

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI
CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA DELL'ATMOSFERA E METEOROLOGIA

**IDENTIFICAZIONE E LOCALIZZAZIONE DEI FULMINI
TRAMITE SISTEMI AUTOMATICI**

Candidato:
Davide Magurno

Relatore:
Prof. Vincenzo Levizzani

Sessione III
Anno Accademico 2010 - 2011

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	I FULMINI.....	2
2.1	Classificazione dei fulmini	2
2.2	Frequenza e distribuzione	3
2.3	Il circuito elettrico globale.....	5
2.4	Elettificazione di un temporale	5
2.5	La formazione del fulmine.....	7
3	IL RILEVAMENTO DEI FULMINI	9
3.1	Il radar meteorologico.....	10
3.2	Variazioni del campo elettrostatico	10
3.3	Il tuono	11
3.4	Radiazione visibile	11
3.5	Onde radio.....	12
3.5.1	Time Of Arrival	14
3.5.2	Direction Finding	15
3.5.2.1	Magnetic Direction Finding	15
3.5.2.2	Interferometria.....	16
4	LE APPLICAZIONI DEI DATI DI FULMINAZIONE	18
4.1	I fulmini e le scienze atmosferiche	18
4.1.1	I fulmini e la pioggia	18
4.1.2	I fulmini e la grandine.....	19
4.1.3	I fulmini e gli eventi estremi.....	19
4.1.4	Evoluzione del temporale.....	19
4.1.5	Chimica atmosferica	20
4.1.6	Cambiamenti climatici.....	20
4.2	I fulmini e le attività umane	21
4.2.1	Assistenza al volo	21
4.2.2	Attività produttive	22
4.2.3	Depositi di esplosivi.....	22
4.2.4	Incendi.....	22
4.2.5	Attività ricreative.....	22
4.2.6	Assicurazioni.....	23

5	CARATTERISTICHE DEI LLS	24
5.1	Detection Efficiency.....	24
5.2	False Alarm Rate.....	24
5.3	Location Accuracy	25
5.4	Caratteristiche della scarica	25
5.5	Tempo di elaborazione	25
6	LE RETI AL SUOLO	27
6.1	SIRF	28
6.2	LAMPINET	28
6.3	LINET	28
6.4	XDDE.....	29
6.5	ATDNET	29
6.6	ZEUS	29
6.7	EUCLID.....	30
6.8	WWLLN.....	30
6.9	ENTLN	31
6.10	Il futuro delle reti al suolo	31
7	I SISTEMI SATELLITARI	33
7.1	OTD.....	34
7.2	LIS	35
7.3	FORTE	36
7.4	Il futuro dei sistemi satellitari.....	38
7.4.1	V-GLASS	38
7.4.2	GLIMS	39
7.4.3	I satelliti geostazionari.....	39
7.4.3.1	LI	40
7.4.3.2	GLM	41
8	RETI AL SUOLO E SISTEMI SATELLITARI A CONFRONTO	42
9	CONCLUSIONI	44
10	ACRONIMI	45
11	BIBLIOGRAFIA	47

1 INTRODUZIONE

I fulmini sono fenomeni atmosferici molto comuni ma per via della rapidità con cui si manifestano sono sempre stati complessi da studiare e da comprendere. Inoltre a causa della violenza con cui si abbattono su cose e persone sono sempre stati temuti dall'uomo che in essi vedeva l'azione degli dei, a cui venivano associati in molte civiltà. Solo dalla metà del '700 si è riconosciuta la natura elettrica dei fulmini e da allora si è cominciato a studiarne le proprietà fisiche, utilizzando strumentazioni sempre più efficienti.

Studiando le caratteristiche delle scariche atmosferiche si è evidenziata pian piano l'esistenza di una correlazione tra i fulmini e la struttura interna del temporale che li genera e con tutta una serie di altri fenomeni che si verificano in concomitanza con essi all'interno del temporale stesso, dalla semplice precipitazione ai più violenti tornado.

Con la continua estensione delle aree abitate è divenuto inoltre sempre più importante non solo conoscere i fulmini dal punto di vista scientifico ma anche avere modo di monitorarli in maniera costante al fine di proteggersi dai rischi che ne derivano, sia quelli dovuti alla scarica stessa che quelli dovuti agli effetti secondari della scarica, in particolare gli incendi.

Per poter effettuare questo tipo di monitoraggio sono state sviluppate negli ultimi decenni moltissime reti in grado di localizzare i fulmini anche a grandi distanze sfruttando le emissioni di radiazione da parte del canale di scarica, sia nel visibile che nelle onde radio. Dalla metà degli anni '90 sono disponibili anche strumentazioni di tipo satellitare in grado di svolgere questo compito su quasi tutta la superficie terrestre in maniera omogenea e nei prossimi anni si avrà un ulteriore passo in avanti grazie all'introduzione di sensori in orbita geostazionaria.

2 I FULMINI

Con il termine fulmine si indica generalmente una intensa scarica elettrica prodotta da un temporale, anche se si possono generare fulmini anche all'interno di tempeste di sabbia, bufere di neve o nubi di ceneri vulcaniche, ma sono molto meno comuni e meno studiati. Esistono anche altri fenomeni elettrici associati ad un temporale, i cosiddetti Transient Luminous Events (TLE), i quali consistono in scariche elettriche che si sviluppano al di sopra dei temporali, fino anche a cento chilometri di altezza, e comprendono sprites, elves e blue jets. Infine, assai meno chiara e oggetto di studi molto in fase iniziale è la correlazione tra i temporali e i Transient Gamma Flashes (TGF). Tutti questi fenomeni sono stati osservati solamente a partire dagli anni '90 e sono ancora poco conosciuti.

Il nostro interesse si limiterà ai fulmini nel senso tradizionale del termine, che si sviluppano principalmente all'interno e al di sotto dei temporali.

2.1 Classificazione dei fulmini

Si usa comunemente classificare i fulmini in una serie di categorie:

- i fulmini nube-suolo (Cloud-to-Ground, CG) si sviluppano tra una nube temporalesca e il terreno sottostante;
- i fulmini intra-nube (Intra-Cloud, IC) si generano tra centri di carica opposta che si trovano all'interno della stessa nube;
- i fulmini nube-nube (Cloud-to-Cloud, CC) si generano tra centri di carica opposta che si trovano all'interno di due nubi limitrofe;
- i fulmini nube-aria (Cloud-to-Air, CA) si scaricano da una nube nell'aria circostante.

Per brevità, ci si riferisce spesso ai fulmini IC, CC e CA con l'unica categoria degli IC, in modo da ottenere due sole categorie distinte di fulmini, quelli che raggiungono il suolo (CG) e quelli che non lo raggiungono (IC).

È possibile distinguere i fulmini anche in base al segno della carica elettrica che trasportano: si ottiene così una separazione tra fulmini positivi e negativi.

Un'ultima classificazione, che si utilizza solo per la categoria dei fulmini CG, distingue in fulmini discendenti ed ascendenti, a seconda che la scarica si propaghi dalla nube verso il terreno o viceversa; in genere i fulmini ascendenti si verificano solamente in corrispondenza di strutture elevate come torri e grattacieli mentre i fulmini discendenti possono svilupparsi su qualsiasi tipo di terreno e sono perciò molto più comuni.

