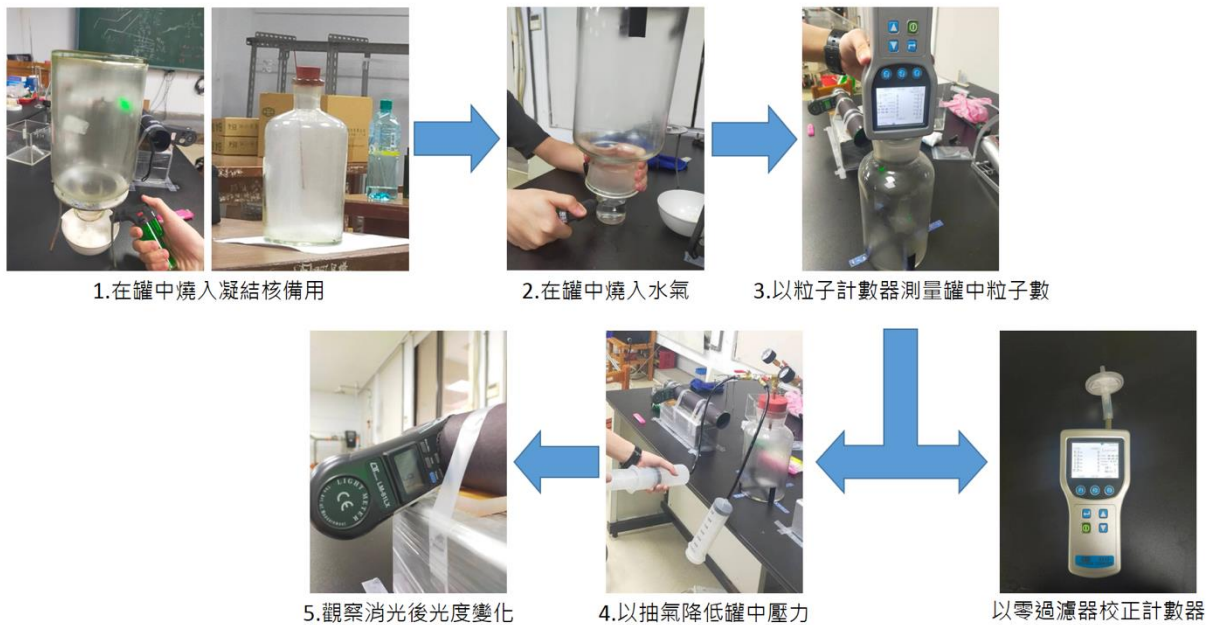


圖 11 第二代雲室瓶操作流程圖(作者自行繪製)

貳、問題討論

一、光度計歸零

為了要準確量測雷射光源於實驗空間中的變化，使用光度計來接收雷射光源，但光度計會受到環境光源的影響，使光度計無法於每次實驗前都出現相同的環境光源大小，因此設計了足夠長度的黑管，以確保環境光源無法藉由反射或散射等方式，影響光度計的數據，這樣一來，每次實驗前，只需要將光度計置入黑管後，光度計就會歸零，不受環境光源的影響，安放於特定接收位置後，只會接收雷射光源，因此當實驗空間內，雲霧產生變化後，即能測得雷射光通過雲室瓶後的光度變化。

二、雲室瓶折射問題

經多次實驗測試，我們發現圓形玻璃材質在雷射光穿透時，會出現內壁折射問題。因此在固定綠雷射組位置後，必須對雲室瓶穿透位置進行測試，並完成標定。方可確認雷射光在固定位置穿透雲室瓶後，能夠準確將光源集中於光度計的中心位

置，且雲室瓶基座也必須完成記號，以確保移動後能夠快速且正確的放回原有標定位置，減少實驗誤差。

三、粒子計數器限制

如同文獻探討(五)所描述的，粒子計數器有其飽和濃度限制。而我們所使用的 Tes 粒子計數器主要供無塵室所使用，故我們所需測量的粒子濃度在其飽和濃度之上

然而，我們仍可利用粒子計數器取得較為定性的結果。還有，我們每次使用粒子計數器後，均使用零過濾計數器進行計數器淨化。除了校正儀器外，也避免吸入過多粒子損害儀器。

研究結果與討論

壹、實驗成果

一、第一代雲室瓶

實驗	組別	加入凝結核	燃燒凝結核時間	加熱水時間
1-1	A	NaCl	1'30"	2'00"
	B	NaCl	2'00"	2'00"
	C	NaCl	2'30"	2'00"
	D	NaCl	3'00"	2'00"

表 1 取樣一分鐘(0.94 L)，凝結核數量與燃燒粒子時間關係表(作者自行繪製)

組別	燃燒凝結核時間	0.3 μm 粒子數	0.5 μm 粒子數	1 μm 粒子數	2 μm 粒子數	5 μm 粒子數	10 μm 粒子數	粒子總截面積 (μm^2)
環境數據		67721	6382	1673	574	51	9	9157.3
A	1'30"	358548	283220	122654	22876	340	11	249153.7
B	2'00"	424754	343373	121873	10325	79	12	225601.0
C	2'30"	371171	250387	54657	2354	108	12	125722.7
D	3'00"	394456	286417	78425	4092	66	13	158570.5

在 A~D 組實驗中，計算粒子總面積只採用凝結核中易使水氣凝結的大小區段(文獻回顧一)，也就是粒徑 0.3 μm ~ 2 μm 之粒子。取樣數據為持續取樣一分鐘之數據，取樣 0.94 公升。

藉由表 1，我們可以發現，燃燒粒子時間與環境中粒子數、粒子總截面積基本無關。因為隨著加熱粒子時間增長，原本已加入之雲室瓶之粒子可能溢散或附著在瓶壁，導致罐內粒子數降低。

表 2 粒子總截面積-消光量-壓力關係表(作者自行繪製)

組別	初始光度 (lux)	1 atm 消光量	0.93atm 消光量	0.86atm 消光量	0.81atm 消光量	0.76atm 消光量	0.72atm 消光量	粒子總截面積 (μm^2)	RH
A	1015	1.29	2.21	2.53	2.52	2.58	2.57	249153.7	99
B	905	2.23	3.14	3.31	3.41	3.41	3.44	225601.0	91
C	1088	1.32	2.02	2.08	2.05	1.98	2.02	125722.7	87
D	960	1.52	2.54	2.54	3.20	3.11	3.04	158570.5	91

