

閃電、雷雨和避雷針

褚志斌

國立清華大學物理系

一、引言

每年夏天午後台灣各地總有不少雷陣雨出現。起初是烏雲以千軍萬馬之勢頃刻盤據了整片天空。不久，從天空擲下鋸齒般的金光，隨即便可聽見天空發出沈悶、駭人的巨吼。最後，天空如同憑弔戰場似地灑下頃盆的眼淚。其實，金光便是閃電 (lightning)，而吼聲便是雷聲 (thunder)，淚水即是雷陣雨 (thunder shower)。然而在這極可能被視為理所當然的自然現象背後所蘊藏的物理原因則不常被人們所關心。為何會有閃電和雷雨？又應如何避免雷殛的損害？不少書中提到這些現象，也作了些解釋，但敘述大多不易明瞭，或僅著重於現象的描寫。故本文將就上述現象作一綜合性的討論。並試圖以淺顯的觀念解釋這些現象，使稍具高中物理基礎者皆可了解其物理原因。

二、地表帶電的原因和大氣導電性

地球表面之物體由於與地球之表層或其他物體摩擦而使原子最外層之電子因摩擦做功獲得足夠動能而脫離原子。由於地球本身是一極大之電容，故質量較輕、較易移動之負電粒子——電子——便跳至地表而聚集於地球表面，而將帶正電之陽離子留在空氣中。因此初步地，地表帶了負電，而天空上方則帶正電。正電荷大約分布在距地表 50,000 公尺處。由於地殼中放射性元素衰變所釋放的 β 射線，再加上宇宙高能射線的作用會游離空氣分子，使得空氣具有部分導電性，其每秒每立方公分約產生十對離子。宇宙射線的作用較地殼元素衰變的作用強得多，而愈高空宇宙射線愈強，且空氣密度較稀薄，離子的平均自由徑較長，不易被中和，故愈高空空氣導電性愈佳。然而愈高空因空氣粒子密度小，能被游離的粒子極少，故一消一長兩個因考慮下，正電荷因而分布在 50,000 公尺高空。（此處並非游離層，游離層在 550,000 公尺高空）。由於此處空氣導電性佳，故正電荷可均勻地傳導分布至整個高空，成一等位球面。此一等位球面之正電荷和地表負電荷形成一約 300,000 伏特之電位差。由於空氣具有部分導電性，故正負電荷會藉

由空氣的傳導而緩慢中和，使得空氣中存在一極小之電流，其值約 10^{-12} 安培 / 平方公尺，但若計算整個地球表面則有 1800 安培之多。但自然現象若僅是如此，則只要約半個小時，地表的負電荷便會被中和完畢。但根據測量結果電流始終存在，唯會有週期性起伏變化，變動的程度為 $\pm 15\%$ 。在倫敦時間下午 7:00 時，全球電流都達到最大值。各地的電流雖因各地大氣組成而略有不同，不過起伏卻都一樣。這是因高空係一等位球面，地表亦為一等位球面，各地電位差變化一致，故電流起伏一被。然則必定有一自然現象週期性地將負電荷充入地表，而使正電荷留於空氣中，維持天空與地表 300,000 伏特的電位差，以便符合我

們所觀察到的結果。此自然現象即是閃電與雷雨。閃電可能發生於沙暴、雪暴、火山灰塵埃或核暴附近，但最常見者發生在雷雨 (thunderstorm) 時。(參見圖(1))