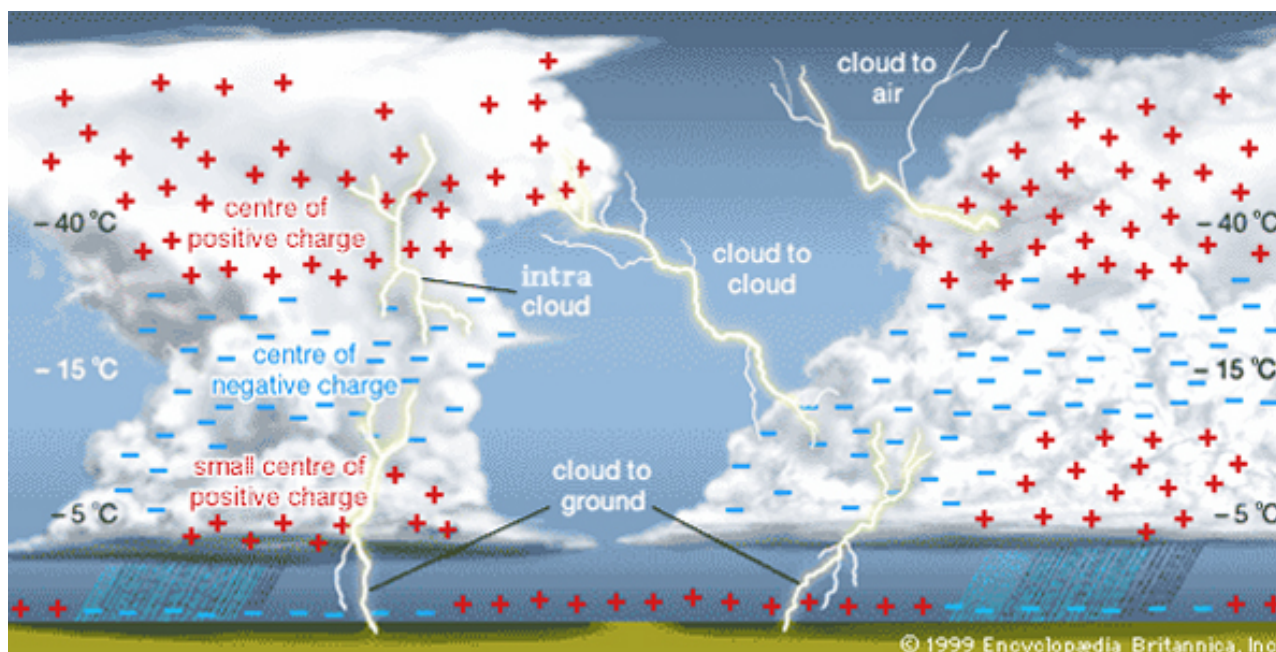


Figura 2.1 Classificazione dei fulmini, in base alla posizione della scarica, nelle categorie CG, IC, CC e CA

2.2 Frequenza e distribuzione

Le informazioni disponibili sulla densità dei fulmini a livello globale sono tuttora incomplete ma le stime più accreditate indicano che sulla Terra siano in corso in ogni momento circa 2000 temporali, i quali generano una quantità di scariche superiore ai 100 fulmini al secondo (Brooks, 1925), forse anche 200–300 al secondo; di tutti questi fulmini il 70–80% risulta appartenere alla categoria IC mentre solo il restante 20–30% è del tipo CG (Chauzy et al., 2005), anche se studi realizzati su singoli temporali evidenziano un'alta variabilità nei rapporti tra le due tipologie a seconda delle diverse condizioni locali (Boccippio et al., 2000, 2001). Tra i CG circa il 90% è rappresentato da fulmini che trasportano carica negativa mentre solo il 10% trasporta carica positiva (Poelman, 2010), anche in questo caso con percentuali variabili a seconda del singolo temporale analizzato.

Poiché i fulmini sono collegati ai temporali, i quali a loro volta si sviluppano in presenza di convezione, la distribuzione dei fulmini sulla superficie del pianeta è determinata dalla convezione: si ha così che la maggior parte dei fulmini si verifica nella fascia latitudinale compresa tra i due tropici (InterTropical Convergence Zone, ITCZ), in prevalenza sulle masse continentali e con una concentrazione maggiore durante la stagione estiva (Nesbitt et al., 2000).

