

雷雨內帶電過程與閃電發生之研究成果

戚 啓 勳 譯

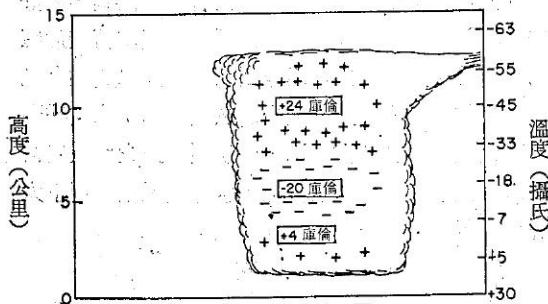
Recent Researchs on the Charge Generation and Lightning in Thunder Cloud

Ke-Hsun Chi

雷雨內為什麼會有閃電這個問題，看起來很簡單，其實卻非常複雜，而且專家和學者到現在還沒有完全搞清楚。主要因為直接觀測幾乎不可能，實驗室內模擬試驗也很困難。本文所要介紹的是最新發展的三種學說，以及快速攝影術揭示一次閃電放電的詳細情形。

首先我們應該了解，所有雲多多少少都有電，不過在堡壘狀的積雨雲內要有足夠的電荷，而且還分佈成兩三個區域，才會發展成雷雨。

雷雨中電荷分佈的情形，曾經利用高空測電儀 (altielectrograph)，裝有特殊儀器的飛機，以及在地面上測量閃電發生時電場變化等方式加以研究。這些研究已經顯示出：雷雨雲的上部大都含正電荷 (約為 +24 庫倫)，下部則為負電荷 (約為 -20 庫倫)，但限在 0°C 等溫面以上。剛在結冰高度以下，還有一處範圍很小的荷正電袋形區。此種電荷分佈的簡化模式如圖一。雷雨內電荷的產生率；一般相信大約為每分鐘每立方公里一庫倫。



圖一 雷雨雲內電荷分佈的簡化模式

暖雲 (指溫度都在 0°C 以上) 內雖然也曾經觀測到有一些閃電；但一般雷雨雲都能伸展到 0°C 等溫面以上，兼有冰晶和過冷水滴。有許多觀測顯

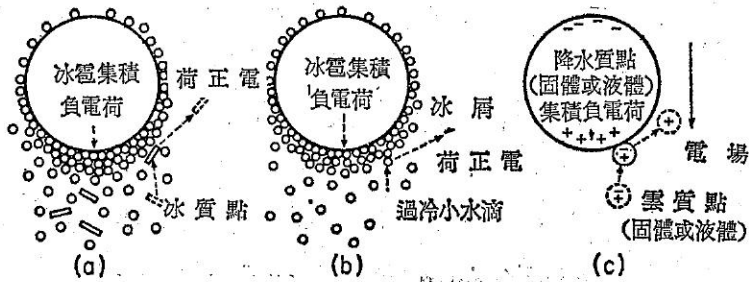
示：強烈充電一開始，雲內就有冰粒或冰雹降落，難怪以往許多產生電荷分離的學說，有一部份認為必須先有冰粒或冰雹存在。

雲內電荷分離的三種學說

想要了解雷雨雲內電荷分離的道理，必須先從「熱電效應」(thermoelectric effect) 說起，試設想有一支冰棒，一端受熱，另一端受冷，兩端顯然要產生一溫度差。冰內有一些水分子總會分離成正離子和負離子。溫度較高處，這種離子比較多，換句話說，冰棒的較暖一端比較冷一端含更多正離子和負離子。我們知道，高集中區的離子有移向低集中區的趨勢，可見正離子和負離子都會從冰棒的較暖一端移向較冷一端。不過在冰內，負離子的移動速度幾乎等於零，正離子卻移動得很快。於是正離子移向較冷一端，建起一正電荷區，最後還不讓其他正離子遷入此區。

由此可見，在穩定的靜態情況，這支冰棒產生一電位差，冷的一端荷正電，暖的一端荷負電。實驗室內已經求得此電位差 (用毫伏特作單位) 大致相當於溫度差的兩倍。假定穿過一片冰的溫度差為攝氏 2 度，產生的電位差大約為四毫伏特。