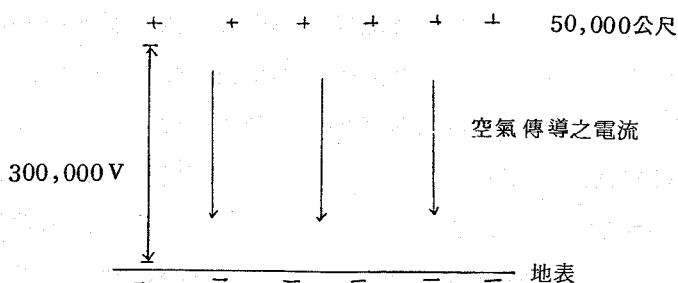
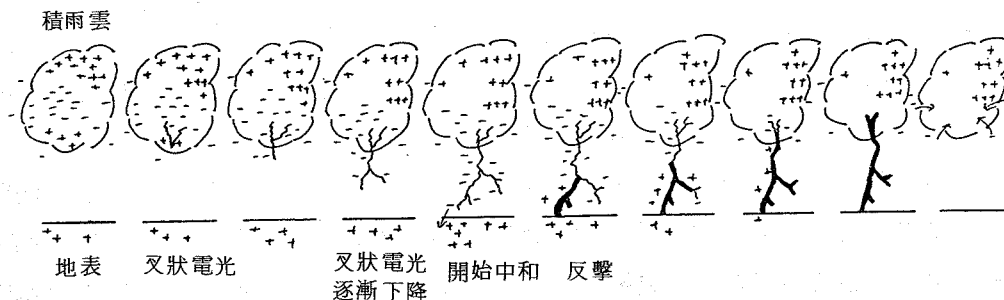


圖 (1)

三、閃電發生的原因

閃電與雷雨均發生於積雨雲 (thunderhead) 或雷雨雲 (thundercloud)。由於積雨雲內空氣所含的水蒸氣較乾燥空氣多，而電荷極易吸附於水珠表面 (水分子極性佳)，故積雨雲可積聚許多電荷。積雨雲整體高度可達 10,000 ~ 15,000 公尺。在雲層上方積聚正電荷，正電荷分布帶距地 6 ~ 7 公里，溫度約 $-10 \sim -20^{\circ}\text{C}$ 。自雲層下方至高度距地 4 ~ 6 公里高空處分布有負電荷，溫度約 $0 \sim -10^{\circ}\text{C}$ 。雲層最底端則分布有少量正電荷。雷殛是一種急劇激烈的正負電中和，故雲可能和雲本身的異性電荷中心、其他雲、或地表發生雷殛。本文將僅討論雲和地表間的雷殛，但其實所有中和原理均相同。雲內之電荷與地表可達幾百萬伏特之電位差。在負電荷中心和底端正電荷中心間之電位差促使其間的空氣分子游離。在負電荷中心周圍中性原子表層的電子被電場排斥而脫離原子，於是電子群中的某些電子受正電性原子核的吸引而前進，或與原子核中和、或直線前進，故電子即會循該路徑而傳遞。由於同時有極大量的空氣原子被游離，故一次游離可傳遞約 20 ~ 30 庫倫的負電。一次完整的游離可游離約 50 公尺的空氣路徑，此過程約需 1 微秒，然後游離作用停歇約 50 微秒，待電子充滿該段區域後再游離另一段約 50 公尺之區域。此稱叉狀電光 (step leader)，在巨觀上為一逐段下降之細長亮