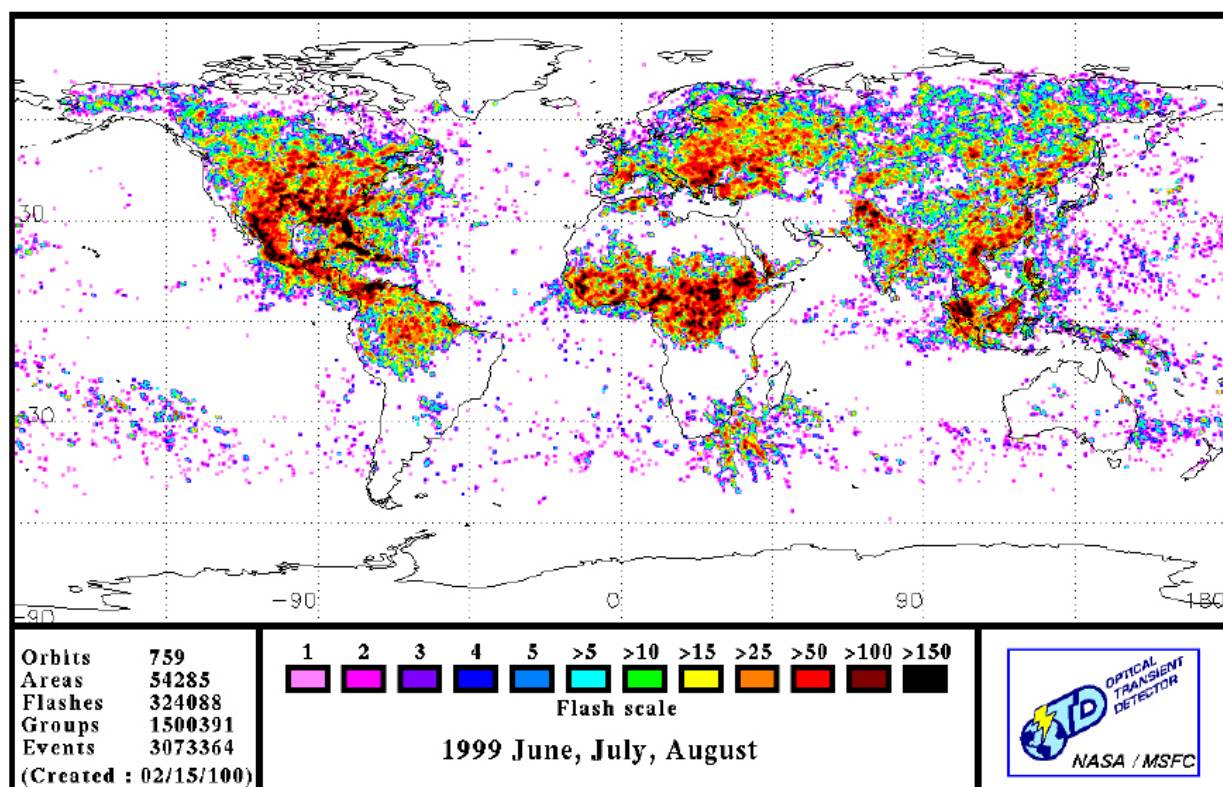
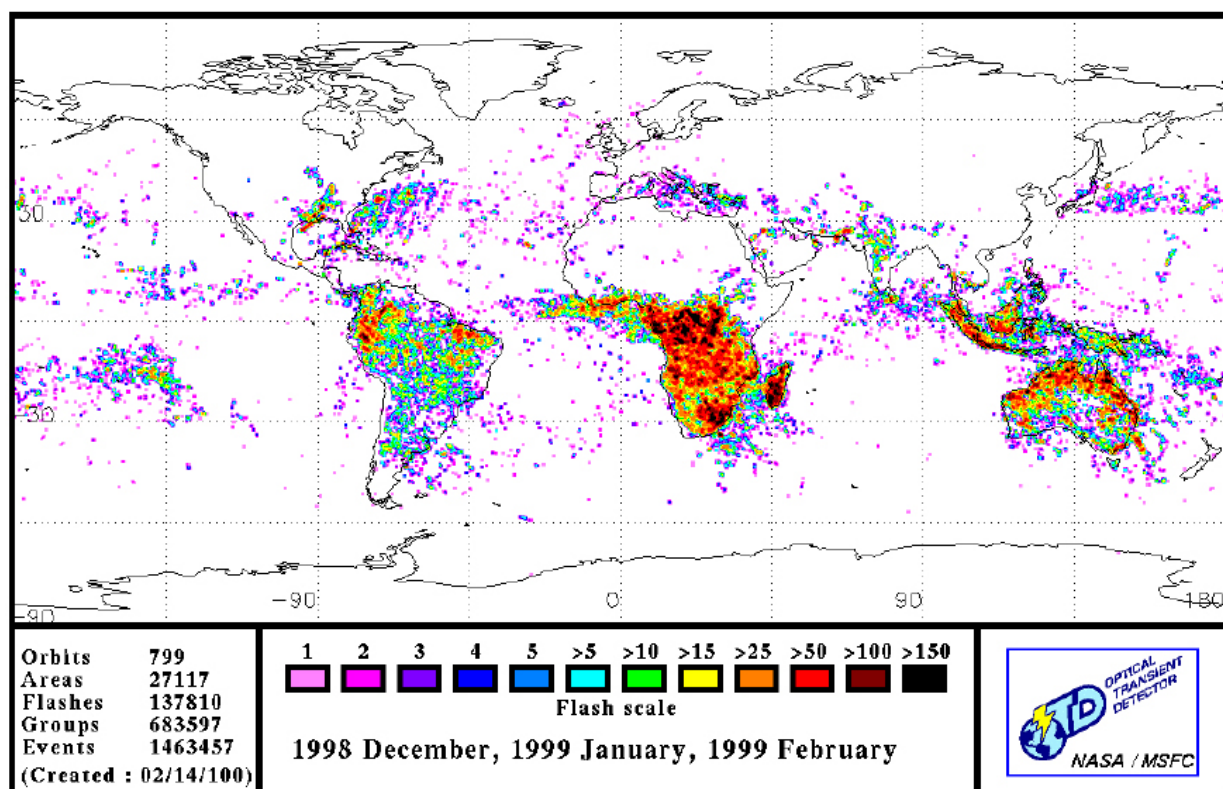


Figura 2.2 Distribuzione della fulminazione osservata dal sensore satellitare OTD durante i mesi di Dicembre, Gennaio, Febbraio (in alto) e Giugno, Luglio, Agosto (in basso) nel 1999.
La scala colorata indica la densità di fulminazione come fulmini km^{-2}

2.3 Il circuito elettrico globale

In condizioni di cielo sereno la superficie terrestre risulta dotata mediamente di una carica negativa $\sigma = -1.1 \times 10^{-9} \text{ C m}^{-2}$, la quale genera un campo elettrico diretto verso la superficie stessa di intensità variabile a seconda delle condizioni locali, ma generalmente compreso attorno ai 120 V m^{-1} , che si riduce rapidamente man mano che si sale di quota. A livello della ionosfera si ha invece la produzione di coppie di ioni di segno opposto per opera del vento solare; gli ioni positivi così formati si muovono nel campo elettrico verso la superficie, con velocità che si riducono man mano che la densità dell'aria aumenta, generando una corrente di bel tempo di circa 1500 A diretta verso la superficie. Tale corrente di bel tempo annullerebbe il campo superficiale in circa 10 minuti se non fossero presenti efficaci meccanismi di ricarica che trasportano nuova carica negativa verso la superficie e carica positiva verso l'atmosfera. Questi meccanismi di ricarica sono i temporali e, più precisamente, i fulmini CG (Levizzani, 2010).

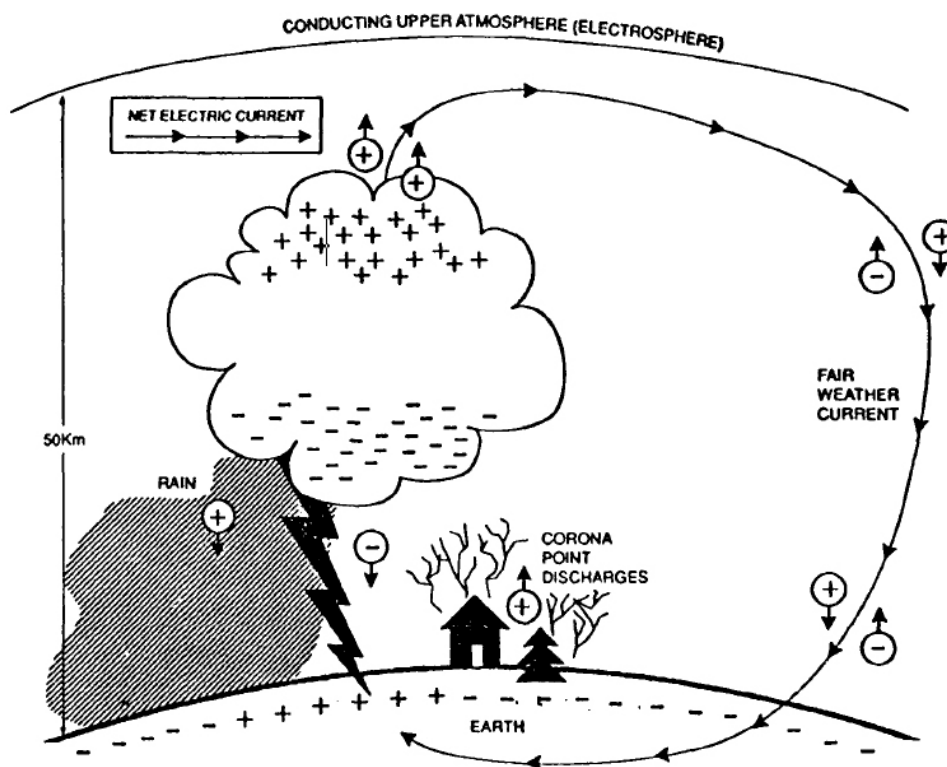


Figura 2.3 Struttura del circuito elettrico globale: la corrente di bel tempo (a destra) viene bilanciata dalla presenza dei fulmini (a sinistra)

2.4 Elettrificazione di un temporale

Il temporale agisce come un enorme generatore, separando cariche al suo interno e creando così intensi campi elettrostatici. La nube temporalesca presenta tipicamente, ma non sempre, una struttura tripolare in cui troviamo una parte alta caricata positivamente, un nocciolo di carica negativa e una piccola porzione di carica positiva nella sezione inferiore della nube.