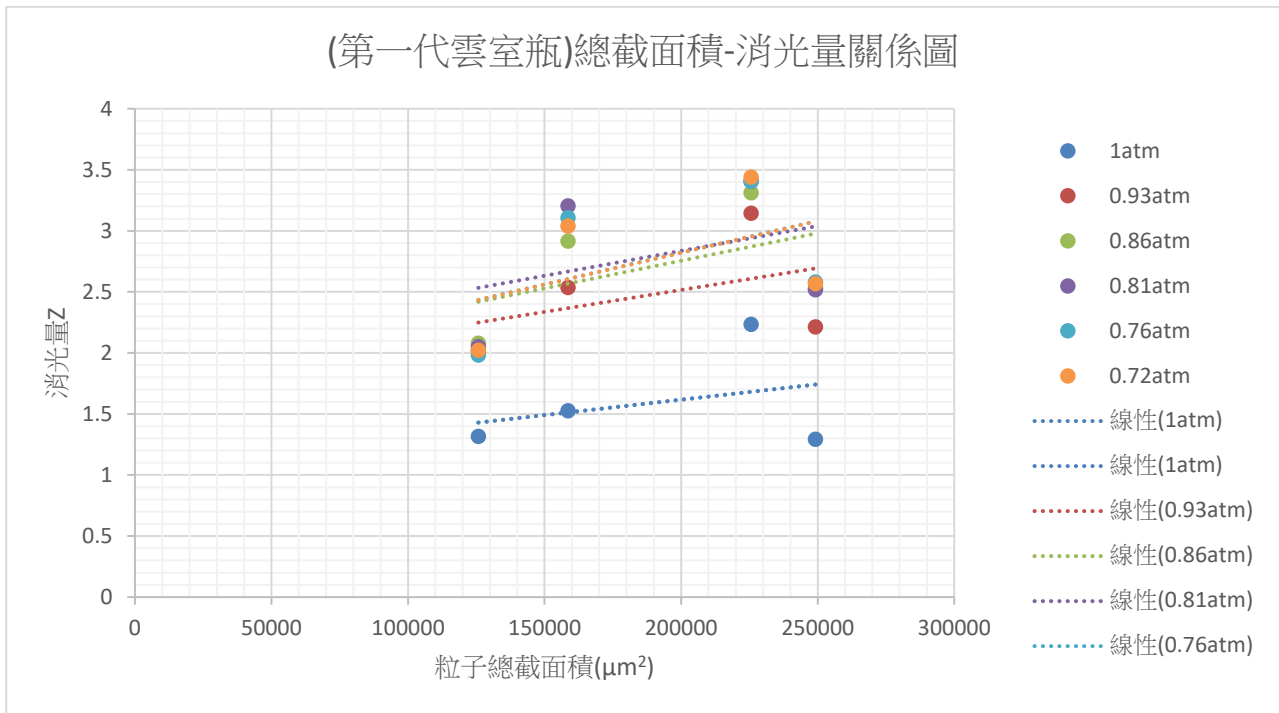


圖 12 粒子總截面積-消光量，在不同壓力之關係圖(作者自行繪製)

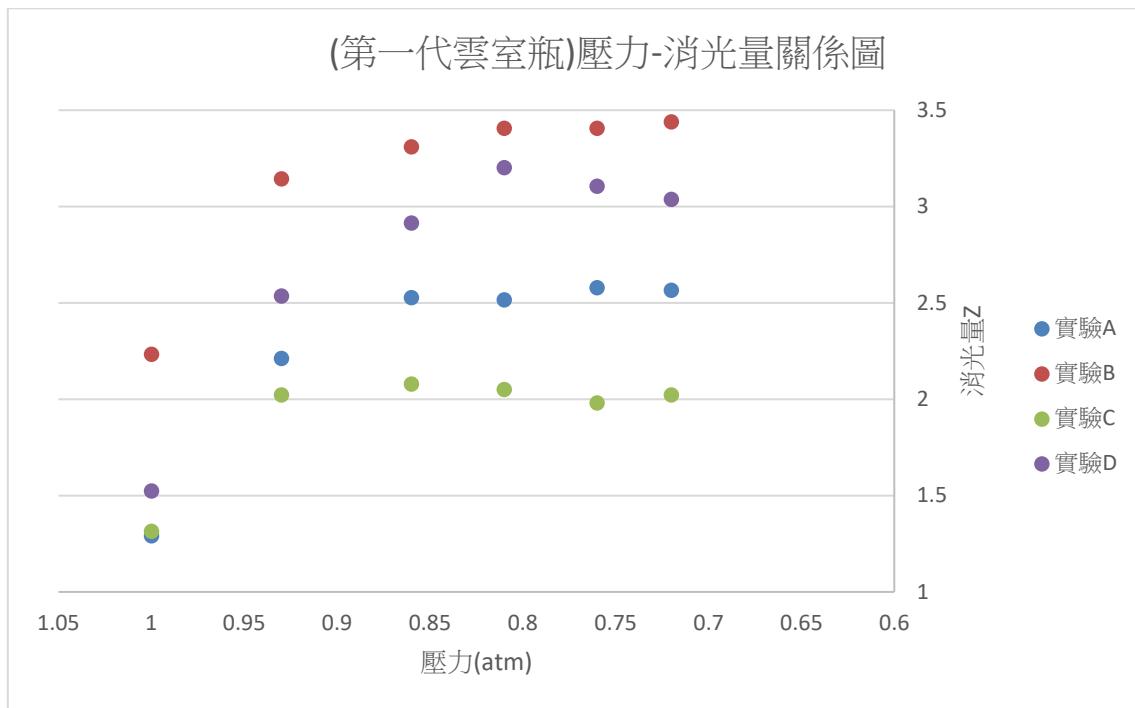


圖 13 壓力-消光量關係圖(作者自行繪製)

根據文獻回顧二之式 3，在表 2 中，我們定義消光量 $Z = -\ln(\text{各壓力之消光後光度}/\text{初始光度})$ ，在光束行經距離相同時，消光量正比於消光係數 ϵ_{ext} 。又根據式 4A-7 消光係數等於消光效率 Q_{ext} 乘上總粒子表面積，因消光效率僅與粒子本身性質有關，所以我們知道理論上消光量應與粒子總截面積成正比。

