

雷雨閃電之理論研究 編輯室

A Theoretical Investigation for The Thunderstorm Lightning

閃電問題目前正發生於基本科學的許多高度專門性範圍，然而可能不會令人驚奇的是從事這種主科的人却為數不多。總之，這並非唯一的問題，為解釋閃電的許多科學事實和理論正一天天被發現形成而呈瞬息萬變和永遠在變的圖型。

在過去短短廿年中，閃電的機械作用（或觸發作用）已為眾所週知，而且就是最近的幾年，閃電的宏大重要性以及幾以一電流之「通路」（closed circuit），把地球表面，電離層和雷雨雲接合一起之觀念，獲得甚高之評價。在所謂「環境電學」（Environmental Electricity）方面之專家們目前正致力於和其他，諸如在太空斗面之太陽輻射以及最近發現的范艾倫帶和被地球內部液體心所發生的地球內流電等，連結起這一廣大的電路。

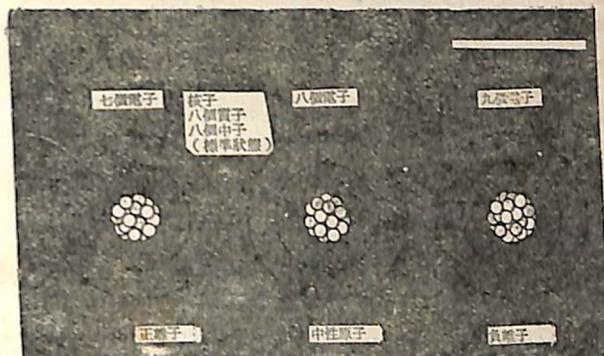
姑勿論這些尚未定讞的理論，為形容閃電我們已選定些有穩固基礎的學理之某些簡化敘述。據云這些理論因事過境遷可能業已過時，然而我還要堅持這些理論，我們認為凡有助於解釋某種學理之理論皆為正確之理論。

一、電子學中的的電子論

(一) 原子結構

目前人類已知組成各種物體者，共有百餘種不同的物質，無論其為單一或結合（元素或混合體）姿態。一物質（元素或混合體）在羣體中與其物質保有化學成分之最小部份被稱為分子。如一物質僅有一個元素，則此分子常由一個原子組成（普通元素的分子，如氫、氧、氮及氬，當其被發現於自由狀態時，每一分子含有二個可識別的原子；這些氣體據說是雙原子的，而當其他諸如氮和氬等證諸上述是單原子時）；如一物質呈混合式，則其分子是由不同的二個或以上的原子混合所組成。例如，普通的鹽（氯化鈉）是由二個元素（氯及鈉）的混合所組成，而每一鹽分子是由一原子的鈉和一原子的氯結合而組成。

所有物體，無論其為固、液、或氣體，皆由



圖一 單原子氧的分子和離子圖。

原子組成。每一原子有一核子包圍着，包圍核子的又是些小質點叫做電子，旋轉或圍繞固定之軌道運行。（參見圖一B）在軌道上旋轉之電子與核子間有種引力存在。而核子又由兩種不同的質點所組成那就是中子和質子。（參見圖一A）中子非帶電體，但質子却荷有與荷負電子者同量的正電荷。電子藉以高速度圍繞核子之旋轉，產生所需之離心力，以平衡核子中質子的正靜電吸引力。

構成原子結構的各種質點（中子、質子及電子），一致的存在於所有原子中，且可能被認為像構成宇宙萬物的基本和重要大廈一段段之通衢。中子與質子幾有相同之質量，二者中之任一其重約大於電子1,850倍。由之，為所有實際目的，一原子之質量乃等於其核子的質量。

一切已有元素的原子呈相同的化學性質，且因所有這種原子有相同的中子量，而其核亦有相同的正電荷。所可能者為有二或多個原子型的同一元素中，在核子中的中子數不同。此型物已知為某些元素中之同位素；牠們呈現相同的化學性，在其核中有相同的正電荷，但其質量各異。

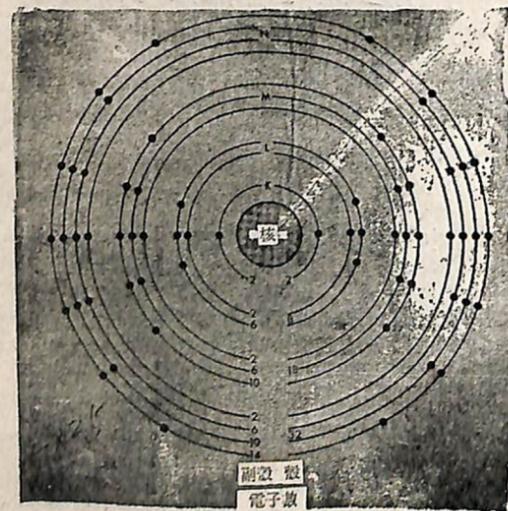
然而，對本討論更切題者，亦可能為同一元素之原子有不同的電子數。其間在一原子中的電子數乃等於在核子中的質子數，據說其為一元素中之中性原子；其中之電子較質子為多，因原子為「負」性原子；故該原子據云為一「負離子」元素；相反，荷載，故該原子據云為一「正離子」元素；（參見圖一A及圖一C）。有別於原子或分子，離子之構成可

由在靜電中之簡單試驗予以證明，即以絲絹去摩擦玻璃棒，玻璃棒喪失部份電子於絲絹上而得到的是正電荷。（絲絹為負電荷）

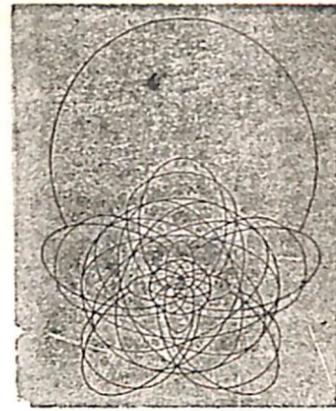
一個原子的正常狀態是當其呈中性，而在正常環境下，一元素之正或負離子竭力要完成或達到一正常狀態——那即是牠們趨向於要吸引或排拒一電子，以至變成電的平衡或中性止。這種在原子間的電子運動，即為我們所知為電能之來源，而電子是電荷中的最纖小物（元素單位）。（為實際目的，如庫倫這一名稱之由來已建立多年，而作為電量之基本單位，且物理學家於茲亦決定一個庫倫實際代表 6.24×10^{18} 的電子。如此一個安培即等於電流通過某點每秒有 6.24×10^{18} 電子的固定流量率）

如前述，已知有百多種元素出現，且本質上各不相同，如所顧及之原子，其在核子中的質子數，亦不盡同。如是，氫有一個質子，而氦有二個質子，而鋰中却有有三個質子，一至某些元素竟有高達一百個甚或更多之質子。這些元素中的每一個中的中性原子，亦含有相當數量的電子去平衡這些質子。

在一原子中的電子不圍着核子旋轉而呈散漫姿態，牠們保持着固定的軌道，而且這些軌道（電位的，或呈其他方式）在所有元素的所有原子中均同。電子軌道代表能的不同程度，且在任一原子中，二個電子以真正的同一能度，雖然僅能成就一個最高值，然而却被發現便於和其他數值的電子，成羣結隊以小的寬度，將能度或軌道展開而構成殼狀物，而這些殼狀物可細分為副殼狀物。（參見圖二）