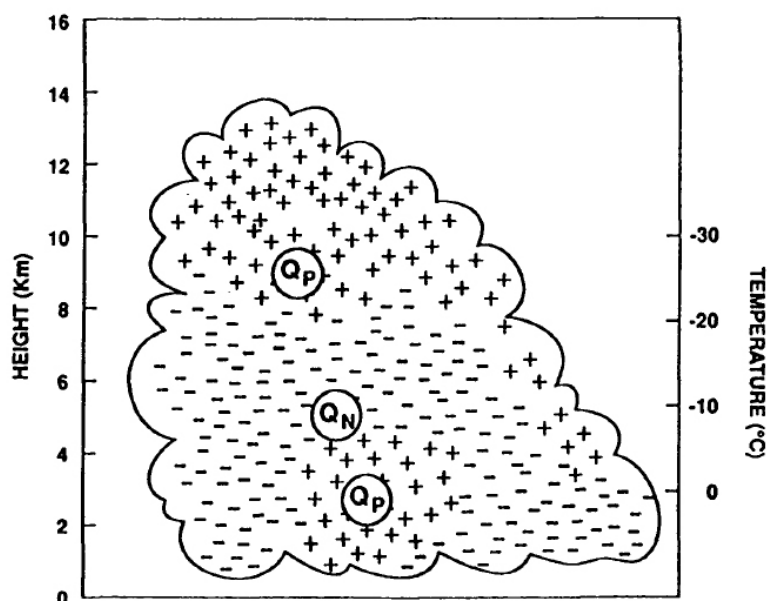


Figura 2.4 Struttura tripolare di un temporale, in cui si distinguono i centri di carica positiva alle due estremità della nube e il nucleo centrale di carica negativa

Sono stati individuati molti processi che possono portare alla separazione delle cariche all'interno di una nube temporalesca, ma molti di essi non sono in grado di spiegare completamente la grossa quantità di carica presente, la sua separazione e, in generale, la struttura elettrica del temporale. Si ritiene che la causa principale dell'elettrificazione sia il processo non induttivo che coinvolge la collisione di graupel con cristalli di ghiaccio in presenza di acqua sopraffusa. Le graupel tendono a formarsi nella zona della nube con una temperatura attorno ai -15°C per collezione e successivo ghiacciamento di goccioline d'acqua sopraffuse e qui rimangono sospese grazie ai forti updraft presenti nelle fasi di crescita del temporale mentre i cristalli di ghiaccio, più leggeri, vengono trascinati dall'updraft verso l'alto, collidendo con le graupel; durante queste collisioni si ha il trasferimento di cariche tra i due tipi di particelle, con carica negativa che si trasferisce alle graupel e carica positiva che passa ai cristalli di ghiaccio. Il trascinamento dei cristalli verso la parte alta del temporale fa sì che si accumulino cariche positive al top della nube, mentre nella parte sottostante rimangono le cariche negative delle graupel. La presenza del centro di carica positiva alla base della nube non è invece completamente chiara ma sembra dovuta in parte all'attrazione esercitata dal centro di carica negativa sulle cariche positive presenti al suolo, che tendono quindi ad accumularsi nella parte inferiore della nube (Krehbiel, 1986), in parte alla precipitazione delle graupel che al di sopra di una certa temperatura tendono ad acquistare carica positiva anziché negativa.

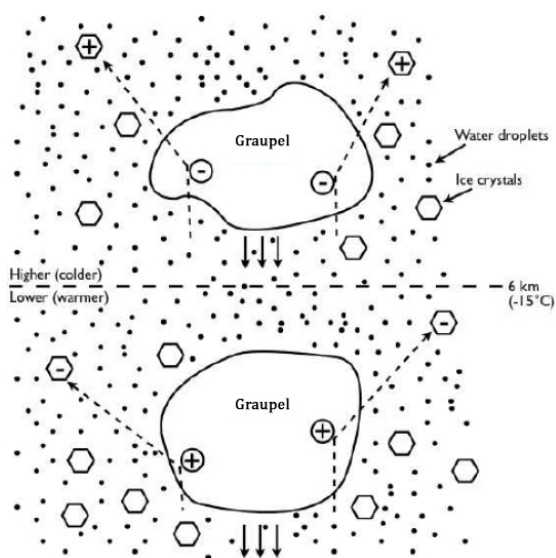


Figura 2.5 Caricamento non induttivo delle particelle ghiacciate all'interno di una nube temporalesca

2.5 La formazione del fulmine

Man mano che le cariche vengono separate e accumulate sulle idrometeore all'interno del temporale cresce l'intensità del campo elettrico associato, molto più intenso del campo elettrico superficiale di bel tempo: quando viene raggiunto un livello di soglia pari a circa $3 \cdot 10^5 \text{ V m}^{-1}$ si verifica la rottura del dielettrico (in questo caso l'aria), le cariche sono libere di muoversi e generano la scarica. Poiché le maggiori differenze di potenziale si riscontrano tra i centri di carica posti all'interno del temporale stesso, la maggior parte dei fulmini è del tipo IC, mentre circa un quarto della totalità dei fulmini si sviluppa tra la nube e il suolo.

Per descrivere i processi che caratterizzano lo sviluppo di un fulmine facciamo ora riferimento ad un fulmine CG negativo discendente, cioè al più comune dei fulmini CG. La scarica comincia, una volta raggiunte le necessarie condizioni, con una certa quantità di carica negativa che si muove dalla nube verso il suolo, su cui si concentra la carica positiva, in una fase detta stepped leader. Il termine stepped (da step = gradino) sta a indicare il fatto che questo flusso di carica non è continuo ma avviene a tratti, sviluppandosi lungo il percorso che presenta una minore resistenza al passaggio di corrente e dando origine a diramazioni e rami secondari durante l'avvicinamento al centro di carica opposta. Ognuno di questi gradini è lungo alcune decine di metri e si sviluppa tipicamente in $1 \mu\text{s}$, con una pausa tra l'uno e l'altro di circa $50 \mu\text{s}$ e una corrente media di 1 kA . Lo sviluppo completo dalla fase di stepped leader dura alcune decine di millisecondi, sviluppandosi con una velocità di propagazione media di $2 \times 10^5 \text{ m s}^{-1}$, e deposita lungo il suo percorso tra i 10 e i 30 C di carica (Zemke, 1992; Poelman, 2010). All'avvicinarsi dello stepped leader alla superficie, uno stepped leader positivo può staccarsi dal suolo in corrispondenza di punte, quali alberi, antenne o pali del telefono, e congiungersi con il leader discendente a poche decine di metri dal suolo.