由圖 12，觀察表中較小三組數據(實驗 BCD)，可以發現消光量與粒子總截面積大致成正比，符合我們的實驗假設。而實驗 A 的誤差是因為取樣錯誤，使得瓶 A 中濕度明顯比 BCD 組都高許多。在不同的溼度下，雲室瓶中能凝結的粒子比例也不同，造成圖中消光量過小的誤差。

觀察圖 13，可知隨著壓力逐漸降低，消光量並非如我們所預期的逐漸增加，而是在第二次抽氣時趨於定值。這是因為當我們抽氣時間拉的過長或分次抽氣，在第一次抽氣形成大量雲滴後，後續的雲滴形成會受到先前已形成之雲滴的阻礙而無法順利形成。反之，已形成之雲滴隨著壓力降低而逐漸增大，使消光量增加。但持續減壓抽氣的過程也相當於從環境移除粒子，使消光量降低。在上述之兩項效果同時作用下，消光量才會趨於定值。

了解「雲滴增大消光量增加」與「移除粒子消光量降低」兩者效果相同後，便可以計算

雲滴隨壓力降低而成長的大小，計算內容如下：

在第二次抽氣(0.86 atm)後，消光量維持相等。此時，可以假設雲滴皆成長為 $2\mu\text{m}$ 大小。且粒子大小遠大於光波長(文獻回顧二)，可假設 $Q_{ext} = 2$ 。

則藉由消光量為定值，也就是消光係數 ϵ_{ext} 為定值，我們可以列出以下等式：

$$D_p = D_{p0} \sqrt{\frac{n_o}{n_p}} \dots\dots\text{式 15}$$

其中 D_p 、 D_{p0} 分別代表其他低壓之雲滴大小與初始雲滴大小。 n_p 、 n_o 則代表其他粒子數與初始粒子數。又由理想氣體方程式可推知，雲室瓶中之粒子數與雲室瓶之壓力成正比。可化簡式 15 成：

$$D_p = D_{p0} \sqrt{\frac{P_o}{P_p}} \dots\dots\text{式 16}$$

此時，利用式 16 對我們的資料進行處理：

表 3(第一代雲室瓶)壓力下降後雲滴成長大小關係表(作者自行繪製)

組別	0.86 atm 雲滴大小(μm^2)	0.81 atm 雲滴大小(μm^2)	0.76 atm 雲滴大小(μm^2)	0.71 atm 雲滴大小(μm^2)
A	2	2.06	2.13	2.18
B	2	2.06	2.13	2.18
C	2	2.06	2.13	2.18
D	2	2.06	2.13	2.18

同時觀察式 16 與表 3 可以發現，減壓時粒子膨脹的大小與粒子密度無關，而是與減少的壓力有關。在本實驗中，雲滴隨著壓力降低而逐漸從 $2\mu\text{m}$ 成長至 $2.18\mu\text{m}$ 。

二、以第二代雲室瓶討論不同凝結核之凝結效果

實驗	組別	加入凝結核	加入含凝結核空氣量	加熱水時間
2-1	E	NaCl	300ml	2'00"
	F	NaCl	450ml	2'00"
	G	NaCl	600ml	2'00"
	H	NaCl	900ml	2'00"
	I	NaCl	1200ml	2'00"
	J	NaCl	1500ml	2'00"

表 4 取樣 0.5 L，加入含凝結核空氣量與粒子數關係表(NaCl) (作者自行繪製)

組別	加入含凝結核空氣量	0.3 μm 粒子數	0.5 μm 粒子數	1 μm 粒子數	2 μm 粒子數	5 μm 粒子數	10 μm 粒子數	粒子總截面積 (μm^2)
環境數據		17080	1734	440	146	15	7	94081.2
E	300ml	208225	129666	42111	6109	33	3	235407.5
F	450ml	206101	160731	53901	4587	17	4	261961.6
G	600ml	207203	156788	49408	3857	53	7	245362.5
H	900ml	197879	125463	37801	10661	165	3	259239.7
I	1200ml	191937	108832	38239	18001	1272	2	309450.6
J	1500ml	193287	141344	57339	15330	104	2	342781.6

實驗	組別	加入凝結核	加入含凝結核空氣量	加熱水時間
2-2	K	線香	150ml	2'00"
	L	線香	300ml	2'00"
	M	線香	450ml	2'00"
	N	線香	600ml	2'00"
	O	線香	750ml	2'00"
	P	線香	900ml	2'00"

表 5 取樣 0.5 L，加入含凝結核空氣量與粒子數關係表(線香) (作者自行繪製)

組別	加入含凝結核空氣量	0.3 μm 粒子數	0.5 μm 粒子數	1 μm 粒子數	2 μm 粒子數	5 μm 粒子數	10 μm 粒子數	粒子總截面積 (μm^2)
環境數據		17480	1634	480	126	14	5	94081.2
K	150ml	211984	211984	138981	54473	476	1	656721.7
L	300ml	238111	238111	179284	99120	14972	1	632002.9
M	450ml	248135	248135	179309	92082	1749	1	486940.2
N	600ml	234239	234239	154299	63250	562	0	870950.9
O	750ml	230479	230479	151799	58336	224	2	428947.5
P	900ml	254135	254135	214237	142577	35664	4	463505.8

實驗	組別	加入凝結核	加入含凝結核空氣量	加熱水時間
2-3	Q	硫酸銨	150ml	2'00"
	R	硫酸銨	300ml	2'00"
	S	硫酸銨	450ml	2'00"
	T	硫酸銨	600ml	2'00"
	U	硫酸銨	750ml	2'00"

表 6 取樣 0.5 L，加入含凝結核空氣量與粒子數關係表(硫酸銨) (作者自行繪製)

組別	加入含凝結核空氣量	0.3 μm 粒子數	0.5 μm 粒子數	1 μm 粒子數	2 μm 粒子數	5 μm 粒子數	10 μm 粒子數	粒子總截面積 (μm^2)
Q	150ml	245665	245665	178692	95092	4742	4	761536.1
R	300ml	29564	29564	27116	20076	8347	1	326246.8
S	450ml	243587	243587	178161	95092	7720	8	835148.6
T	600ml	180829	180829	144785	86830	15418	9	939936.9
U	750ml	249936	249936	197485	120841	16944	6	1190027