現在設想有一電塊 (或冰粒) 從一朵過冷水滴和小冰晶相混合的雲內降落。電塊因與大量過冷水滴相碰結冰，釋出大量潛熱，所以比冰晶暖。可見當一粒冰晶接觸電塊表面時，由於此種熱電效應，電塊變為荷負電，而冰晶則荷正電。冰晶自電塊彈回時，仍保持此正電荷；再因它的降落速度小於雲內氣流的上升速度，所以被攜帶到雲的上部。由此使對流雲的上部充滿着微細的荷正電冰晶。相反來說，此種機制 (mechanism) 使得冰電荷負電，加上它落速較大，才把這些負電荷帶到雲的下部。這種冰晶和電塊碰撞的荷電過程見圖二 (a)。



圖二 表明三種雷雨電化說的簡化模式 (不按比例)

- (a) 冰晶和一雹塊相碰，冰雹表面因過冷水結霜釋出潛熱而增暖，冰晶彈回時荷正電，冰雹荷負電。
- (b) 過冷水小水滴和一冰雹相碰，小水滴結冰時有冰屑射出，荷正電。
- (c) 降水和雲質點被向下的電場所極化，彼此接觸時，負電荷轉移到降水質點上，雲質點則帶正電荷彈回。

簡單計算表明：假設一朵巨大對流雲內，冰晶和小雹塊每次碰撞使冰晶得到電荷大約 -16×10^{-15} 庫倫 (約 10^5 個電荷)，產生的電荷率大致和一個典型雷雨 (每分鐘每立方公里一庫倫) 內的情況相當。很不幸，實驗室內設計來模擬上述過程的試驗，卻產生了矛盾的結果。有一些試驗中，冰晶和過冷水滴轟擊一冰面時，每次冰晶碰撞，使冰面上平均得到電荷 -170×10^{-15} 庫倫；但另外一些試驗中，所得平均電荷只有 -1.6×10^{-15} 庫倫。

冰雹從混合雲內降落，另外一種機制可能也是雷雨中荷電的主要原因之一 (見圖二(b))。當一顆過冷水小水滴結冰時，無數微細冰屑射入空氣中 (請參閱科學月刊 6 卷 12 期拙文「一滴水怎樣結冰」)。今假想有一過冷水小水滴和一雹塊相撞，這是結冰的第二階段，冰殼向內增厚。冰殼的內面和液態水相接觸，所以溫度為 0°C ；冰殼的外面則隨周圍溫度冷却，可能遠在 0°C 以下。可見穿越冰殼勢必會產生一溫度差，此種熱電效應當使正電荷集積在它的外面，水滴凍結時射出的任何冰屑，大都來自冰殼外層，可見它們帶有淨正電荷，留下的雹塊則荷負電。正如前面一樣，假想微細的荷正電冰屑被帶到雲的上部，荷負電的冰雹帶到雲的下部。

根據計算所得，如要以此種機制在雷雨中產生所需的每分鐘每立方公里一庫倫，那麼半徑大於約 15 微米 (一微米為 10^{-6} 公尺) 的每一顆水滴碰撞一雹塊，雹塊荷電應該是 -1.6×10^{-15} 庫倫。實驗中有些試驗顯示：這樣大小的帶電會在結霜期間被分離，但另有一些試驗都不能表示有任何帶電。這種荷電過程顯然需要作進一步的研究。

最後，我們將簡單說明雷雨中產生電荷的誘導荷電 (induction charging) 說 (見圖二(c))。如果有正常的向下晴天電場，雲和降水質點 (固體或液體) 都會被極化，它們的較低面荷正電，較高面荷負電。因此，當雲質點碰撞到向下落的降水質點時，雲質點的負電荷會轉移到降水質點上去。而後，只要雲質點彈回，荷負電的降落質點靠重力落下；荷正電的微細雲質點由雲內上升氣流帶到雲的上部，這樣就可發展雷雨內兩個主荷電中心。