Quando lo stepped leader entra in contatto con la superficie o con lo stepped leader ascendente si genera una scarica di ritorno positiva molto più rapida e intensa rispetto alla fase precedente, che si propaga lungo il canale ionizzato creato nella fase leader e annulla la carica che vi era stata depositata. Questa scarica si propaga ad una velocità pari ad un terzo della velocità della luce per diversi chilometri, può trasportare fino a 100 kA di corrente e riscalda il canale di propagazione fino a $3 \times 10^4 \text{ K}$. Mentre la fase di stepped leader rimane non visibile, nella scarica di ritorno si generano il lampo luminoso e il tuono; il primo è dovuto alla radiazione emessa in seguito alla ionizzazione e dissociazione termica dei componenti atmosferici a seguito del passaggio di corrente, mentre il secondo è dovuto alla rapida espansione termica dell'aria nel canale ionizzato.

Nell'80–85% dei casi ad una prima scarica ne seguono altre in rapida successione (Rakov and Uman, 2003) costituite da una fase leader detta dart leader, che si propaga senza salti sfruttando il canale aperto dalla prima scarica con una corrente di circa 1 kA , seguita dalla relativa scarica di ritorno di circa $10\text{--}15 \text{ kA}$. Il lampo luminoso risulta così costituito anche da una decina di scariche ad intervalli di $50\text{--}100 \text{ ms}$ che conferiscono al fenomeno l'effetto tremolante che spesso si nota e che può durare circa un secondo.

Tra una scarica e la successiva si ha inoltre un breve passaggio continuato di corrente che perdura per alcuni millisecondi e può trasportare correnti comprese tra qualche centinaio e poche migliaia di Ampere.

Complessivamente si ha quindi un passaggio di carica negativa dalla nube al suolo e un passaggio di carica di segno opposto dal terreno alla nube.

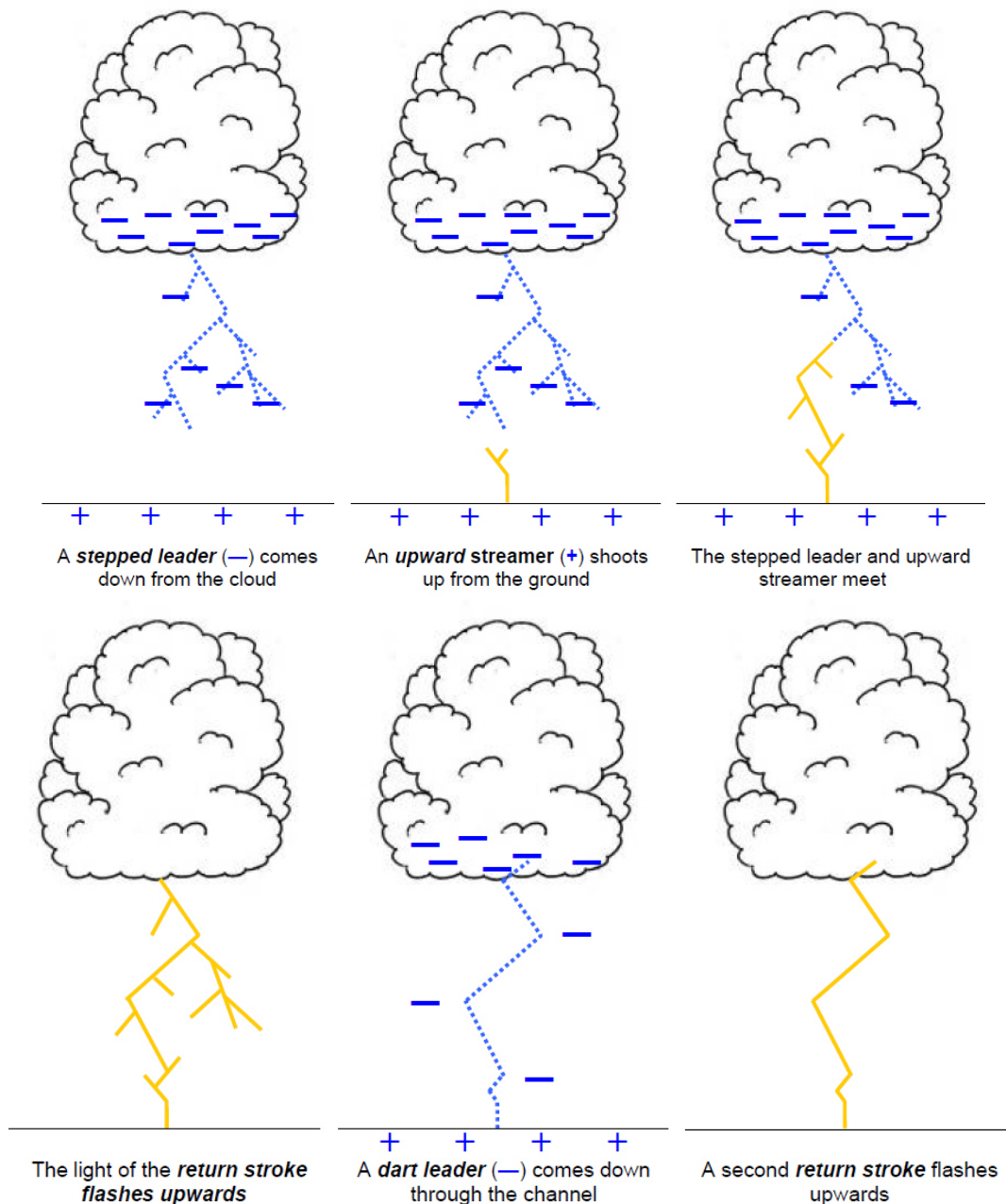


Figura 2.6 Rappresentazione schematica delle varie fasi di sviluppo di un fulmine CG discendente negativo

Per le altre categorie di fulmini il processo è sostanzialmente lo stesso, ma cambiano i segni delle cariche e le correnti in gioco: i fulmini CG positivi sono infatti in grado di trasportare verso il suolo oltre 100 C di carica con correnti che raggiungono anche i 300 kA, quindi sono circa tre volte più intensi dei fulmini negativi, anche se più rari, mentre i fulmini IC risultano molto meno intensi dei CG ma anche molto più numerosi.