圖二 原子殼與副殼之分解圖——原子內之電子（能量等級）軌道圖。

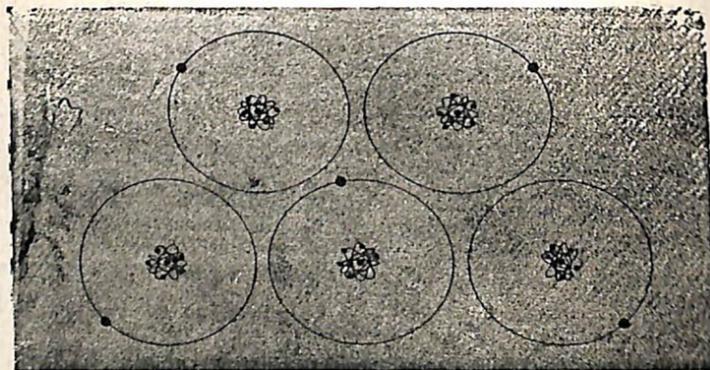


圖三 銅原子圖。

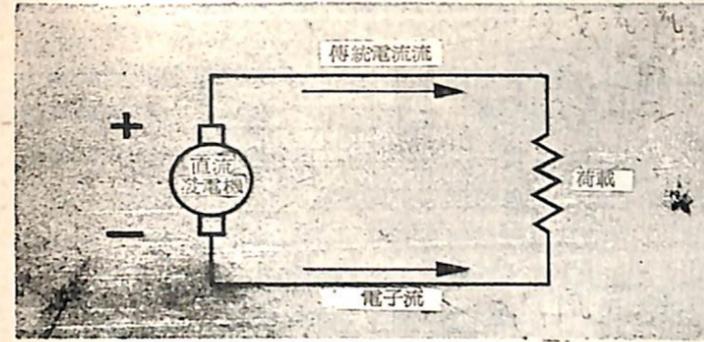
一般而言，充塞於原子殼中之電子，係從最內部之副殼當元素的原子重量增加時，呈向外工作之型態。例如，一個銅原子含有廿九個電子，其中有廿八個全部充塞K、L及M殼中，而第廿九個却遠離其他居N殼之最外緣。圖三可能係一以更實在情形顯示出一個銅原子的構造圖。居中央之小黑點係表示核子之位置，而線條錯綜複雜的不同電子軌道，却匠心獨運，對稱有序。所將引人注意者乃為N殼中的第廿九個電子旅經一較其餘廿八個電子均大的軌道，因彼等完全充塞於前邊的三個殼中而緊緊抱持着。第廿九個電子的軌道真是這樣大，如圖四中所形容者，牠幾乎跑進相鄰銅原子相似電子軌道中。

(二) 電流與電子流

銅原子結構富有一良導體性，因其極易使最外的電子向相鄰原子的第四個殼運動，換言之，可被從另一相鄰原子中的電子所取代。這種電子，極具從一原子到另一原子的運動轉換能力，被稱為自由電子，而原料（普通指金屬）具有大量自由電子者



圖四 固體金屬內之相隣銅原子圖。



圖五 簡式電路圖。

是電學中的良導體。相反，未具此質之原料或只有極少自由電子者我們稱其為絕緣體。有些物質可被分類為良導體或良絕緣體，但甚多物質乃介於此兩極端性質中。空氣是這種物質之一；它不能被分類為一良絕緣體，但却廣泛被用於絕緣目的。

以此種背景知識，我們現已可考慮把其應用到電路方面。圖五是一簡單電路，由一直流發電機經銅線和電負荷連接而組成。以一般傳統方式，當發電機開動後，一電流從發電機的正極經過負電荷而流返發電機的負極。然而，就電子理論，認為可將「能」授給發電機內之電子，以致電子被迫從一極移至他極。而其純粹的結果是兩極中的一極之原子喪失了電子而變成帶正電之情形，而他極則獲得電子而變成帶有負電。在發電機內部構成電路，引起電子從負極向正極之流動，而在銅線中的自由電子却是從一原子到他原子的運動轉換。

這二種電學上的衝突理論，因合成電流呈反方向而成。然電子理論建立時，過去陳舊的處理法（在電源外部從正向負之電流流動）為一般用途已變的根深蒂固，並因其具有更大之嫻熟性，故被發現便於為人保留。但在有關電學某些事實的解釋上，電子理論與電流之合成方向甚為重要——例如閃電之解釋即為其中之一，且其有助於將迄今所建立之電子有關理論各點彙列如下：

1. 如一中性原子喪失一或多個電子，因其所留有之正電荷（質子）多於負電荷，此原子即變為一正電離子。
2. 如一中性原子獲得一或多個電子，因其含有較正電荷過多之負電，故此原子變為一負離子。
3. 一個正離子有吸引電子之趨勢，而負離子却排斥過量的電子，一至變成一中性原子
4. 負電荷所代表的是電子的剩餘。
5. 正電荷所代表的却是電子的不足。

6. 電學基本的是種從一點到另一點（而該點所集中之電子相當少）的電子流，此種流動不斷進行，直至電子的分佈達到相等或均衡狀態而後止。所需注意者為在此二點間一般的說法是有電壓或電位差。

7. 電流之促成激發主有關導體，如銅、鋁等之原子結構，但絕不僅限於這些元素。電子流甚至可經過某些被認為絕緣體的元素而發生，如荷電二極間之電位差，到達有效之比值——此又為閃電之另一說明。

與閃電關聯之另一現象的瞭解，可由上述6項電流基本概念的記憶和應用而獲知。一般此法則被應用於電的線路上如圖六，其中之電子流從負荷電區以過剩的電子量流到和過剩相當的電子之不足的正荷電區。然而，此法則亦可被應用於不管其電荷性質（十或一）的兩極區，例如，以荷電量不同的兩個負中心藉一導體使之連接，然後電子流會從荷電較多的負中心流至較小的負中心，直至電子的分佈達到均衡狀態止。然而此二中心間之電位差却為零，而二個負中心仍帶負電。

兩極的正常法則，亦可應用於二者彼此的「同性相斥」和「異性相吸」上。這樣負離子和電子亦如正離子般會彼此同樣的相吸相斥，但正離子吸引前述二者。對於這些法則，一顯明的例外是每一原子中緊緊堆積的核子，其中之質子互不排拒，被一種束縛力稱作「核子力」拘禁一起，而這種核子力之強需費強大的能量始能將核分子逐出。

二、天空和地面間電的流動

(一) 地求至電離層是一碩大的容電器

混和着各種氣體的空氣主要為氮和氧的混合體。如前述一般空氣被認為係一絕緣體，而且將為一絕佳之絕緣體，如氮氧分子呈中性狀態時。然而，實際空氣是由不同量的中性分子及正負離子所組成如圖一，且當空氣中部份離子增加，空氣逐漸的就會變成一更佳的容電器。（圖一中所示者，當然是敘述單原子氧的分子和離子含有八個質子。而單原子氮含有七個質子的分子和離子亦相似於圖中所顯示者。這些氣體在牠們的雙原子情況其分子和離子的作為即較此更為複雜。雖此，其電離的原理仍同——即分子獲得或喪失一或多個電子。所亦應注意者可能是氧和氮的單原子分子及離子在50哩的高空會被發現，且逐漸變多，（當被送上離子層的太空人

增加時。)一個電離化的分子可能獲得一叢式的其他分子以形成被叫做小離子的那種東西。當一小離子依附固着於某種物體，如海水泡沫、塵埃、或煙等的分子上時，一個大離子即會形成，大離子通常係由正離子所形成。

