

雷暴中的閃電

Lightning from Thunderstorms

劉慧琳

(翻譯自 William R. Cotton, Ph.D. 所著作之"STORMS")

早在 Benjamin Franklin 的時代，科學家們便已經知道閃電是一種巨量電荷的釋放現象。伴隨閃電的雷聲是因為在閃電的電管 (lightning-bolt channel) 內熱空氣膨脹後緊接著的壓縮過程所產生的。承如其他放電現象，閃電電管的形成乃是在雷暴中所產生的強烈電荷中心，而且已經達到負載極限 (或是負載電荷量已經超過空氣中的荷電能力)，進而造成電荷中心的潰散效應。經過科學家們數百年進行的雷暴實驗，依然無法理解電荷的分離最終會以強烈的閃電形式釋放出來的物理原因。經由運動中之雷暴系統電學量測及都卜勒雷達分析降水場的結果相互整合，再經由複雜雲模式測試雷暴內的電荷分離 (electrification) 理論，科學家們對於雷暴系統的帶電機制幾乎已經可以獲得突破性的了解。

雷暴系統的電荷分離理論可以分為兩大類來探討：(1)對流過程帶電說；(2)與降水過程相關的電荷分離假說。在進入電荷分離的理論探討之前，先檢視任何電荷分離假說均需滿足下列的雷暴特性：

- (1)平均的降水過程和帶電活動時間為 30 分鐘；
- (2)電荷分離強度以伏特為單位而雷暴中的電荷分離約有好幾百萬伏特或是強於家用電壓的數百萬倍，並且可能傳遞 10 或以上的庫倫電量到達地面。該電流量足以供應一個擁有 20 萬人口的城市達一分鐘久之照明用電；
- (3)以一個大型的積雨雲來說，這些電量主要侷限在雲內-5C 至-40C 高度內，橫跨範圍約是以 2km 為半徑所構成之範圍內；
- (4)積雨雲中的電場結構具有三極性，負電通常位於中心區域約略是在-10C 至-20C 高度內，主要正電區集中在其上數公里的高度範圍內，另一個次要正電區則常在降水發生後出現在雲底附近；
- (5)雖然主要電荷中心分布位置無論在水平方向上或垂直方向上均呈現即將被降水核所取代，電量的生成以及電荷分離過程皆與降水形成的過程有關；
- (6)閃電形成的必要條件：當降水粒子已經成長達到雷達可偵測的大小後 20 分鐘之內必須有充足的電量生成並且完成電荷分離過程。

接下來，檢視電荷分離理論以探討其符合上述理論的程度為若干。

對流機制(The Convective Mechanism)

根據對流理論，在晴空的環境下，在近地面的大氣區域會形成一個帶有正電荷之電場集中區域。當有對流雲形成時，雲造成的上升氣流將會把近地面的正離子掃進雲中一起上升，造成對流雲於此初生階段帶正電，隨著上升氣流不斷的往上帶領，空氣中的自由離子活潑性也隨高度遞增而增加。在 6 公里以上高層的區域，宇宙射線產生相當高濃度的自由離子。上升並且帶有正電荷的氣流吸引了高層負離子進入雲中並且吸附在含水粒子或冰晶上，形成一個帶有負電的雲邊界。有一個假說指出，起始自雲邊界的下衝氣流將這些負電荷往下帶領，造成雲內電場呈現雙極結構。並且這些往下傳遞的帶負電粒子加強了近地面大氣的電場，引起更多的地面中性粒子因電子被排斥而帶正電，如此一來增強了大氣於近地面的正電電場強度，形成正回饋效應，更強化了雲內的電場結構。

此對流帶電理論僅依據雲的運動學來推論出此電荷分離特性，因此無法說明雲內電荷分離過程與降水過程同時發生的事實。此外，本項假說也無法說明近來的觀測發現：在雷暴內，負電中心常出現於-15C 等溫層附近。

降水帶電理論(Precipitation Charging Theories)

另一派想法，提出雲的帶電現象與降水過程息息相關。他們指出降水形成的過程部分反應了電荷分離作用，而各種大小粒子之不同沉降速度更進一步增強電荷分離的效果。目前有兩種理論最具說服力，可以解釋雷暴的帶電現象。一是感應理論，一是電荷反轉理論。

感應帶電(Induction Charging)

感應帶電或兩極化帶電現象的基本概念為，考慮一個晴空電場，雲與降水粒子皆呈現電荷兩極化，其中下半部為正電，上半部為負電。這項假說提出當降水粒子與一個較小粒子碰撞並彈開來後，較大粒子將帶負電而較小粒子將帶正電。如此一來，帶有正電的小粒子被帶到雲內較高層，而帶負電的較大粒子不是沉入雲中較底層就是維持在最大上升區域中。這項過程造成雲內明顯的極化現象，最大正電荷集中區域位於雲上半部，最大負電荷集中區域位於雲下半部。然而，這項說法仍然無法解釋為何負電傾向集中在-15C 等溫層附近。

電荷反轉概念

冰粒子有許多種生長機制，包括水氣直接凝固至冰晶表面，碰撞並合併小的雲滴粒子，以及碰撞並合併冰晶粒子。當一個冰晶粒子收集許多雲滴粒子，會以近乎球形或圓錐盤的形狀呈現冰形，此稱為霰(graupel particles)或軟雹石(soft hailstone)。實驗室的結果顯示當冰晶收集未凍結粒子或過冷水滴時，此過程稱為淞化(rimming)，並在同時，與經由水氣成長而來的冰晶發生碰撞後，部分的霰彈開來，這些霰因而帶電。但在實驗室的結果卻產生一項令人不解的結果：帶電符號(正或負)及電量大小會因溫度、過冷水滴內之液態水含量，以及冰晶的大小和速度而有不同。特別的是，隨著溫度的變化，霰所帶的電性會發生反轉。通常發生電性反轉的溫度範圍約在-10C 至-20C 之間，但當液態水含量減少時，發生電性反轉的溫度會傾向發生在稍微溫暖的溫度環境下。在溫度低於電性反轉溫度的高度上，霰帶負電，並且在溫度介於-10C 至-20C 之間的區域內產生負電中心，同時，帶正電的小粒子上升到雲內較高層並於當地形成正電中心。

在溫度高於電性反轉溫度的高度內，霰帶正電。這點可以由雲底部降水區域經常成現正電特性獲得印證。目前，產生霰的此項特殊性質的真正物理原因尚未被探索出來，然而，此項過程足以說明雷暴系統的諸多電性結構特性。

閃電

一旦電荷分離達到某種程度，數量級有一百萬伏特/米，閃電將會被觸發，以中和該強烈的電性分離現象。典型的雷擊是呈現雙頭根的樹型(double-ended tree)，一端擊入正電區域，一端則直擊負電區域。發生在雲與地面之間的閃電放電現象，負電端不會是一路到底，反而是以階梯前進(steped-leader)的方式分次完成。

將負電流以間斷性的方式向下帶到地面。當階梯前進接近到地面上 100 公尺內時，反向進行的電擊也將啟動，並且此電擊帶有約十千安培的正電荷，往上傳送正電荷電流。此電擊相當明亮，肉眼即可辨認。實際上，閃電是由許多個雙向傳送的電擊所組成的。其產生的熱管(heated channel)，直徑僅數公分，溫度可以達到 3 萬K，因此，受高熱而呈爆炸性膨脹的空氣，會產生一個震波，並以聲波的形式向外傳送，短時間內即可被聽到，此即雷聲。閃電是雷暴天氣所產生的惡劣現象之一，在美國，每年因閃電而死亡的人口約 200-300 人。