3 IL RILEVAMENTO DEI FULMINI

Tutti i sistemi di localizzazione dei fulmini (Lightning Location System, LLS) devono essere in grado di svolgere essenzialmente due funzioni: riconoscere un fulmine come tale e localizzarlo il più precisamente possibile nello spazio. Per quanto riguarda le reti di monitoraggio poste al suolo, la prima funzione viene realizzata da ogni singolo sensore in grado di captare i segnali emessi dalla scarica, mentre la seconda funzione viene svolta dalla rete nel suo complesso, la cui efficienza dipende dalla tecnica che viene utilizzata, dal numero di sensori disponibili e dalla distanza tra i sensori. Invece i sistemi satellitari utilizzano in genere un solo sensore, il cui funzionamento determina sia l'identificazione che la localizzazione del fulmine.

La localizzazione precisa dei fulmini può risultare complicata a causa delle dimensioni che caratterizzano il fenomeno. Mentre un fulmine CG può essere localizzato nel punto di impatto con una precisione di poche centinaia di metri, il suo sviluppo verticale è più difficile da definire; allo stesso modo un fulmine IC può raggiungere estensioni orizzontali di oltre 100 km (Krehbiel et al., 1999) e collegarsi più volte al suolo a distanze di alcune decine di chilometri in una fase ibrida IC-CG (Chauzy et al., 2005). Con queste estensioni risulta quindi difficoltoso definire il fulmine come un evento ben localizzato nello spazio e solo pochi LLS sono dotati di una tecnologia tridimensionale in grado di ricostruire l'intero sviluppo del canale di scarica; la maggior parte effettua una localizzazione bidimensionale che rende arduo riconoscere come un evento unico un

fulmine così esteso. Inoltre non tutti i LLS sono in grado di distinguere un fulmine IC da un fulmine CG, il che significa che la localizzazione risulta essere una semplice informazione latitudine-longitudine, ma non sappiamo se il fulmine ha colpito terra o meno.

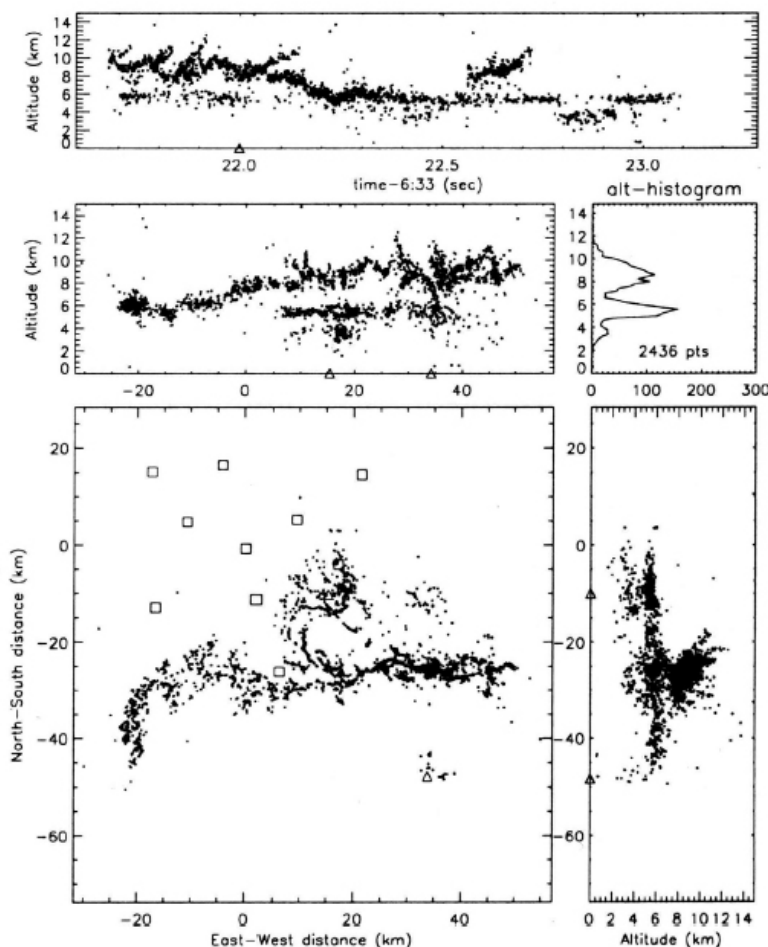


Figura 3.1 Un esempio di fulmine ibrido IC-CG mappato con una tecnologia 3D utilizzando le VHF: il fulmine si è esteso per oltre 60 km connettendosi due volte con il suolo durante gli 1.5 s del suo sviluppo. Il pannello in alto indica lo sviluppo temporale in funzione della quota, il pannello in basso a sinistra è la proiezione sul piano orizzontale mentre i due pannelli alla sua destra e sopra di esso sono le proiezioni sui piani verticali. L'ultimo riquadro rappresenta la densità di sorgenti di VHF in funzione della quota. (da Krehbiel et al., 1999)

Esistono diverse tecniche utilizzate per localizzare i fulmini, basate sulle caratteristiche delle varie fasi di sviluppo del fulmine.

3.1 Il radar meteorologico

Sfruttando i radar meteorologici comunemente utilizzati per l'individuazione della precipitazione è possibile riconoscere anche il verificarsi di un fulmine; il canale ionizzato generato dal passaggio di corrente scattera infatti il segnale del radar allo stesso modo delle idrometeore, consentendo di tracciare il percorso seguito dalla scarica. Questo sistema è poco utilizzato poiché la presenza di precipitazione intensa può schermare completamente il fulmine impedendone il riconoscimento. Inoltre questo sistema consente l'individuazione dei fulmini che si verificano esattamente nel raggio d'azione del fascio radar escludendo tutti quelli circostanti, e ciò fornisce una copertura che risulta spesso inadeguata per scopi pratici.

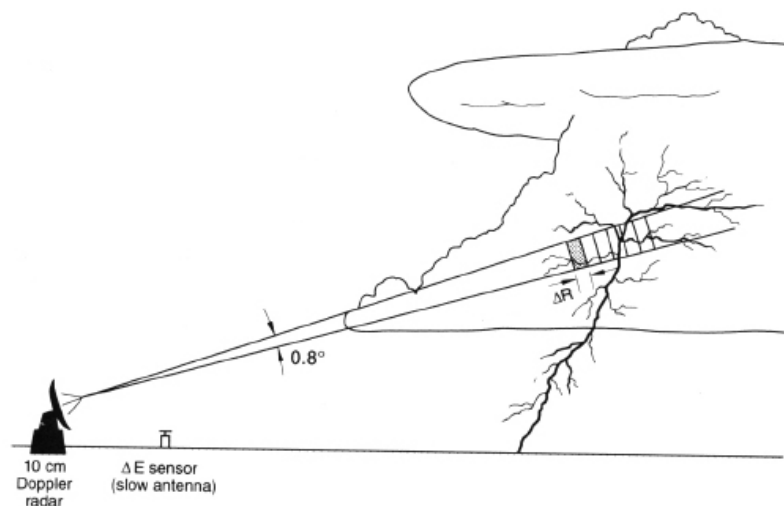


Figura 3.2 Utilizzo di un radar meteorologico per l'individuazione dei fulmini

3.2 Variazioni del campo elettrostatico

Tramite appositi sensori è possibile misurare le variazioni del campo elettrostatico associato ad una nube temporalesca. La separazione delle cariche durante la fase di crescita del temporale è un processo relativamente lento, perciò avremo una lenta variazione del campo elettrostatico. Nel momento in cui si genera il fulmine si ha una rapida neutralizzazione di parte delle cariche precedentemente separate ed una rapida variazione del campo. Analizzando le variazioni registrate da più sensori è possibile determinare esattamente il punto di scarica applicando le necessarie equazioni. Questo sistema permette anche di stimare la quantità di carica neutralizzata dal fulmine, quindi la corrente trasportata, e consente di distinguere tra fulmini positivi e negativi. La limitazione di questo metodo sta nel fatto che necessita di una rete molto fitta di sensori, poiché le variazioni del campo elettrostatico possono essere rilevate con buona qualità solo entro 10 km dalla scarica, rendendo spesso questo sistema impossibile da realizzare su aree molto vaste.