近地面，大部大氣之電離係由放射性物質，諸如鐳鈾等之正常變輻射所引起。然而，地球大氣中的多數離子却由各種高能質點所形成，這些質點有個集合名詞，即源於外太空，在空中撞擊中性分子，和從其軌道打擊電子之宇宙線。地球大氣對於這些固定的輻射其所扮演者不啻為一防盾，致使多數從宇宙線而來之高能，不等其射至地球表面時即被消耗。總之，更多的離子被發現於更大之高度，隨着逐漸被送上太空的人，其高度已達四十或五十哩，而該區即為電離層，有足夠的離子反射無線電波。然而，就在此處，所離子化的分子百萬中尚不足一個。

電離層，雖有傳導性，但可被認為真正是一不荷電的整體，因電離層內之正離子量等於負離子量加電子，這些電子偶然可分佈於不同的高度層且達電離化至某種程度。相反，地球有過剩的電子，實際約較電離層多三十萬至四十萬伏特的負電荷。以此十分可觀的電位差再加大氣最佳之傳導性，足可引起地球不斷向電離層損失放出電子。

全部地球表面與電離層，可能被認為係一巨型球體電容器遙遠相對的荷電板，有空氣充塞其中儼然為一劣等的絕緣體，因其不斷漏電。除離子的存在使大氣有輕微的傳導性外，各種氣象程序——合稱降水或水文循環——對此電容器之漏電率亦有貢獻。例如，落雨有把較少活動的大離子（多數為正離子）帶至地球表面之趨勢，相反電子却被上升的濕重空氣携至上方。

這種由地面使電子固定之損失被稱為離子流，如其所呈現之極小值，經測量，其量只有地球表面每平方哩的0.000009安培。可能應予注意者，捨降水循環不談，這種從地球出發的電子流的流動，經最便利的傳導路徑或供給最小阻抗的環境；這樣使多數電子放電於天然或人為的尖端，這種尖端係投入大氣中且有效減低卅萬四十萬伏特之位能；後者之程序據知即為「尖端放電」，因電流亦可由尖端激發；如其可發生於建築物，大廈及樹之頂端，草葉，甚至生物——其所帶來之有趣事實為一個人當其站立時，從頭至脚其電位差約為250伏特。

(二)雷雨像個發電機

據計算知地球在不到一小時即可喪失其電荷，除非其電子的供應是不斷的重補着。而且離子流的存在，於一個世紀前業已被發現，且並非至最近幾年才藉各種程序使地球的荷電被維護建立。目前普遍所可接受者是電子向大氣之固定損失，由每日地球上所發生之萬千雷雨所平衡，但主要在熱帶，熱帶可設法把電子運返地球，而且此種運輸可觀的一部份，係藉閃電打擊之手段劇烈達成。

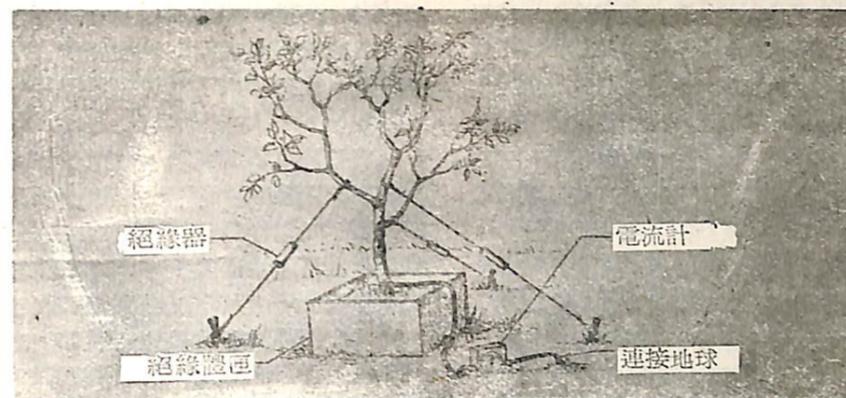
這種敘述，對乍知雷雨及與其所關聯之閃電，似乎有點令人驚奇，這種事件對我們中之多數人似乎僅為一偶然之現象，「然經發現其為迄今解釋地球電荷的維持和存在之唯一有效解釋」。進言之，吾人已證實雷雨之頻率及其各項宏大數值，當我們考慮此一整個行星體，係與地球為維持其剩餘電子及離子流的需要而保持一起，密不可分時。

每年發生於美國佛羅里達州的雷雨有九十日以上，但西海岸的加州却相形見拙。在烏干達的康帕拉（東非）每三日中有二日可聞雷聲。據估計經常有1,800個雷雨發生於地球表面，而平均每秒有100次從雲端至地面的閃電。

多數的雲，或多或少，皆為帶電物，且有擊碎分子使其變為離子之能力，然後在雲中隔離這些離子，使成荷正，負電的離子區。總之，積雨雲或雷雨雲（按規定均需有砧狀卷雲，否則為濃積雲）有此能力，且扮演着像一個巨型發電機或電容器，而達一特殊或額外程度，且為可構成極強電力足以產生閃電的唯一雲型。

其基本力量之範圍，由雷雨的廣大垂直發展可知。一完整的積雨雲可涵蓋20—200平方哩之陸地，且一般的垂直向伸展範圍約為3,000—30,000呎，雖60,000（12哩）之模式者亦屢見不鮮。在如此的一個體積，正常時速40—70哩的上升和下降氣流中（主要根據水電之大小，理論上，甚至在實際飛行試驗中，其上升氣流之上升率當不止其值）；噸數龐大之降水，以液體水滴及水晶形式，循上升氣流被運至溫度可低至-70°C的高度層。

在這種條件下，電離化的結果，無疑可由雲中之強烈亂流獲得，其間空氣、水、冰及其他質點在不斷的撞擊和磨擦着——其結果多數相同。但就更為巨大的範圍言，當靜電之產生得由琥珀或玻璃用綢緞磨擦而得，一塊雲可發生強烈電離，至少在



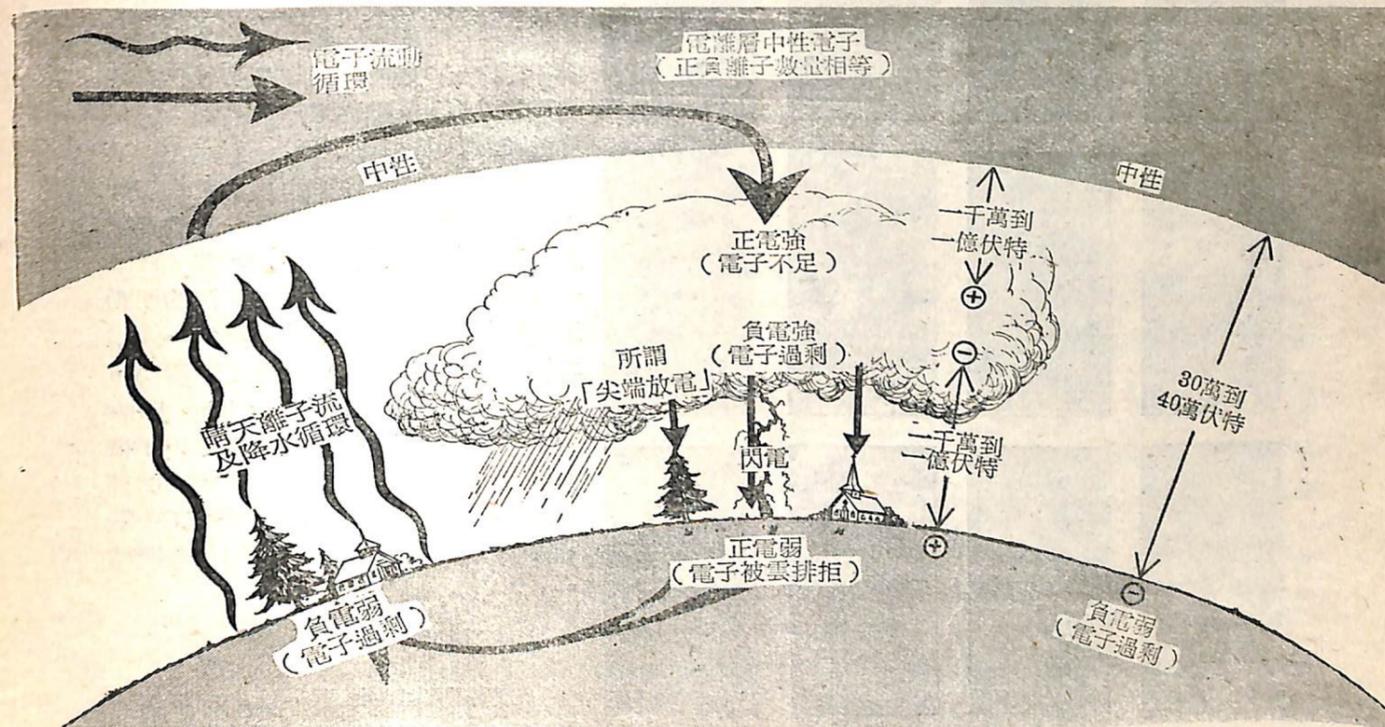
圖六 史康蘭博士 (Dr. B. F. J. Schonland) 以樹為尖端放電的試驗圖 (將樹和地球絕緣，只留電流計例外，結果發現晴天時電子流從地球經過樹而流向大氣；但當雷雨雲過頂發現反方向流動的電子流大量增加。)