帶，稱閃擊（stroke）。閃擊走每一段分枝游離路徑的速度為 $50 \text{ 公尺} / 1 \text{ 微秒} = 5 \times 10^7 \text{ 公尺} / \text{秒}$ ，約 $1/6$ 光速。由於雲層下部的衆多負電荷會使正下方的地表暫時感應出許多正電，故當叉狀電光達到雲層底端時，負電荷和地表的正電會繼續游離其間的空氣分子，故叉狀電光繼續向下移動。當叉狀電光極度接近地表時，其最下方的電子便跳出來與地表的正電產生中和，使雲層和地表間形成一條連續的導電通路。最後的這中和是劇烈、快速的，在短時間內中和了許多正、負電荷，故釋出了極大的能量，此能量一部分以光能釋出，此即閃電（lightning），一部分則以熱能釋出。正、負電的中和可看成正電由地表往上移動（負電荷往下移動等於正電荷往上移動），愈下方的電子愈早和正電中和，故中和是由下往上。這條由下而上逐漸變亮的亮帶稱為反擊（return stroke）遠較叉狀電光亮的多。由於一次的閃擊帶下 $20 \sim 30$ 庫倫的電量，而反擊係以 $1/3$ 光速上升，在如此短的時間內無法將如此多的電量中和完畢。故第一次中和完後約經數十個毫秒又會有第二次、第三次、第四次等沿原路徑的中和。“一次”眼睛所見的閃電實際上是由 $5 \sim 10$ 次的閃擊所構成，但在如此短的間隔內眼睛並無法分辨出其間隔，所以看起來是一次持續一段時間的明亮閃擊。任一次迅速中和都會放出巨大熱量，因而加熱空氣使其膨脹成為疏部，而兩次加熱期間溫度較低，則形成密度較高的密部。故其向外發出能量極強之震波一聲波，此即我們所聽見的雷聲（thunder）。除了第一次中和過程外，由於第一次已建立一條導電性良好的通路，故第二次後的幾次閃擊都不會有停歇現象，其傳遞是連續的，故稱連續電光（dart leader）。電荷大部分於第一次中和時用光，所以連續電光所產生之反擊較叉狀電光所產生之反擊為暗。中和完後，雲層附近空氣中的負電荷又會再傳遞至負電荷中心，約經 5 秒的時間，積雨雲又可積聚 $20 \sim 30$ 庫倫的負電，又有能力再進行另一次閃擊（但不是一定會發生）。原先所建立通路中的游離粒子因外在電場的消失使電子與陽離子因庫倫吸引力而中和，又恢復中和態，故需再從叉狀電光進行。每次閃電等於帶了 $20 \sim 30$ 庫倫的負電至地表，這些負電即是用以補



圖(2)

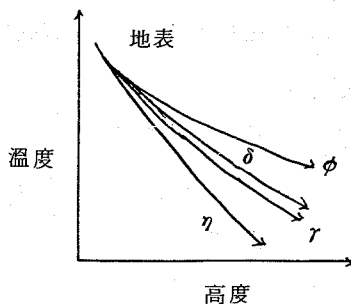
充因空氣傳導之電流所消耗的負電。(參見圖(2))

四、雷雨發生的原因

除了閃電外，雷雨也會帶負電至地表。如圖(3)所示，在對流層中，大氣愈往上則溫度愈低，其溫度遵循 γ 曲線下降。這是一般的乾燥空氣。底部熱空氣密度較頂部冷空氣小，但其之所以不上升的原因是因若某團熱空氣上升，它會因氣壓的驟減其將迅速膨脹，由於膨脹時間太短來不及使氣體與外界大氣作熱量交換，故其近似絕熱膨脹，其溫度曲線如 η 之形式，其將發現本身的溫度較同高度的空氣低、密度大，只好再度下沉。所以

曲線 γ 是大氣平衡時的溫度分布。但如今若空氣中飽和水蒸氣，在空氣絕熱膨脹冷卻時，水蒸氣因溫度下降會釋出許多熱（因水的比熱很大），故其冷卻曲線為 δ ，所以上升中的潮濕熱空氣不論在何種高度都會發覺自身仍較周圍的空氣溫度高，所以上升過程會一直持續到積雨雲頂部，該處溫度約 $-40 \sim -50^{\circ}\text{C}$ ，上升空氣中的水蒸氣逐漸凝結成水，進而凝固成冰，終使上升過程停止（此時已缺乏放熱的來源）。若無結晶核則水蒸