在 E~U 組實驗中，計算粒子總截面積的方式改以文獻討論(六)中，對 0.3~2 μm 的粒子數進行雲滴成長大小的估算。且取樣的量從 0.94 L 減少到 0.5 L。

雖然加入凝結核方法從直接燒入凝結核改為間接注入凝結核，仍無法透過實驗方法控制罐中凝結核數。不過間接加入凝結核能省去搬運實驗裝置的麻煩，讓水氣完成加入後就迅速加入凝結核，增加實驗效率與減少變因。

表 7 不同凝結核-消光量-相對溼度關係表(0.85 atm) (作者自行繪製)

組別	加入凝結核	初始光度	0.85 atm 之光度	消光量 Z	RH
E	NaCl	1624	1224	0.2828	91
F	NaCl	1984	1420	0.3345	90
G	NaCl	1522	1120	0.3067	91
H	NaCl	1960	1501	0.2668	89
I	NaCl	1559	1210	0.2534	89
J	NaCl	1147	828	0.3139	92
K	線香	2085	1565	0.2868	91
L	線香	1750	1285	0.3088	88
M	線香	1532	1126	0.3079	90
N	線香	980	727	0.2986	88
O	線香	1010	685	0.3882	89
P	線香	1687	1128	0.4025	87
Q	硫酸銨	1280	964	0.283524	87
R	硫酸銨	1765	1171	0.410293	89
S	硫酸銨	2101	1643	0.24589	90
T	硫酸銨	1529	1179	0.259947	89
U	硫酸銨	1371	1053	0.263897	85

表 8 實驗 E~J 之初始環境數據與 LWC 之計算(作者自行繪製)

組別	E		Q1(mole/kg*m)	0.01481
T1	294		Ha(m)	337.563
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4052.446
RH (相對溼度)	91		P1(hpa)	97307.554
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	290.589
			Hb(m)	928.909
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0021

組別	H		Q1(mole/kg*m)	0.01470
T1	295		Ha(m)	415.771
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4991.337
RH (相對溼度)	89		P1(hpa)	96368.663
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	290.770
			Hb(m)	850.701
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0019

組別	F		Q1(mole/kg*m)	0.01493
T1	293		Ha(m)	372.180
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4468.026
RH (相對溼度)	90		P1(hpa)	96891.974
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	289.246
			Hb(m)	894.292
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0020

組別	I		Q1(mole/kg*m)	0.01481
T1	294		Ha(m)	412.577
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4952.990
RH (相對溼度)	89		P1(hpa)	96407.010
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	289.817
			Hb(m)	853.895
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0019

組別	G		Q1(mole/kg*m)	0.01504
T1	292		Ha(m)	369.305
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4433.502
RH (相對溼度)	90		P1(hpa)	96926.498
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	288.289
			Hb(m)	897.168
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0020

組別	J		Q1(mole/kg*m)	0.01493
T1	293		Ha(m)	297.744
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	3574.421
RH (相對溼度)	92		P1(hpa)	97785.579
空氣密度(kg/m ³)	1.23		T1(K)	290.007
			Hb(m)	968.728
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0021

表 9 實驗 K~P 之初始環境數據與 LWC 之計算(作者自行繪製)

組別	K		Q1(mole/kg*m)	0.01481
T1	294		Ha(m)	337.563
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4052.446
RH (相對溼度)	91		P1(hpa)	97307.554
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	290.589
			Hb(m)	928.909
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0021

組別	N		Q1(mole/kg*m)	0.01470
T1	295		Ha(m)	453.569
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	5445.095
RH (相對溼度)	88		P1(hpa)	95914.905
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	290.378
			Hb(m)	812.903
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0018

組別	L		Q1(mole/kg*m)	0.01493
T1	293		Ha(m)	446.617
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	5361.631
RH (相對溼度)	88		P1(hpa)	95998.369
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	288.481
			Hb(m)	819.856
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0018

組別	O		Q1(mole/kg*m)	0.01481
T1	294		Ha(m)	412.577
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4952.990
RH (相對溼度)	89		P1(hpa)	96407.010
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	289.817
			Hb(m)	853.895
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0019

組別	M		Q1(mole/kg*m)	0.01504
T1	292		Ha(m)	369.305
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4433.502
RH (相對溼度)	90		P1(hpa)	96926.498
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	288.289
			Hb(m)	897.168
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0020

組別	P		Q1(mole/kg*m)	0.01493
T1	293		Ha(m)	483.835
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	5808.434
RH (相對溼度)	87		P1(hpa)	95551.566
空氣密度(kg/m ³)	1.23		T1(K)	288.096
			Hb(m)	782.638
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0017

表 10 實驗 Q~U 之初始環境數據與 LWC 之計算(作者自行繪製)

組別	Q		Q1(mole/kg*m)	0.01436
T1	298		Ha(m)	502.801
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	6036.126
RH (相對溼度)	87		P1(hpa)	95323.874
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	292.813
			Hb(m)	763.671
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0017

組別	T		Q1(mole/kg*m)	0.01415
T1	300		Ha(m)	510.516
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	6128.747
RH (相對溼度)	87		P1(hpa)	95231.253
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	294.696
			Hb(m)	755.956
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0017

組別	R		Q1(mole/kg*m)	0.01425
T1	299		Ha(m)	389.730
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	4678.712
RH (相對溼度)	90		P1(hpa)	96681.288
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	294.986
			Hb(m)	876.742
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0019

組別	U		Q1(mole/kg*m)	0.01425
T1	299		Ha(m)	584.595
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	7018.068
RH (相對溼度)	85		P1(hpa)	94341.932
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	292.927
			Hb(m)	681.877
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0015

組別	S		Q1(mole/kg*m)	0.01425
T1	299		Ha(m)	428.703
Cp(kJ/kg*k)	1.005		P2-P1(pa)	5146.583
RH (相對溼度)	89		P1(hpa)	96213.417
空氣密度(kg/m ³)	1.225		T1(K)	294.577
			Hb(m)	837.769
			Cq(l/m)	0.000002
			LWC(kg/m ³)	0.0019