理論上，是更便於理解的。然而在對將離子和電子隔離為固定的正負區的那種天然方法之原理仍需建立，雖然形形色色，分門別類的假設，事實證明是無處匱乏而層出不窮的。

捨純粹之推理臆斷不談，據知，無論何種原因，一標式雷雨雲有二主要荷電區：負區之伸展遍及

雲的整個下半部而正區多半位上半部之中間區。有些雷雨雲在雲的下半部接近雲底之中央為正區，但正的上半區和負的下半區是習見現象。由之，以此作用，知標式雷雨雲之上半部，其電子不足，而下半部則電子有餘。

(三)重返地球的電子



圖七 地球至電離層間之電流循環圖。

現在再返回先前的討論；諸如離子流因地球而存在，副電荷，及和大氣相比有剩餘的電子等。總之，一標準雷雨雲之底部較地球有多而強的負電荷——計量之勢差約為一千萬至一億伏特。結果在雷雨雲下之離子流向地面流動。在晴空的好天氣區，一股經常的電子流從地球流向大氣，但在惡劣天氣區，因雲的關係，不僅其流動方向和晴天有異，且使向地球流動之電子流大量的增加。與離子流比較，此種反方向的電子流，當經過天然或人為尖端時會大量出現，而且更錯誤的是這種現象仍一直被人引用為「尖端放電」，甚至即使電子向內流向地球。（參見圖六）

雖向內流動之電流被認為較晴天時之外流為大，然雲下之地面其電子絕非飽和，且以自由電子在地面上常變為正的電荷，且被雲中所集中的電子所排拒，（參見圖七）高聳的實物，如樹，寺院尖塔等，可變成比地面含有更多之正電，而這些地面上

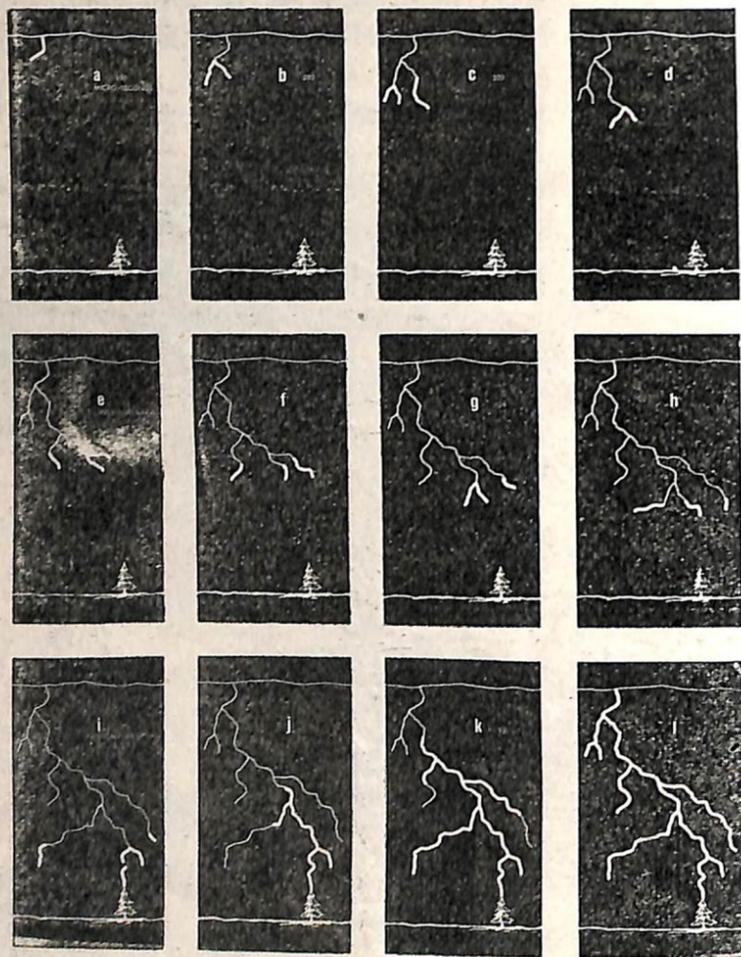


Figure 24 Luminous Progression of a Single Stroke Lightning Flash

圖八 單一閃電和電擊之發光過程圖。

的實物，有的可能上罩皇冠状物（聖愛摩火），當大氣電離化發生於雲和地面間強烈的電位差影響情況下時。聖愛摩火不常發生，但為一特強電離化發生之指徵。

在雷雨雲下之活動，是電子脫離空氣透過許多放電點流至地球，可說明多數之電子傳導，但空氣常甚貧弱不足以作為一個導體而允許電子流藉其去平衡雲與其下之地面間所形成之電位差。偶爾，當雲達成熱期，雲之負電區發展膨脹直至氣壓增至最大，空氣之絕緣效應始被完全破壞，結果一股泛濫的電子流，從雲至地面，沿着那種特有形式的崎嶇蜿蜒小徑，作不停的間歇性的潰決——「閃電」！

三、標準閃電之機械結構

因明顯理由，有很多的現存文獻、證據及研究，已完成從雲至地面型式的雷電閃擊。由之，因其情報可用，下列討論將專門以此型式為主。但亦無何理由認為本文所引述從雲至地面雷電閃擊之基本敘述和理論，將對所有各式情況無何助益。

在一九三〇年代中期之前，在發現閃電的發展上已有重大進步的成就，而引起劃時代之劇變，因對普通的絕緣空氣，僅用一秒鐘的磨擦即所使其轉換為白熱的導體，使透過這種導體電之流動像透過銅那樣的容易。

為進一步獲得閃電知識之最大障礙，是其過程極快。通過空氣罅隙的速度，一秒之範圍約為60—60,000哩，而且一有趣的說明是一有紀錄如此快的運動過程能力的一個儀器，該儀器為一九〇二年英人 Charles boys 爵士所發明，後即稱「波埃斯閃電相機」(The Boys lightning Camera)。於不足卅年後，此改良設計的相同相機極其成功的被用於南非在史康蘭博士領導下的工作隊，致使揭開閃電之謎的任務能及時開始。