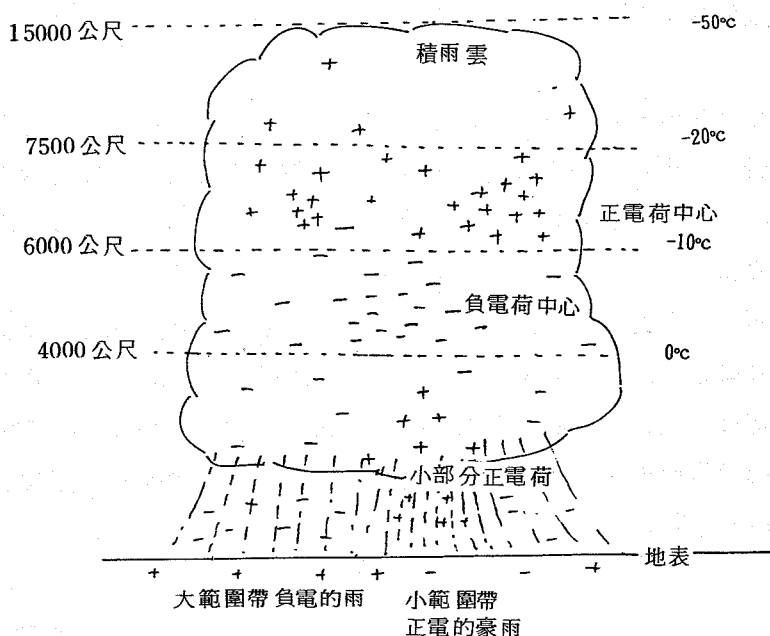
氣會呈過冷狀態而不凝結、凝固。但在雲層頂端存在的陽離子可充作結晶核助其凝結、凝固。小冰粒或水滴因質量輕仍可自由移動，若撞及其他小水滴，則小水滴會黏附其上，終使冰粒或水滴逐漸變大、變重，直至上升氣團無法再支撐其重量，他便會往下掉，跟隨著富含水分的下降冷空氣而下沉。含水分的冷空氣若下降，乃自 δ 曲線上某一點以 ϕ 曲線（絕熱膨脹冷卻曲線）之斜率降至低空。 δ 是潮濕空氣的溫度分布，故其一路下降會發現仍較周圍的空氣溫度低，故會持續下降，而填補暖空氣上升所留下的空隙，跟隨而下的水滴即是雨滴，冰粒即為冰雹。當水滴或冰粒離開雲層而下降至地表時，因地表帶負電，故水滴或冰粒即被感應而使下方帶正電、上方帶負電，若遇上帶正電的陽離子，陽離子會被其排斥開來，由於水滴或冰粒係隨下降氣流而下，其周圍空氣相對其將係迅速向側後離開，故陽離子沒有機會跑到帶負電的上方黏附。但若遇著行動緩慢的陰離子，而非電子，則其會黏附於水滴或冰粒上，而使其帶負電。電子因移動太快而來不及黏附



- (γ) 大氣平衡時空氣溫度對高度之分布
- (η) 乾燥空氣絕熱膨脹溫度隨高度而下降
- (ϕ) 潮濕空氣絕熱膨脹溫度隨高度而下降
- (δ) 潮濕空氣溫度隨高度而下降

圖(3)

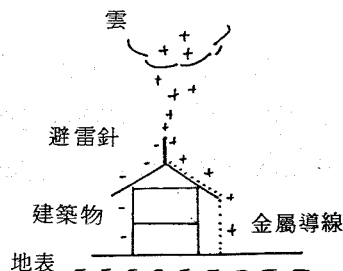
其上。故雷雨或冰雹也會將負電帶至地表。(參見圖(4))



圖(4)

五、避免雷殛損害的發明—避雷針

由於建築物、樹木等與地表為等電位（因縱然其導電性不佳，然而經長久的時間電子逐步移動仍可使其與地表達到等位）。若看任何一小部分，電位 $V = q / (4\pi\epsilon_0)r$ ，因地表和地面物電位相等，故各處 q/r 值均相等。不過電場 $E = q / (4\pi\epsilon_0)r^2$ ，故 $E \propto 1/r$ 。在樹枝尖端或高樓頂端其曲率半徑 r 較小，故 E 較大，因此雷殛便較易擊中這些地方，此稱尖端放電（point discharge）。為了減少房屋的損害，十八世紀美國科學家富蘭克林（Benjamin Franklin, 1706-1790）發明了避雷針。最原始的避雷針為一導電性良好的金屬棒裝置於房屋的最高處，此金屬棒連接一條金屬線至地表接地，避雷針因在房屋的最高處，其尖端曲率半徑又極小，分布在其內的負電荷所產生的電場大，易促使其周圍的空氣游離而造成一條可導電的通道。且避雷針本身又是良導體，當電荷傳遞至其上時極易被沿著金屬線導入地表。這一刻意造成