這裡必須指出：此兩主荷電中心一經建立，向下的電場還會加強，碰撞時電荷的轉換也會更大。換句話說，誘導荷電是一種正的反饋機制，隨着時間而增加它的重要性。很可能起先非誘導性荷電分離機制 (例如前面所說的那兩種) 較為重要，但電場加強後，誘導荷電轉趨重要。

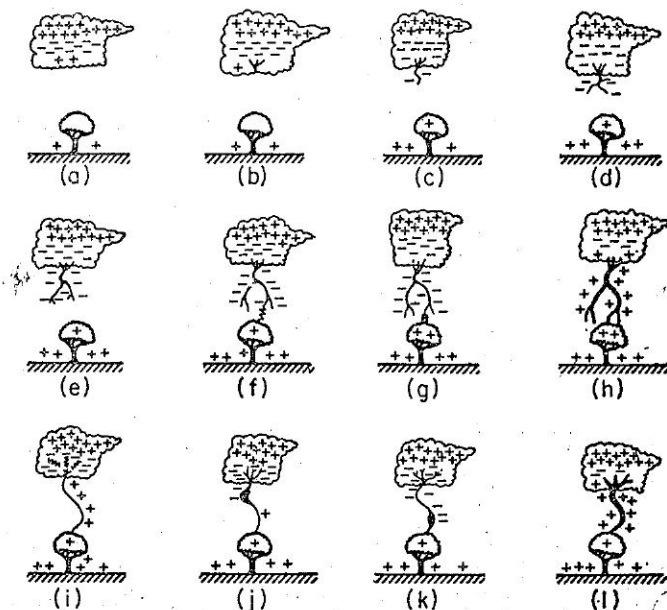
上面介紹的三種學說，足以闡明雷雨內何以有兩個主荷電中心。但有些雷雨內曾經觀測到，剛好在 0°C 等溫面下，還有一個很小的正電荷袋形區 (見圖一)。此種現象可能是因為固體降水質點在融解時荷電的緣故。實驗室內的試驗顯示：冰質點融解時因能噴出許多小氣泡，所以能得到大的正電荷。水滴濺到融解中的冰粒上，也能使冰粒上留下大的正電荷，特別是有電場的時候。

閃電和雷聲

當雲內的電荷分離時，雲對地，以及雲內各部份間的電位梯度增強，最後超過空氣所能維持的數值，由此破壞非導電性，促成一次閃電。在乾空氣內，電位梯度到達每公尺三毫伏特，可破壞非導電性；如果有半徑一公厘的水滴，約為每公尺一毫伏特。

雲對地的閃電源出於雲底附近，以肉眼看不見的方式放電，稱之為「分級導流」(stepped leader)，像分離的一步一步向下到達地面，每一步維持大約一微秒(百萬分之一秒)。此段時間內，分級導流前進約50公尺，每步相隔時間約50微秒。

一般認為：分級導流是因為雷雨雲底的正電荷袋形區和負電荷區下部的局部放電所造成(見圖三(b))。這種放電所釋出的電子，原先附着在負電荷區的降水質點上。這些自由電子使得正電的袋形區中性化(圖三(c))，而後移向地面。



圖三 這些示意圖(不按比例)(a-f)表示分級導流的形成。(g)和(h)為第一次回擊，(i)為K閃流及J閃流，(j)和(k)為連射導流，(e)為第二次回擊。

當負電荷的分級導流到達地面附近時，它誘導地上的正電荷(尤其是在地面突出物上)。在離地10~100公尺時，一種移動火花(traveling spark)從地面向上和它相會(圖三(f))。分級導流和移動火花接觸後，大批電子流向地面，形成一條非常明亮，肉眼能看見的「閃擊」(lightning stroke)，循分級導流所走的路徑，從地面連續推進至雲內(圖三(g)及(h))。這一股電子流稱為「回擊」(return stroke)，也就是我們所見一次閃擊的強光通路。由於閃擊向上移動得太快(在一百微秒之內)，所以整條通路肉眼看起來像同時發光。儘管電子往下流，回擊和它打到的地點仍荷正電，雲的下部則荷負電。