(一) 標準閃電的發光過程

這種情形可由展示一連串由高速相機所攝之極高速電影軟片圖的可能顯示予以說明。(波埃斯相機可就不同原理使

其從事電影相機之工作，但從此相機所獲之實際結果却非文字所易說明)

圖八是一絕大多數從雲至地面的電擊標準圖，這種閃擊、擊擊成雙、並由耀眼的發光先行光帶從雲端通到地面，然後緊跟着的是一燦爛反向光帶，沿被先行者所形成之同一路徑，從地面伸向雲端。此先行光帶之路徑可由圖八中前九圖的描寫說明，而該圖等之拍攝係採每間隔一百微秒攝製者，一微秒等於一秒的百萬分之一。總之，一反向之光帶較先行者更快，以便於有效形容，故後四張圖之時間間隔僅十微秒。

故此由圖八所敘述者，在通過約半哩的空中罅隙，其所需時間約為一秒之千分之一。所應強調者為雖吾人將此閃電類型分為標準或典型，然而閃電之打擊普通可擴張許多哩。且有關發光演進之速度亦可能較所敘述者慢很多倍，或快很多倍——為紀錄反向光帶過程，曾有達光速十分之一秒者！

此分叉閃電路徑一旦完成，(如圖八中之I—J圖)反向光帶可能存在一甚長時間(根據閃電標準)，而跟着而來的是數個先行光帶，然後反向光帶沿着已建立之主路徑，而非全部各種分枝向上傳送。在一次閃電中，獨立的電擊或局部放電的最多習見數約有三個，但有多至十四個的紀錄。就是這種間歇性的通路之發光，才引起一次閃電中所放光之搖曳閃動。由之，整個一次閃電可歷時長至一秒，且通常由數個有間隔性的短促過程之獨立性打擊所組成；每一打擊之間隔時距約為三十分之一秒。

在對地面放電首次閃擊中的先行者，其表現特別有趣，因其可建立一軌跡，此軌跡將為所有繼生之光帶所遵循。這種先行者被稱為「短距離」或「階段性」先行者，因其演進過程有別於那些在繼生閃擊中的先行者：其前進呈一連續性階段，每一階段約長150呎，且在每二階段間，停息約30—100微秒。如圖八a至圖八h所示，每一階段性先行者之運動，均較已建立之軌跡發出更亮的閃光。抑且，與每一新運動相借者，此叉狀軌跡及分枝，力求利用空中條件中每一有利和空中條件的突然變化。(許多科學家咸信，階段性先行者，又較緩慢飛行的光帶為慢，該光帶在階段性先行者前，先備好一輕微離化的狹道……，換言之，前者為後者之開路先鋒。光的照相未顯示出飛行之光帶，然有其他證據支持其存在。)

是乎可疑者為圖八h中在三個可能的階段性先

行者之分枝中，不悉那個究竟可先到達地面，並建立起主要的放電通路，但在圖八i中，明顯有一分枝，對正一樹，有接近其路徑之利。圍繞樹之電場甚強，致使接近先行者鄰近者是一從樹上去會合它的彈簧式跳躍光帶。這種向上運動的光帶，可能被認為是一有燦爛閃光的聖愛摩火，而實則是一反向光帶之開始，且在階段性先行者實際到地面之前，就和其作連絡工作，然後迅速向上旅行並向外照亮所有被先行者所形成之分枝(圖八J至L)。

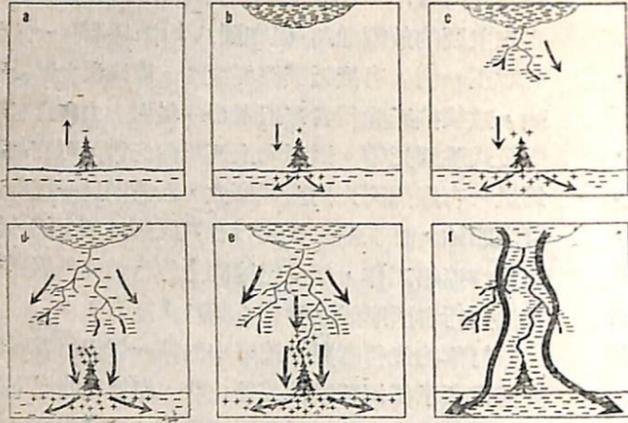
打擊的先行者與一連串中的第一個先行者不同，不常顯示任何階段性或停止狀，僅繼續的向下通過原先已建立之狹道而不形成分枝。這種先行者稱做短矛式先行者，當其強度達於巔值時發光，並有一燦爛的短矛倏忽從雲端投向地面。

(二) 標準閃電的電之活動程序

這些比發光程序更難形容的活動，發光程序還可以照相紀錄能夠自明。總之，照相的結果可被人誤解，因為牠們給了一種從雲至地面二種方面電流的印象，但這却不是我們所能在此接受的。從閃電而產生之光僅是從空中荷電而發生的一種副作用，經此作用始有光帶掠過之現象，且其強度係隨受感應激動之空氣分子量而變。由之，閃電的照相結果不表示放電之方向，事實上，圖八所敘述之連續性放電全景係由從雲至地面之電子流所引起；那一術語「反向光帶」尤其是騙人的，除非是嚴格的應用到光旅行之方向。

閃電的一些反向光帶所携之電流經發現可大至20萬安培——為空氣正常傳導量極劇烈改變所需之流率。一立方公分所含之空氣約為 10^{23} 氣體分子，且正常的，僅有10,000個是離子。這些離子的存在使空氣僅為一很微弱的導體，但却足可為晴天允許離子流存在之導體(參見圖九a)，且能使電子從雲至地面流動在尖端放電過程時。電子作反方向流動由圖九B所示可知，所需注意者在樹頂端為一感應正電荷。這種電離，如極強，可證明其本身如一日冕或聖愛摩火之可見現象。

總之，巨大的位差(一千萬至一億伏特)在雲底負電荷而感應地面正電荷間建立起一強大之電場，且在此電場內電子偶可被加速至臨界離化速達每秒九十哩。超過電流一般規則的此種臨界速，其中從分子到分子的電子流，即不能應用。一自由電子達離化速，係以迅速的在分子軌道中不能被捕獲的



圖九 在一標準閃電內電的過程（電子流）圖。

速度運動着；牠保留着自由，且以電離解放其他自由電子。因所有新生的自由電子亦被電場加速，換言之，牠們解放其他離化電子等而週而復始。結果是一巨大的電子崩落，那也就是一次階段性先行者的開始。（見前述階段性先行者與飛行光帶間之關係）。

連鎖反應是繼續不斷的，除非有中和作用的影響存在；當電子崩落在最初即行建立，或被雲的排斥場加速，且亦受正離子留在後面數量增加的影響；有趨向把電子拉回。留在先行者尖端的電子是不時的被減緩和檢查着，直至剩餘的正離子被從雲端的電子流中中性化。以此減速或阻制影響而消除電子，然後能使其進行另一次的向下涵湧疾瀉。此重複程序以五萬分之一秒的間隔，以每一階段約九十到二七〇呎的距離前進於業已離化的路上，且當前進入微弱的離化空氣中時，顯示一階段性先行者特有的猶豫運動，且在每一新階段開始前彎曲轉向並呈現叉狀，以取得空中條件中任何局部區之不同利益。（參見圖九C）

當先行者向下旅行，牠猛烈的改變牠所滲透的空氣。每立方公分的狹道現含有約一百億倍於正常的離子，使狹道改成一良導體，該導體向外分枝，如一多舌狀金屬物從雲端連接並伸入其下之空氣。因每一階段之放電卒使雲中之電荷有效的減低，而將先行者和地面間之電場強度漸被加強。如圖九d所示，這種大大強化的電場，致使甚多電子被排斥於地面，且從接近於樹和其他突出物四週的空氣中，一由許多正離子及從樹頂受激勵的中性空氣分子所組成之彈簧物所組合而成之光帶，迅速向上跳躍和先行者相連一起。這種向上運動的正離子光帶為