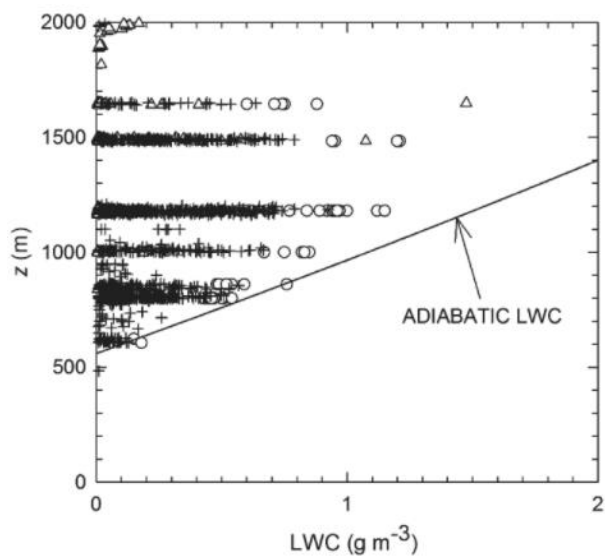


圖 13 雲底高度與 LWC 關係圖

資料來源：參考資料 十四

由圖 14 可知，雲底在 600 公尺高時，LWC 約 1.7 g/m³。我們的實驗環境比起圖中溫度高，所以 LWC = 0.002 之計算結果是合理的。

由表 8、9、10 可知，相對溼度控制在 87~91 時，減壓凝結後液態水含量均在 0.0017~0.002 區間，符合大氣中氣塊快速舉升凝結液態水含量。求出不同實驗減壓後液態水含量，就可以

用式 14 求出雲滴成長大小。

表 11 NaCl 粒子液態水含量與雲滴成長大小關係(作者自行繪製)

0.3 μ m 粒子濃度	0.5 μ m 粒子濃度	1 μ m 粒子濃度	LWC 1 0.3→0.5	LWC 2 0.5→1	LWC 餘 (扣除 1、2)	雲滴成長 大小
粒子數/公升	粒子數/公升	粒子數/公升	g/L	g/L	g/L	(μ m)
416450	259332	84222	0.000021	0.00031	0.0017	1.746
412202	321462	107802	0.000021	0.00034	0.0016	1.672
414406	313576	98816	0.000021	0.00033	0.0016	1.682
395758	250926	75602	0.000020	0.00030	0.0016	1.725
383874	217664	76478	0.000019	0.00028	0.0016	1.763
386574	282688	114678	0.000020	0.00031	0.0018	1.756

表 12 線香粒子液態水含量與雲滴成長大小關係(作者自行繪製)

0.3 μ m 粒子濃度	0.5 μ m 粒子濃度	1 μ m 粒子濃度	LWC 1 0.3→0.5	LWC 2 0.5→1	LWC 餘 (扣除 1、2)	雲滴成長 大小
粒子數/公升	粒子數/公升	粒子數/公升	g/L	g/L	g/L	(μ m)
211984	211984	138981	0.000010	0.00019	0.0018	1.937
238111	238111	179284	0.000012	0.00022	0.0016	1.776
248135	248135	179309	0.000012	0.00023	0.0017	1.809
234239	234239	154299	0.000012	0.00021	0.0016	1.798
230479	230479	151799	0.000012	0.00021	0.0017	1.835
254135	254135	214237	0.000013	0.00023	0.0015	1.701

表 13 硫酸銨粒子液態水含量與雲滴成長大小關係(0.85 大氣壓) (作者自行繪製)

0.3 μ m 粒子濃度	0.5 μ m 粒子濃度	1 μ m 粒子濃度	LWC 1 0.3→0.5	LWC 2 0.5→1	LWC 餘 (扣除 1、2)	雲滴成長 大小
粒子數/公升	粒子數/公升	粒子數/公升	g/L	g/L	g/L	(μ m)
209553	209553	119797	0.000011	0.00020	0.0015	1.12
243587	243587	178161	0.000013	0.00022	0.0017	1.08
262535	262535	215459	0.000013	0.00024	0.0016	1.01
245665	245665	178692	0.000013	0.00023	0.0014	1.05
249936	249936	197485	0.000013	0.00023	0.0013	1.08
209553	209553	119797	0.000011	0.00019	0.0015	1.12

在表 11、表 12、表 13 中，我們對液態水含量進行分段討論。先計算所有粒子均成長至 0.5 微米大小所需之液態水含量，並定義其為 LWC 1。再計算所有粒子均成長至 1 微米大小