第一次閃擊攜帶最強的電流(通常約 $1 \sim 2 \times 10^4$ 安培)，隨後幾次閃擊能沿同一主通路發生，只要增加的電子能在電流停止後一百微秒內供應到前次閃擊的頂部。增加到通路中的電子，由所謂K閃流(streamers)或閃流供應。這些電子從

前次閃擊的頂部向上移入荷負電的更高雲區內(圖三(i))。一種荷負電的導流，稱為「突進導流」(dart leader)，繼之沿着第一閃擊通路的主路線往下移，進一步將電子降落到地面(圖三(j)及(k))。突進導流的後面是另一次肉眼能見的回擊到達雲內(圖三(l))。閃電的第一次閃擊，大都有許多向下的分枝，因為分級導流就有許多明顯的分枝。但後來那些閃擊只追隨第一次閃擊的主通路，所以並沒有分枝現象。

一次閃電通常都含有三次或四次閃擊，彼此相隔約二十分之一秒，在雷雨雲的下部可掃除電荷20庫倫。在另一次閃擊能夠發生之前，雲內的電荷發生機制必須重新建立起來。

打擊到極高建築物上的閃電，正好和上面所說的閃電相反，開始的時候在建築物頂部附近先有分級導流向上移，並向雲底分叉，避雷針之所以能保護高大建築物不受雷擊，是讓閃擊經避雷針入地，而不通過建築物本身。

雷暴內部也可以有閃電，即所謂「雲內放電」(intracloud discharges)，使正電和負電的兩個主中心中性化。它並不含幾個分離的閃擊。一次雲內放電，通常含有一個移動較慢的火花或導流，在十分之幾秒內穿越正電荷區和負電荷區之間。這一股電流在雲內產生連續而較弱的亮光，在它上面還重疊若干較亮的脈動，每次脈動維持約千分之一秒。熱帶雷雨因為雲底較高，每次雲對地放電就可有大約十次雲內放電。但在溫帶，這兩種放電型式的頻率大致相同。

回擊使空氣通路的溫度上升到絕對溫度約三萬度。由於時間太短，空氣來不及膨脹，所以通路內的壓力同時增強至大氣壓力的十倍，甚至可能一百倍。高壓通路迅速膨脹入周圍空氣，產生一種極強的震波(比聲速更快)；震波變為聲波，我們聽起來就是雷。雷也可由分級導流及突進導流產生，但這比產生回擊者弱。

(本文摘譯自 John M. Wallace, Peter V. Hobbs, Atmospheric Science 1977, p. 202 ~209)

氣象學報徵稿簡則

- 一、本刊以促進氣象學術之研究為目的，凡有關氣象理論之分析，應用問題之探討，不論創作或譯述均所歡迎。
- 二、本刊文字務求簡明，文體以白話或淺近文言為主體，每篇以五千字為佳，如長篇巨著內容特佳者亦所歡迎。
- 三、稿件請註明作者真實姓名、住址及服務機關，但發表時得用筆名。
- 四、譯稿請附原文，如確有困難亦請註明作者姓名暨原文出版年月及地點。
- 五、稿中引用文獻請註明作者姓名、書名、頁數及出版年月。
- 六、惠稿請用稿紙繕寫清楚，並加標點。如屬創作論著稿，請附撰英文或法、德、西文摘要。
- 七、本刊對來稿有刪改權，如作者不願刪改時請聲明。
- 八、惠稿如有附圖務請用墨筆描繪，以便製版。
- 九、來稿無論刊登與否概不退還，如須退還者請預先聲明，並附足額退稿郵資。
- 十、來稿一經刊登、當致薄酬，並贈送本刊及抽印本各若干冊。
- 十一、惠稿文責自負、詳細規定請據本學報補充稿約辦理。
- 十二、惠稿請寄臺北市公園路六十四號中央氣象局氣象學報社收。

(請參閱補充稿約)