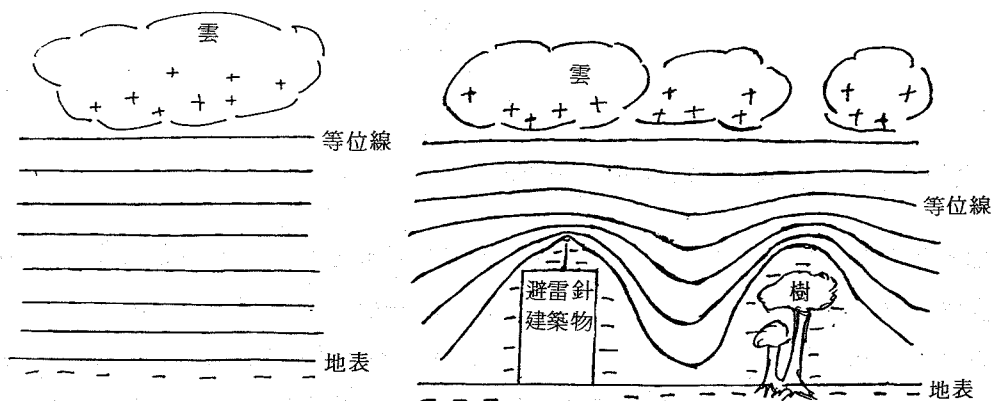


圖(5)

的電流通道可使雲層和建築物的異性電荷緩慢中和，不致造成突發性強烈放電傷害悲劇一雷殛一而損害建築物，使雲層放出之電荷完全由避雷針帶至地表而不會損傷建築物。

(參見圖(5))

不過我們將在此提出一更簡單清晰的觀念來解釋避雷針的作用原理。導體表面的電力線必垂直物體表面，否則會在平行物體表面的方向有電場分量而造成導體內的電子流動，電子流動則因與晶格碰撞，轉移部分動能給晶格而增加其振動。巨觀來看，即是內電流因電阻而使導體溫度升高，這並非平衡狀態。故電力線必垂直導體表面，亦即等位面必平行導體表面。原本雲層與地表間之等位面係平行地表，今因與地表等位之高樓、避雷針的出現而被迫透過電荷的重新分布，擠壓等位面以求等位面仍平行於高樓和避雷針表面。因而使避雷針上方等位面之分布特別密。又電場強度為兩等位面間電位差除以其間距，和等位面密度成正比。由此推論，避雷針上方的電場最強。因而如上所述具有保護建築物的功用。(參見圖(6))



圖(6)

六、結 論

由上可知閃電和雷雨其實是地表維持所帶電量平衡的一個必然現象。不過，透過避雷針，我們可以避免因雷殛可能帶來的損害。上述的實例也說明了日常見到的現象往往可以用淺近的物理來解釋。而這些現象的解釋又能使物理更為生動，使物理概念更為清晰。

誌 謝

感謝清大物理所朱國瑞教授對本文提供許多極有助益之討論與建議。

七、參考資料

1. Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands, Lectures On Physics, Volume 2.
2. James R. Newman. The Harper Encyclopedia of Science, pp108~109, pp1186~1187.
3. Rita G. Lerner, George L. Trigg, Encyclopedia of Physics.

科學教育月刊全年 10 期(7、8 月休刊)，自十月
(第 173 期)起收代印費及郵資全年 300 元。

帳號：1 2 2 8 5 2 4 1

戶名：國立臺灣師範大學
科學教育中心