所需之液態水含量，並定義其為 LWC 2。

經由本研究之計算發現，減壓至 0.85 大氣壓後，本研究之雲滴均成長至 1.6~1.9 微米大小，且與粒子大小與環境粒子濃度密切相關。

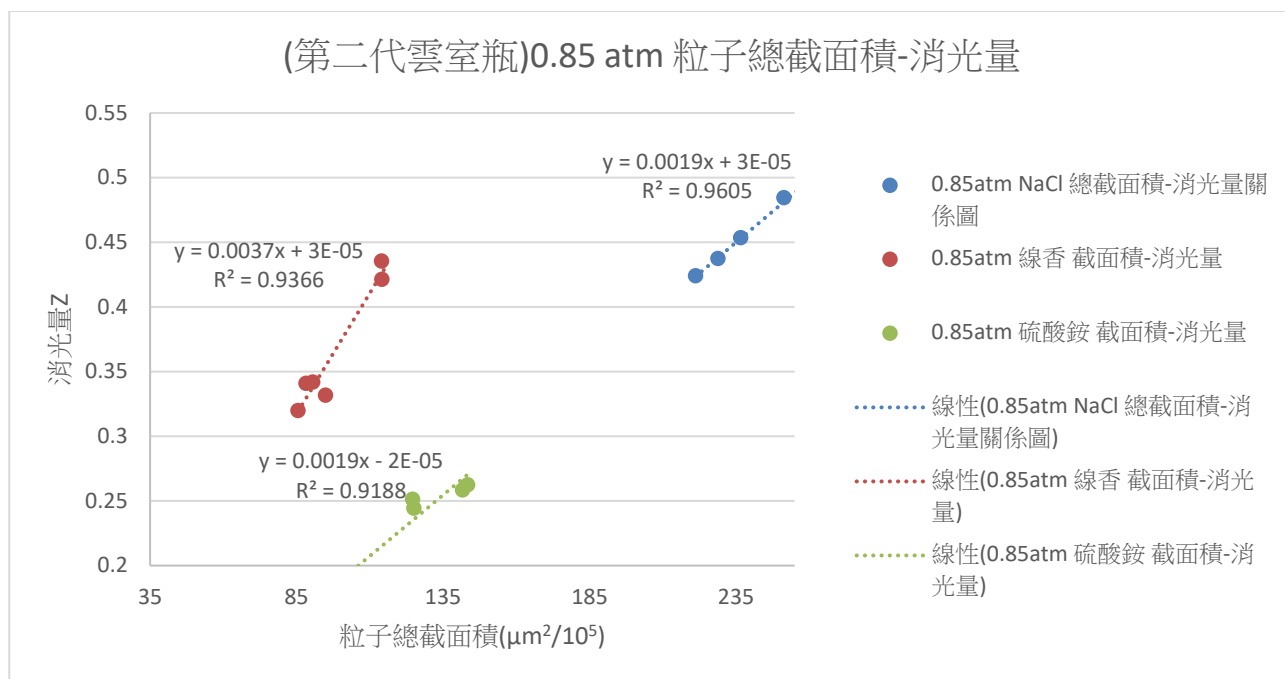


圖 15 總截面積-消光量關係圖(作者自行繪製)

在表 6 與表 7 中，與表 2 相同，定義消光量 $Z = -\ln(0.85 \text{ atm 之光度}/\text{初始光度})$ 。使消光量與粒子總截面積成正比。我們觀察數據發現，當總粒子截面積=0 時，消光量 $\neq 0$ 。我們認為當總粒子截面積=0 時，消光量之數值是一實驗裝置誤差，截距的值可能因當日環境有關。本研究為了方便討論，調整數據使趨勢線之 y 截距 ≈ 0 。

在第二代雲室瓶的實驗，我們先對第一代雲室瓶的實驗進行複製，測試舊實驗得出之結論。由圖 14 之趨勢線 R^2 值可發現，消光量與粒子總截面積成正比，符合比爾-朗伯定律，代表過去所得之結果是可信的。

觀察表 11、表 12 我們可以發現，氯化鈉之雲滴成長大小較小，代表其雲滴數量較多，活化為雲滴的能力較佳。由氯化鈉組之粒子截面積較大也可知，氯化鈉組之雲滴數較多，親水性佳。在 0.85 atm 環境下，氯化鈉更適合做為雲凝結核。

觀察圖 14 中趨勢線斜率可以發現，線香之消光量-粒子總截面積趨勢線斜率較大。這代

表線香粒子雖然總截面積較小，消光效果卻較強。我們認為這是因為線香粒子中含有黑炭成分，對光線的吸收效果較強，使消光量增加。

將硫酸銨粒子之趨勢線與其他粒子進行比較，發現硫酸銨與 NaCl 同為可溶性鹽類，兩者趨勢線斜率相同，消光特性相似。不過因硫酸銨之親水性較 NaCl 差，導致硫酸銨雖然輸入粒子較多，實際上能活化的粒子較少，造成其粒子總截面積較小，位於圖 10 之左下端。相對的，NaCl 組截面積較大，位於圖 10 之右上端。

三、以第二代雲室瓶討論壓力與凝結之關係

實驗	組別	加入凝結核	加入含凝結核空氣量	加熱水時間
3-1	I	硫酸銨	150ml	2'00"
	II	硫酸銨	300ml	2'00"
	III	硫酸銨	450ml	2'00"
	IV	硫酸銨	600ml	2'00"
	V	硫酸銨	750ml	2'00"

表 14 取樣 0.5 L，加入含凝結核空氣量與粒子數關係表(硫酸銨) (作者自行繪製)

組別	加入含凝結核空氣量	0.3 μm 粒子數	0.5 μm 粒子數	1 μm 粒子數	2 μm 粒子數	5 μm 粒子數	10 μm 粒子數	粒子總截面積 (μm^2)
I	150ml	238821	238820	193963	126369	27182	7	1460888
II	300ml	206408	206408	117450	28820	63	8	305283.7
III	450ml	246892	246892	185700	108053	9206	10	933005.3
IV	600ml	169692	109789	27988	2000	44	4	80207.53
V	750ml	147237	147237	129277	91513	29436	0	1281290

表 15 硫酸銨粒子-消光量-相對溼度關係表(0.93 atm) (作者自行繪製)

組別	加入凝結核	初始光度	0.85 atm 之光度	消光量 Z	RH
I	硫酸銨	1624	1224	0.2828	91
II	硫酸銨	1984	1420	0.3345	90
III	硫酸銨	1522	1120	0.3067	91
IV	硫酸銨	1960	1501	0.2668	89
V	硫酸銨	1559	1210	0.2534	89

表 16 實驗 I~V 之初始環境數據與 LWC 之計算(作者自行繪製)

組別	I	Q1(mole/kg*m)	0.40743
T1	300	Ha(m)	16.363
Cp(kJ/kg*k)	1.005	P2-P1(pa)	196.434
RH (相對溼度)	88	P1(hpa)	101163.566
空氣密度(kg/m ³)	1.225	T1(K)	299.834
		Hb(m)	574.658
		Cq(1/m)	0.000002
		LWC(kg/m ³)	0.0013

組別	IV	Q1(mole/kg*m)	0.39829
T1	303	Ha(m)	15.343
Cp(kJ/kg*k)	1.005	P2-P1(pa)	184.196
RH (相對溼度)	89	P1(hpa)	101175.804
空氣密度(kg/m ³)	1.225	T1(K)	302.842
		Hb(m)	575.677
		Cq(1/m)	0.000002
		LWC(kg/m ³)	0.0013

組別	II	Q1(mole/kg*m)	0.40435
T1	301	Ha(m)	13.739
Cp(kJ/kg*k)	1.005	P2-P1(pa)	164.941
RH (相對溼度)	90	P1(hpa)	101195.059
空氣密度(kg/m ³)	1.225	T1(K)	300.860
		Hb(m)	577.281
		Cq(1/m)	0.000002
		LWC(kg/m ³)	0.0013