純粹的聖愛摩火，但却強度更大。牠是那種反向打擊的開始，而其前進的發展有電子崩落或爆炸過程可支持，但是相反方向；在向上前進的光帶前的電子是被「拉進」去而非「推出」去。

圖九e中向上運動之正光帶，最後終於和向下運動的先行者相會，其作用在其接觸點，勿寧為一個死活瓣的突然開放，電子呈傾倒般而下以建立起離化的狹道。且當電子距死活瓣最近先向前移動時，那是一向雲際增強分子活動的前進運動。據照相顯示那是一強光放射的向上運動——反向光帶，但在全期中，電子呈向下運動。（參見圖九f）因被先行者所產生重而預先存在的電離性，使反向光帶之運動至快，且對最重的電流和在打擊時放出燦爛的亮光負責。

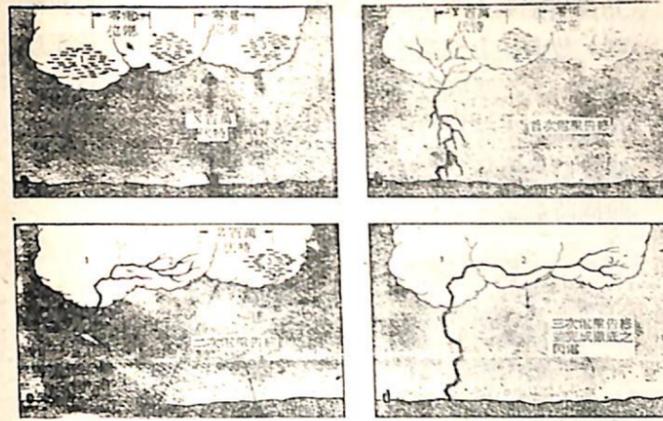
(三)複式打擊閃電

為簡化所述討論，故在圖九的雲中表示僅有一個荷電區，因可能該種閃電僅由一種電擊所組成（先行者與反向光帶），而在雲底構成放電現象。然而，如前所述，平均而言一般閃電係由三種電擊所組成，先由階段性先行者及反向光帶電擊開其首，然後是二次短矛式先行者及反向光帶電擊殿其後，並利用同一主要電離狹道到達地面。

可信者為此種重複的電擊，所顯示於肉眼者，僅是單一的跳動或搖曳閃擊，常從數個雲區放射。圖十a描寫一塊雲中有三處負荷電區，我們的簡化假設其每一情況相同。且如任何二區間之電位差為零（參見圖十a，大致呈水平向），而任何區與地面間之電位差却為 \times 百萬伏特。

圖十b表示將第一區之負電荷（電子）竭澤後，由普通的先行者和光帶程序對地面打擊的最後階段。我們將假定這種情形之會發生於第一區，乃因該區碰巧具有最有利之情勢或為打擊發生而安排之環境所致。總之，所可目證者，原先存在於第一區與第二區間之電位差，由於第一區之放電，現已變為 γ 百萬伏特。這種潛勢的突然增加極可能在雲中第二區至第一區觸發一次電擊，且如圖十c中所顯示者，為可能儘快有電從第二區中放出，並將利用仍未分散之路徑，該路徑曾為第一次電擊所利用者。

同此，圖十c及d說明第三個電擊發生於第三區是如何從第二區與第三區間在 Z 百萬伏特之電位差的突然增強情勢下而觸發的。



圖十 閃電的複式閃擊圖。

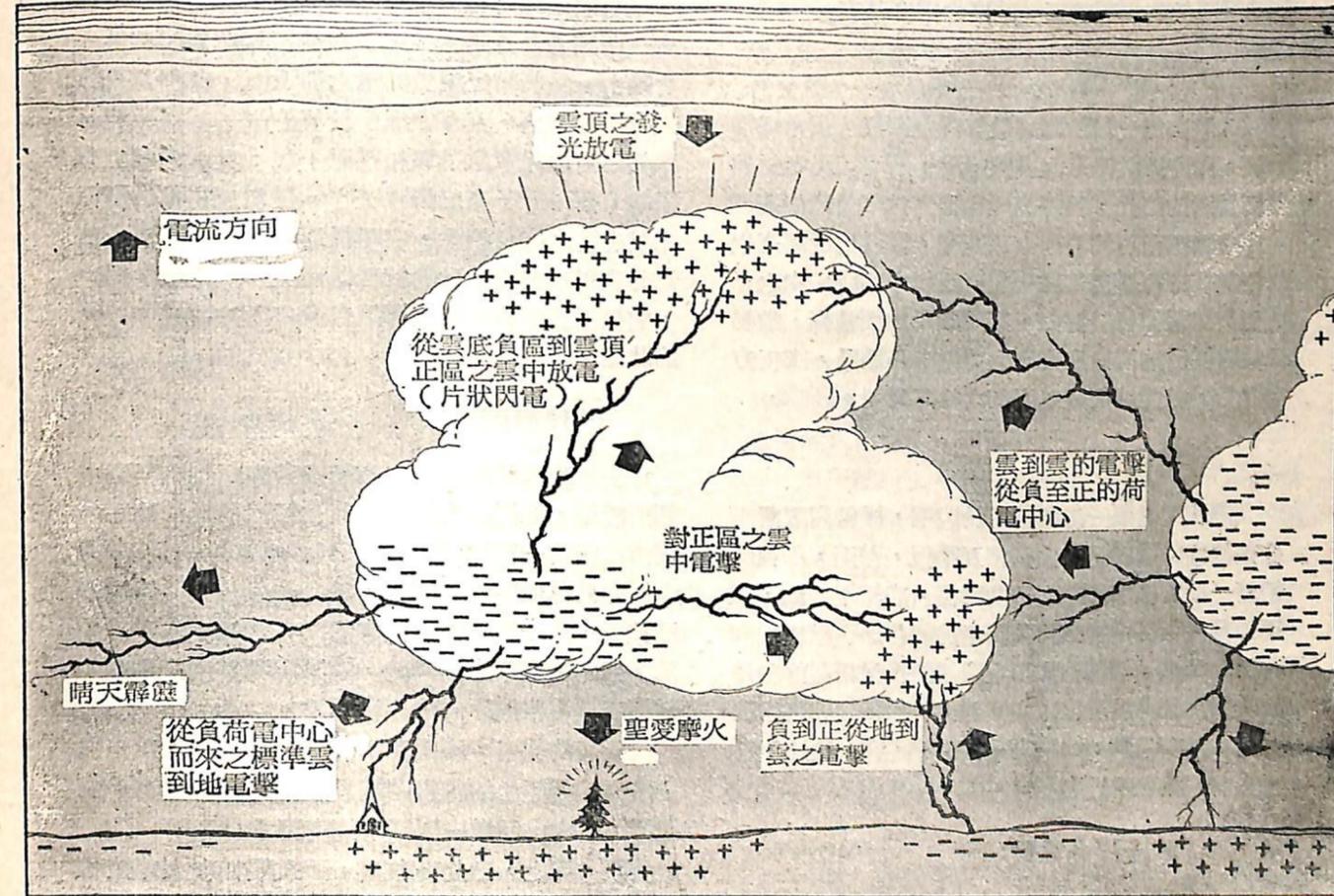
所有趣者為這種在雲內之荷電區其平均距離為四哩，這種數字之確定所根據者，不但有氣象觀測，同時還根據不同電擊的時間間距和光帶速等之計算。此種情形對一目視觀測可能更較容易，因一次雲至地的電擊，不僅將可觸發同雲中之電擊，同時亦可觸發雲至雲之電擊，所以一個第二區的荷電區，