3.3 Il tuono

La localizzazione dei fulmini attraverso la registrazione del tuono veniva utilizzata negli anni '70 ma è attualmente in disuso. L'onda acustica emessa dalla rapida espansione termica del canale di fulminazione durante il passaggio della scarica di ritorno veniva ricevuta da una serie di microfoni e la localizzazione veniva realizzata confrontando i tempi di arrivo dell'onda ai diversi sensori, utilizzando una tecnica detta Time Of Arrival (vedi paragrafo 3.5.1). Anche in questo caso, come per il campo elettrostatico, era necessaria una rete di microfoni molto fitta, difficilmente realizzabile su vasta scala.

3.4 Radiazione visibile

Durante la scarica di ritorno di un fulmine i componenti atmosferici subiscono dissociazione termica e ionizzazione ed emettono radiazione elettromagnetica nelle lunghezze d'onda del visibile e del vicino infrarosso: sfruttando questa proprietà si possono utilizzare sensori ottici per localizzare il fulmine. In particolare i sistemi attualmente in uso misurano la radiazione emessa dall'ossigeno alla lunghezza d'onda di 777.4 nm quando viene riscaldato a temperature superiori ai 2×10^4 K: se la radiazione misurata supera un certo valore di soglia, superiore alla radiazione di fondo che è sempre presente, tale emissione viene riconosciuta come causata da un fulmine. Questo sistema viene utilizzato soprattutto su piattaforme satellitari ed è raro in reti al suolo. La limitazione di questo metodo sta nel fatto che lo scattering subito dalla radiazione all'interno della nube temporalesca fa sì che un'ampia porzione della nube venga illuminata da una singola scarica, impedendo la localizzazione del fulmine con una risoluzione migliore di 5–10 km.

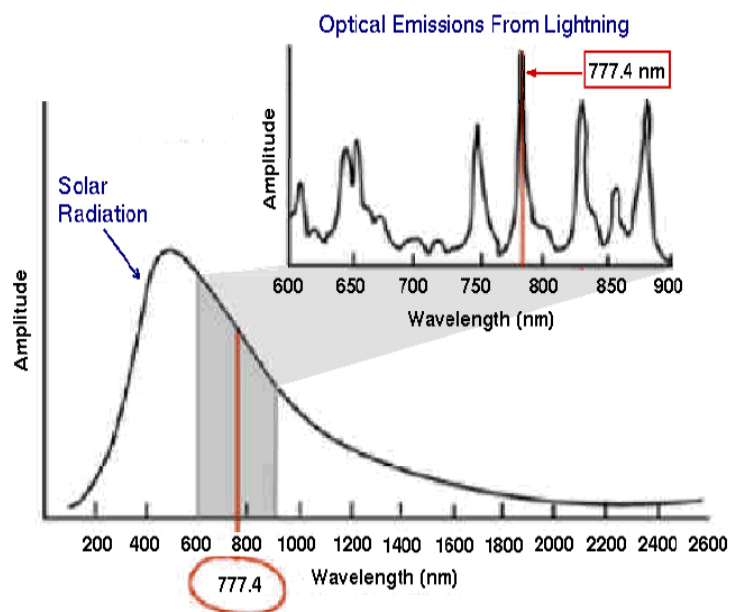


Figura 3.3 Spettro della radiazione emessa da un fulmine nel visibile e nel vicino infrarosso, a confronto con la Planckiana della radiazione solare

3.5 Onde radio

La tecnica più utilizzata per individuare le scariche elettriche atmosferiche sfrutta le onde radio emesse durante le varie fasi di sviluppo del fulmine. Ogni singola scarica emette un'ampia gamma di frequenze, da pochi Hz a diverse centinaia di MHz, ma per la localizzazione si utilizzano principalmente tre bande:

- VHF (Very High Frequency) 30–300 MHz
- LF (Low Frequency) 30–300 kHz
- VLF (Very Low Frequency) 3–30 kHz

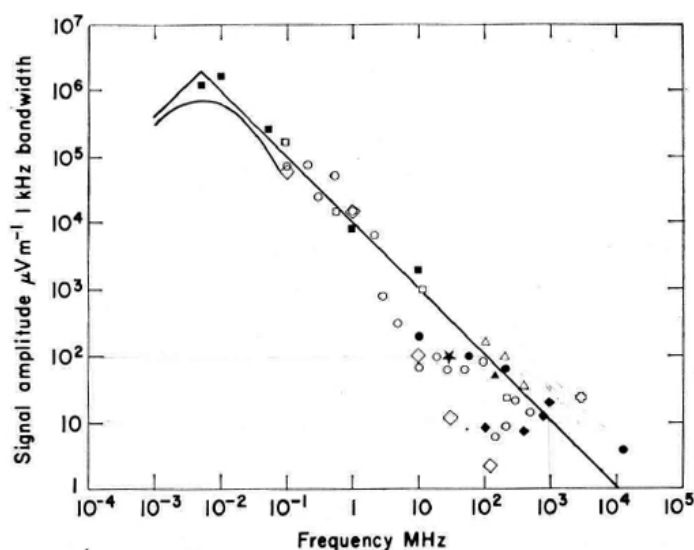


Figura 3.4 Spettro del campo elettromagnetico generato da un campione di fulmini, misurato nelle frequenze radio a 10 km di distanza (da Oetzel and Pierce, 1969)

Mentre i fulmini IC emettono principalmente in VHF, i fulmini CG producono onde radio VHF durante la fase leader ed emettono principalmente in LF e VLF durante la scarica di ritorno.

Poiché i singoli gradini dello stepped leader emettono ciascuno un impulso in VHF distinguibile dagli altri, è possibile, utilizzando appositi sensori per la localizzazione in tre dimensioni, ricostruire l'intero sviluppo del canale di scarica; al contrario, utilizzando le LF e VLF non è possibile determinarne lo sviluppo completo poiché i sensori rilevano solamente la fase più intensa, costituita dalla fase iniziale della scarica di ritorno vicino al suolo, quindi identificano semplicemente il punto di impatto.