組別	V	Q1(mole/kg*m)	0.39829
T1	303	Ha(m)	15.343
Cp(kJ/kg*k)	1.005	P2-P1(pa)	184.196
RH (相對溼度)	89	P1(hpa)	101175.804
空氣密度(kg/m ³)	1.225	T1(K)	302.842
		Hb(m)	575.677
		Cq(1/m)	0.000002
		LWC(kg/m ³)	0.0013

組別	III	Q1(mole/kg*m)	0.40131
T1	302	Ha(m)	17.997
Cp(kJ/kg*k)	1.005	P2-P1(pa)	216.051
RH (相對溼度)	87	P1(hpa)	101143.949
空氣密度(kg/m ³)	1.225	T1(K)	301.816
		Hb(m)	573.024
		Cq(1/m)	0.000002
		LWC(kg/m ³)	0.0013

表 16 硫酸銨粒子液態水含量與雲滴成長大小關係(0.93 大氣壓) (作者自行繪製)

0.3 μm 粒子濃度	0.5 μm 粒子濃度	1 μm 粒子濃度	LWC 1 0.3→0.5	LWC 2 0.5→1	LWC 餘 (扣除 1、2)	雲滴成長 大小
粒子數/公升	粒子數/公升	粒子數/公升	g/L	g/L	g/L	(μm)
238821	238820	193963	0.000012	0.00022	0.0015	0.79
206408	206408	117450	0.000011	0.00019	0.0017	0.88
246892	246892	185700	0.000013	0.00023	0.0014	0.77
169692	109789	27988	0.000012	0.00022	0.0016	1.04
147237	147237	129277	0.000007	0.00013	0.0017	0.94

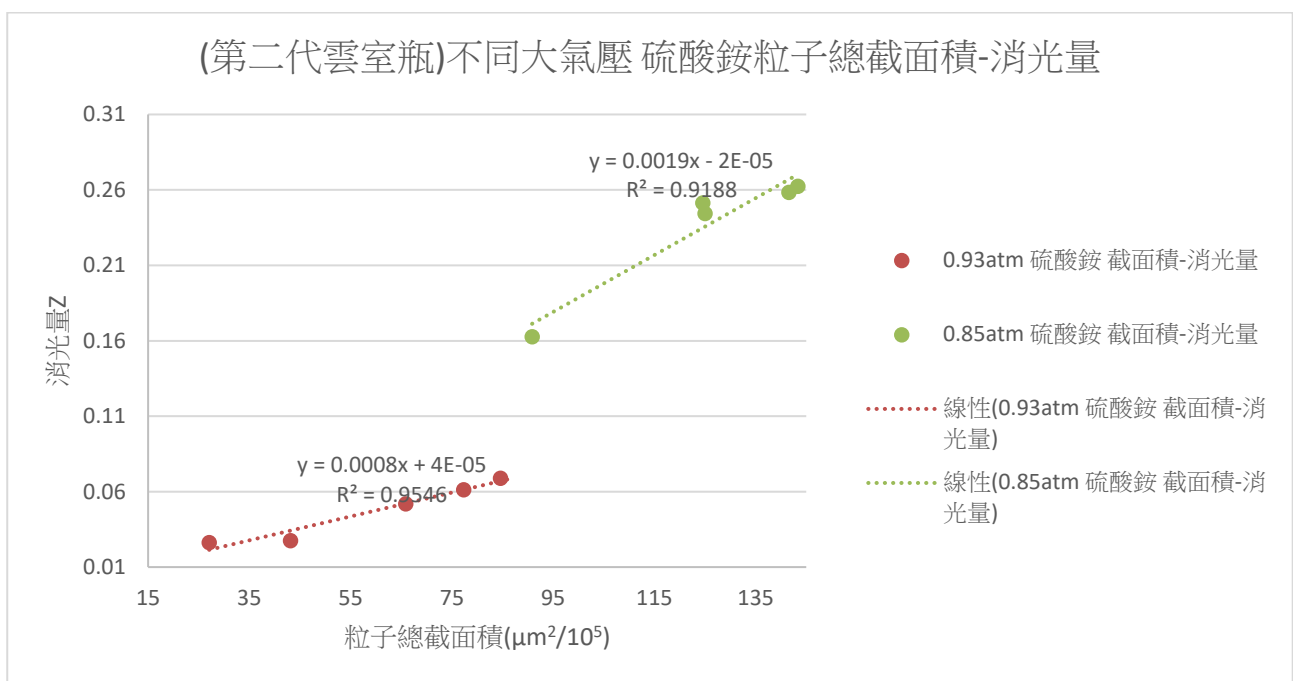


圖 16 不同大氣壓 硫酸銨粒子總截面積-消光量關係圖(作者自行繪製)

在實驗 3-1 中，我們重複實驗 2-3 之實驗條件步驟與條件。與實驗 2-3 不同點，在於我們只將壓力降低到 0.93 大氣壓，而非先前的 0.85 大氣壓。比較表 13 與表 16 可發現，在較高壓的環境下，過飽和釋出之水氣較少，導致雲滴成長大小較小。在 0.85 大氣壓下之硫酸銨雲滴可成長至 1.2~1.0 微米大小，0.93 大氣壓下則只能成長到 0.8~1.0 微米。

而在高壓環境下，我們也發現環境中之粒子消光力較低，趨勢線斜率較小，走勢較平坦。我們推測原因是在文獻回顧三中提到的，消光效率為粒徑之函數。因此 0.85 大氣壓之雲滴消光效率較低，消光係數也對應較低。

雖然由本研究計算結果對應圖十七，會發現 0.8 微米粒子之消光效率較 1.2 微米粒子之消光效率大，代表 0.93 大氣壓環境之趨勢線斜率應較大。但本研究在計算時假設雲滴皆均勻成長，這種假設方法會讓計算結果比起自然環境中雲滴的實際大小還要小。所以 0.93 大氣壓的實際雲滴直徑可能落在 1.2 微米左右，0.85 大氣壓實際雲滴直徑可能落在 2 微米，才比較符合本實驗結果。