最終亦可對地面放出電子，並且順延第一雲區原先已被離化之路徑。

許多此種「交感或共鳴」電擊是可被觀測的，而且，偶然在各種不同雲區放電間，有甚大的時間間距，所以一種可見的停息發生於雲至地及或雲至雲的閃電中。雲至雲之閃電，後面所跟的是另一次雲至地的閃電。這種沿着同一電離化路徑作連續不斷之放電，直至雲內荷電中心再成就一次電的枯竭現象而後止

四、電的變化和其他現象

我們現已討論過閃電的主原因，無論閃電可能被稱做什麼，或有何專門名稱，然而閃電之主要目的即是從大氣中把電子傳送地面，由之維護着地面的負電荷。所被證實者為所有雲至地之閃電所帶下之電子約佔百分之八十到九十，而其餘則為從地至雲的放電電子，在這一例證中之閃電涉及一雲中之正荷電區，（參見圖十一）



十一 閃電變化圖。

(一)雲到雲之閃電

所同樣被證實者，為雲和地之閃電，僅說明一總體性的磨擦（圖十一所示），其絕大多數之區別被發現成就於雲到雲及雲到空中之閃電，雲內閃電，及在比較上可謂僅有的那種閃電蜿蜒迴避在其於空中消散而未抵達目標前，可行數哩之遙。

這種型式的雲到雲閃電，涉及正負荷電中心，對飛機最為不利。此型雷雨閃電多發生於乾旱不毛區域，多不涉及與地面放電之討論，而其雷雨雲底部一般多較潮濕或寒冷地區者為高。由之此種雲到雲之閃電較旅程較大距離之雲到地者易被發現。

(二)晴天霹靂

所謂晴天霹靂，顧名思義係因觀測者所見局部天空泰半多為藍天，距雷雨雲尚有若干哩，而非觀測者所能見之遙遠景象屬之。此種電擊類多不能到達地面或其他目標，而只能於，根據報告，漫遊達40哩後消散於空中。晴天霹靂之數量極少，且極可能被發現於乾燥不毛區，該區之雲底甚高。

(三)片狀閃電

片狀閃電一般被歸屬於雲內之閃電，故常隱而不顯，除非近雲邊緣之多餘部份，所有可見者是散亂而普遍的亮光，這種亮光可把雲之部份照的透明。片狀閃電常可將雲的全部照亮，當雲頂或雲底之二相對荷電區實際相遇一起而互相中和時。由之，此型閃電最常見於雷雨，其雲底距地面甚高，故易使放電從雲的低層向高層之荷電中心通過，或反方向進行，較對地面放電所費之時間為短。

(四)帶狀閃電

帶狀閃電這一術語被用於閃電，係就肉眼觀測像數個同時之閃電，緊密相互平行，甚至，即使其循着一般的標準閃電之扭曲路徑，亦無不如此，實際這種外相係由複式打擊閃電的離化路徑被風吹向一側之結果。個體性繼起之閃擊然後又相對的和地面及觀測者處於變位方向。例如，半秒鐘的總過程中共有六次電擊：則平均每次電擊，在一時速卅哩的風中，將有四呎之變位。

(五)雲頂發光放電

發光之觀測業已很多，如聖愛摩火，雲頂放電

乃為所預期之事，因標準雷雨雲上部具有正的荷電區，故有從上部空中吸引電子之趨勢。所亦需注意者為一次從雲底之負荷電區對地面的閃擊，亦可能招致雲中上部正荷電區電平衡之倒置。已有許多觀測證明從雲頂對上部空氣之發光放電和對地面之閃擊同時發生。

(六)雷鳴現象

雷鳴是種沿閃電路徑長度所發生的空氣爆炸聲。電子離化流及路徑空氣加熱太快（狹道溫度之即時上升可達15,000 C），各方向之空氣迅速膨脹比音速還快。為所有實際目的，雷鳴同閃電，沿着整個狹道長度，幾為同時發生之現象。總之，一般所聞隆隆之聲，主因聞者與閃電狹道部份不同，而引起距離上的差異，且由於音速較光速為慢，故先見閃電，後聞雷聲。所以利用閃電和雷鳴間時間之久暫，常為判斷雷雨遠近和雷雨強度之正確指標。

(七)臭氧的性質

臭氧是種有特殊辛辣氣味而略呈昏青色之氣體——循其名而責其實，此字源於希臘意為動詞性「去嗅」。臭氧常出現於閃電之鄰近區，特別為飛行人員所易遭遇。其存在係由於氧的原子型態改變，我們已討論過單原子氧和雙原子氧：臭氧為種三原子氧（每一分子有三個原子）。臭氧比正常的雙原子氧有更大的含能量，它可從適時形成的閃電之放電時獲得這種能。臭氧較普通氧更少安定性。總之，它很易於隨着熱能之釋放自發自動的改變成正常的狀態。

(八)球形閃電

多年來球形閃電或火球即由滿腹狐疑的科學家們所測得，他們對此現象充其量歸因於是觀測者對附近閃電的一種「視後效應」(visual after-effects)。雖此球形閃電之存在，於今一般仍為科學家們所接受，然一種模型或標本尚需在實驗室中予以製造，且彷彿有不少的理論，意圖解釋其由受驚駭的觀測者所報告的不同現象和稱述。

所有的報告，咸同意該種球是透明的，然在同中求異，對顏色的報告則幾乎包括了整個光譜的全範圍，而大小則從一個橘子到海灘水球不等。火球之論調，總之，已由高和寡。因人類如和火球接觸可能被焚也可能不會。這以臭氧的味道有時可獲明

證。在閃電的過程球的變化從數秒可至數分鐘，其中牠可能以浮橋式通過，或在洪流中載浮載沉，從一樹或桿上滑下，清除它週圍的障礙等。

五、閃電對飛機的有關問題

對飛機製造公司及飛機作業的航空界人士有更濃厚之直接興趣者，為飛機對大氣電的現象關係的研究工作。這類現象所包括之內容有「降水靜電」（由磨擦及或飛機經過大氣荷電區，使飛機所積電荷之漏電而引起無線電干擾）；「聖愛摩火」（一個可見的光環，由電荷加速外漏所起，是高電荷梯度常引起電之閃擊的先兆指示）；及閃電本身之許多現象。所有這些現象可能在同一情況下發生。然而，降水靜電及聖愛摩火却不一定需與閃電相借出現。

(一)降水靜電

降水靜電是討厭和煩人的，干擾所及，電子設計的適當機能均受其害，在導航和通信的功能上常可引起嚴重的困難。此種型態之電子干擾的增加係隨飛機之體積與速度而定，然正因有關飛機各部份設計之進步，如靜電放電器等而使此等影響目前已減至可接受之程度。

(二)聖愛摩火

係一以相當緩慢率放電的目證。聖愛摩火不成其問題，且不會引起什麼損害，在正確意識上，牠只是在說明週圍環境已被電離化，而閃電可能會發生的一種警告而已。

(三)閃電的意義

「閃電」一般被認為是一比危險還討厭的事情，尤其是和「亂流」及「積冰」比較，後二者是雷雨主要的危險對象。雖然閃電對飛機可促成不同程度之危害和損傷，但其嚴重性却不大。這種說法近又獲得美國空軍方面所發佈之統計的支持，該統計中指出從一九五九年一月至一九六三年十二月為期五年中，僅有一次重大失事相信閃電可為其主要原因。