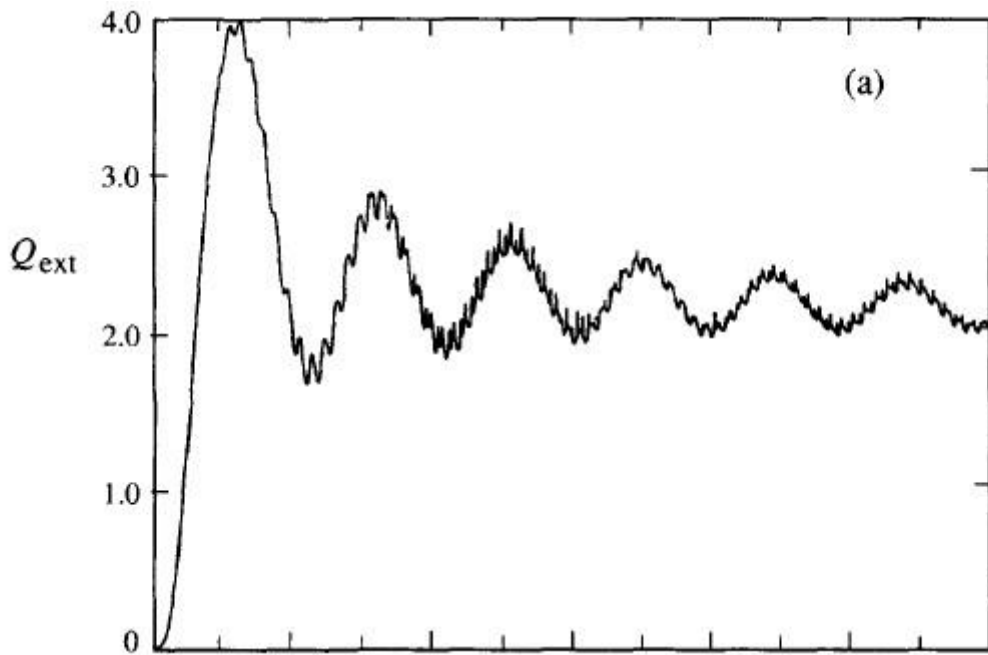


圖 17 光波長=0.5 微米，粒徑大小與消光效率圖(橫座標一單位 0.5 微米)

資料來源：參考資料 十五

結論與應用

在我們的實驗中，發現雲室瓶中的凝結效果確實會受瓶中凝結核濃度的影響。在越高的凝結核濃度下，凝結的水氣就越多，散射光的總截面積越大，致使消光量隨之變大。可以見到雲室瓶內從最一開始十分清澈，到減壓後因凝結的水氣變得混濁。以下統整我們實驗的重要結果：

- 一、第一代雲室瓶或第二代雲室瓶皆得出粒子總截面積越大則消光量越大的關係，符合比爾定律。而第二代雲室瓶更進一步得到不同粒子與環境壓力下，凝結成長導致消光量(y)與粒子總截面積(x)的關係式如下：

$$0.85 \text{ atm NaCl} : y = 0.0019x, R^2=0.9605$$

$$0.85 \text{ atm 線香} : y = 0.0037x, R^2=0.9366$$

$$0.85 \text{ atm 硫酸銨} : y = 0.0019x, R^2=0.9188$$

$$0.93 \text{ atm 硫酸銨} : y = 0.0008x, R^2=0.9546$$

R^2 值都在 0.9 以上，顯示本實驗設計的減壓雲室瓶的模擬效果佳。且比較第二代雲室瓶中各凝結核凝結粒子數，發現水溶性鹽類如氯化鈉和硫酸銨在大氣中比起空氣微粒（線香）是較佳的凝結核。

- 二、以文獻回顧六之理論，在絕熱膨脹的理想氣體之壓高變化所推算出凝結量與雲滴粒子成長大小。0.85 atm 環境下每立方公尺的液態水含量 LWC 大約落在 1.9~2.1 公克，其對應的雲滴成長大小，氯化鈉與線香粒子成長至 1.68~1.9 μm ；硫酸銨粒子成長至 1.01~1.12 μm 。而 0.93 大氣壓下，每立方公尺的 LWC 大約落在 1.3 公克，硫酸銨粒子成長至 0.77~1.04 μm 。

參考文獻

- 一、龍騰版 高中基礎地球科學課本(上)
- 二、W. Brune. Fundamentals of Atmospheric Science
- 三、William C. Malm. Visibility: The Seeing of Near and Distant Landscape
- 四、Lecture 3. Optical properties, from : https://www.gfdl.noaa.gov/wp-content/uploads/files/user_files/pag/lecture2008/lecture3.pdf

- 五、Visibility, Wikipedia
- 六、Introduction to atmospheric visibility estimation, from : https://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/02/Introduction_to_visibility-v2-2.pdf
- 七、A simple guide to how aerosol particle counters work, from : https://cleanroomtechnology.com/news/article_page/A_simple_guide_to_how_aerosol_particle_counters_work/56803
- 八、Fundamentals of particle counters, from : <https://www.golighthouse.com/en/blog/5-fundamentals-of-particle-counters-462>
- 九、Particle counter, Wikipedia
- 十、M.K. Yau, R R Rogers - A Short Course in Cloud Physics (1996, Butterworth-Heinemann)
- 十一、Daniel A. Vallero. Fundamentals of Air Pollution
- 十二、Gerald R. North, John Pyle and Fuqing Zhang - Encyclopedia of Atmospheric Sciences
- 十三、Daniel Attinger - A Remediation Scheme to Global Warming : Engineering Biodegradable Aerosols With Maximum Scattering Potential
- 十四、Gerber - Entrainment_Mixing_and Microphysics in Trade-Wind Cumulus
- 十五、Bohren, C. F., and Huffman, D. R. (1983) Absorption and Scattering of Light by Small Particles, Wiley, New York.

【評語】 180011

設計並改進自製減壓雲室瓶，順利模擬空氣絕熱膨脹過程，以產生凝結雲霧粒子，並探討不同凝結核之成雲效果，也由實驗驗證比爾定律有關凝結成長與消光量間的關係。雖然實驗結果較欠缺創新的發現，但設計之雲室瓶相當有助於雲霧形成之科教應用實驗與原理解釋。值得鼓勵！建議對於數據的處理還有內容應更加小心，文獻的引用也應確實。