這種紀錄，對商用航空印象更深，就目前吾人所知，閃電對一全金屬飛機之破壞所引起之主要傷損尚只能是種「針尖式」的破壞，但確有二件失事案件，迄今所能構成之原因可歸咎於閃電，甚至可

用「可能」二字承認此二案，然而，因閃電所招致之危險，無疑以遠在危險程度之下的姿態，作為人類正常生活所能接納的一部份。

(四)需要加強研究的部份

長久以來即為航空界的實際問題，即是能對飛安有所裨益的雷雨閃電之研究。在前述二件失事事件中發現有某些相同性存在，可能與閃電有關。二案彷彿均涉及整個的油箱爆炸，但點火裝置之真正機械結構，則未能在任一案中予以說明。可能應被強調者為飛機之「機型」及「廠牌」，二者均需為閃電之保護，具有順應或超過所建立標準之需。

對飛機含有各種不同程式燃料，可產生易燃混合空氣之油箱內，所需之氣象條件之決定，已有重大成就。總之，此一問題因實際考慮，空氣進入油箱，燃料之攪動游離、進水下霧及風化等等原因，故極複雜，所以設吾人欲期設計家們克減低易燃蒸氣在油箱內存在之可能性，顯然尚需許多研究工作。如目前所存在之事實，我們必可假定在某種飛行情況下，含任何程式的航空汽油之任何油箱，定含有爆「炸蒸氣及或霧滴。這樣已甚接近我們的問題：當其發生，該易燃蒸氣如何會變成點火？」

前述二次失事所知之爆炸究竟是否閃電可構成蒸氣之點火，仍然是十分令人可疑的。過去千萬次對飛機之電擊結果並未造成損害，致引起重大之懷疑，甚至連報紙亦刊登出「航空班機被電擊中——而爆炸」的出奇新聞，說明這不祇是種感覺論就算完事。總之，該二事件所已建立者，為閃電與失事同時發生，而所真實者為似乎以合理的理論將有助於解釋那二次失事，而這些有關事實，亦將需進行最澈底之可能調查。

有一種頗較成熟的想法是，因油箱通孔使蒸汽外逸而進入氣流中，可能閃電又擊中這些通孔，點燃了蒸汽而引起燃燒，然後火苗再進入油箱而發生爆炸。然而在上述二案之飛機的通風口附近，至少亦未近至可含有易燃混合氣體之區內，故均未發現電擊之任何痕跡，如普通所造成之小坑或痘點。同時亦發現只有在飛機爬高時蒸汽會流出通氣口，以相當和足夠的數量而支持燃燒，且如飛機爬高，火苗幾乎可確定的將不會傳播至有蒸汽向外流的管中。

總之，在承認燃料通風口的事實上——因其機能——先天的彷彿可供為閃擊點火的可能來源。洛

克希德飛機製造公司近亦參加通風口附近的燃油空氣蒸汽分佈之研究，被此計劃所產生之新知識以情報方式供給所有設計工作人員對通風口鄰近區應予保障以防點火來源之發生。

在某些情況下之另一可能，是電擊可掠過機體未梢而擊中某些組合部份，如督查所包括的油壓計或加油帽等。這些可能會順應目前所建立的每一有關標準，但亦可能尚不足以在各種組合器和主要結構間構成傳導而帶來一直接的電擊。故其裝置設計可能如此——主高壓流路可在油箱中冒出火花。

其他需作進一步研究的點火原因所包括之項目，諸如油箱與油箱間的空隙內導電器內之感應電流，和直接穿透含有可燃蒸汽之油箱及油管。某些有關這類可能性的來源，在設計方面目前已予慎重考慮，但需更多之研究以保證目前之作業和標準的適當和順應性。同時，對於飛機易受閃電影響之預期範圍的防範法需行更精確之限制。

美國家航空暨太空總署已認出加強此種研究之急迫性，吾人可預期能對這類問題給以圓滿答覆。

(五) 為何閃電要打擊飛機

這是一個預期不會使每人都完全滿意其回答的問題。最可靠的答覆是「飛機進入有閃電發生的積雨雲中，或接近（約一個翼之長）放電之天然路徑」。

多數的科學家事實上皆同意此答覆十分滿意，且能合理的說明有充份資料存在之所有被電擊飛機及迄今所完成調查之案件。雖如此，仍不乏理論以判明「飛機感應電擊之發生，將不發生於飛機發目前」之建議或主張。這種模糊迷離的說法，酷似古人所謂「先有雞或先有蛋」的問題，實無何實際意義。其他次要理論亦將討論如後，可能應被述及者為甚多似較真實之理論迄今已完成竭盡之調查，或由於興趣將盡一切手段待未來再行調查。

最盛行之理論為飛機是一比其週圍空氣較佳之良導體，可有效縮短不同性質荷電中心間之距離而由之觸發放電（閃電）。「閃電與瞬間現象研究學院」（Lightning and Transients Research Institute）的紐曼和蘿白二位夫人（Messrs. M. M. Newman and J. D. Robb）在最近的一次雷雨閃電報告中對此所述之觀點為「在飛機的隣近，控制一架飛機之是否被閃電擊中之所能預期成就者極少

，因飛機和整個閃擊路徑比較，後者可遠達數哩，故在決定閃擊之路徑方面，飛機的效果實在太小」。

另一流行之理論為飛機如非因磨擦，即因經過大氣之荷電區，接近另一中心，而變成荷電體，當牠達到够近之距離時，若非其本身感應電擊，即其本身對另一中心放電。然而，飛機所能荷之電與雲比較實在太小，故罕被考慮為一重要因素。對此理論所被述及之最多者，是飛機之荷電可想見極其有用於一個已存在的階段性先行者，在附近爆開一阻抗較小的大道，航向另一目的地。紐曼與蘿白說：「所應注意者為所有對飛機引起傷損之放電全為閃電打擊，而該類閃電其終點並非飛機，而是地面或另一塊雲，所謂靜電放電或一般的磨擦潛勢，因磨擦荷電可能存在於一飛機上，但此種勢能甚至不能摧毀一張薄的鋁片」。

另一現被主動調查之理論，是當飛機通過一荷電區而向另一中心前進時，飛機在其後會留下一條電離質尾巴。這條離子尾，較其週圍大氣之傳導性略大，故被理論性的有效縮短荷電中心間之距離，並因之觸發一次放電，這一理論供給一適當範圍之定性結構（一個够長的導體）。但所成問題的是以如此的一條尾巴，事實上，在飛機後僅可保留數呎之距離。同時另一有重要意義的現象是對引擎廢氣區之電擊，該區在理論上是電離氣體之主要來源，然而如和對機鼻、翼尖和尾部之電擊比較，却又微不足道矣！

總之，閃電打擊飛機之統計數字，可解釋並指明——或至少暗示——飛機可感應電擊，雖去一般所能接受的實際尚遠。同時亦有資料可佐證此種觀念之正確性，而以曾發生過不少次很接近，但並非真的對飛行中飛機之打擊報告為依據。

雷雨閃電研究權威方面所最常抱持之意見，認為飛機飛近雷雨將被電擊，僅當其碰巧在近處通過適逢閃電發生之天然打擊路徑上。

如果飛行人員有必需穿雲或進入其隣近之苦衷，則彼需期望在該臨界區之雷雨期內，將合格為閃電所打擊之對象。而該臨界區可能被嚴格限制為真正的雷雨隣近，或位結冰高度之上。

簡述之，我們對雷雨閃電所應持之態度為：如不遠離雷雨臨界區，即需以不驚不懼之態度，儘可能做到將電擊所造成之損害減至最小程度。