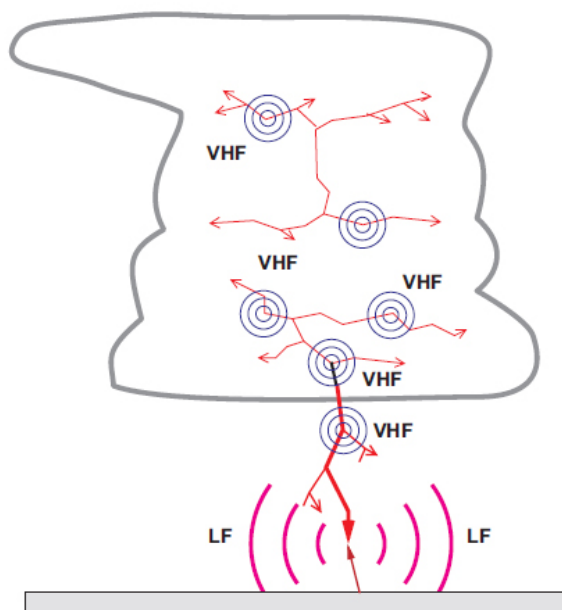


Figura 3.5 L'emissione di onde radio ha il suo massimo a frequenze variabili a seconda del tipo di fulmine e della fase di sviluppo

Analizzando i segnali emessi nelle diverse frequenze è quindi possibile distinguere tra le due categorie di fulmini. Dall'analisi delle caratteristiche dell'onda attraverso uno studio delle componenti di Fourier è possibile distinguere l'onda prodotta da un fulmine da quella prodotta da un altro fulmine o da un'altra sorgente in base a criteri di ampiezza e forma del segnale, evitando quindi confusioni dovute al sovrapporsi di onde differenti o alla semplice presenza di rumore di fondo (trasmissioni radio-televisive, ripetitori per i telefoni cellulari, linee elettriche, ecc), permettendo di riconoscere il segnale dovuto allo stesso fulmine registrato da sensori differenti.

Poiché le onde VHF si propagano sostanzialmente in linea retta, la curvatura terrestre rende impossibile osservare un fulmine tramite queste onde, attraverso rilevatori al suolo, a distanze superiori a poche centinaia di chilometri. Inoltre le onde ad alta frequenza subiscono una rapida attenuazione durante la propagazione in atmosfera. Al contrario le VLF subiscono una riflessione verso il suolo ad opera della ionosfera che dà origine alla formazione di un canale superficie-ionosfera in cui si ha riflessione multipla e trasporto delle onde a bassa frequenza a grandi distanze: questo, unito ad una ridotta attenuazione del segnale, consente la localizzazione di fulmini caduti ad oltre 1000 km di distanza. Esistono tuttavia alcune differenze nell'efficacia di tale propagazione tra il giorno e la notte dovute alle variazioni dell'attività solare che si riflettono sulle caratteristiche della ionosfera: queste variazioni consentono una migliore propagazione durante la notte, con il segnale radio che arriva più lontano e con una deformazione minore.

La localizzazione dei fulmini tramite onde radio può essere applicata sia da stazioni al suolo sia da sistemi satellitari, ma in quest'ultimo caso la sua efficacia è limitata alle VHF per via della presenza della ionosfera che non consente un'adeguata trasmissione delle LF/VLF.

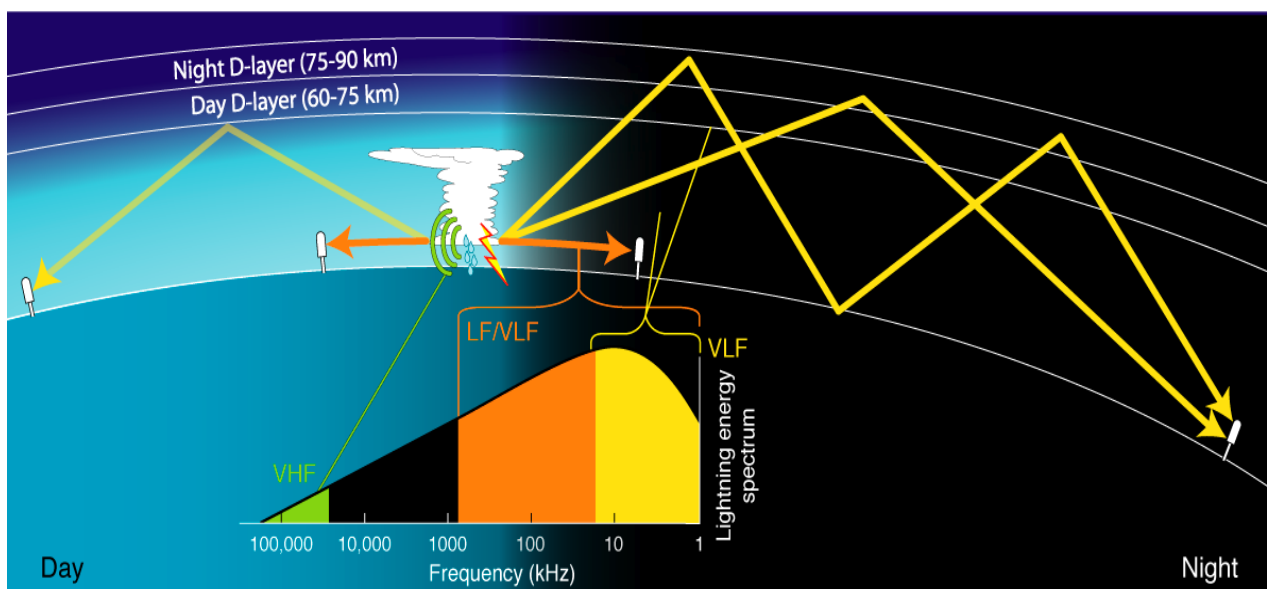


Figura 3.6 Propagazione delle onde radio in atmosfera. Le VHF (verdi) vengono rilevate solo a breve distanza, le LF(arancioni) si trasmettono a distanze superiori e le VLF (gialle) subiscono la riflessione ionosferica raggiungendo distanze elevate, in maniera differente tra il giorno (sinistra) e la notte (destra)

Una volta riconosciuto il segnale radio dovuto ad un fulmine si possono utilizzare due diversi principi per determinare il punto esatto in cui questo si è verificato: il Time Of Arrival (TOA) e il Direction Finding (DF).

3.5.1 Time Of Arrival

Con questa tecnica ogni sensore appartenente alla rete registra il passaggio dell'onda radio indicando l'istante esatto a cui si è registrato il picco dell'emissione. La prima stazione che riceve il segnale è presa come riferimento e le viene assegnato il tempo zero; si confrontano quindi i ritardi con cui altre stazioni ricevono il segnale rispetto alla stazione di riferimento. In base ai tempi indicati da ogni coppia di sensori è possibile definire una serie di punti (in genere un'iperbole) in cui può essersi sviluppato il fulmine. Incrociando i dati ricavati da almeno 4 sensori è possibile localizzare il fulmine senza ambiguità. L'accuratezza con cui questo sistema è in grado di operare dipende in larga parte dalla precisione con cui vengono sincronizzati gli orologi dei singoli sensori; la massima accuratezza possibile viene oggi realizzata utilizzando il sistema di sincronizzazione GPS (Global Positioning System) che consente una precisione di 100 ns.

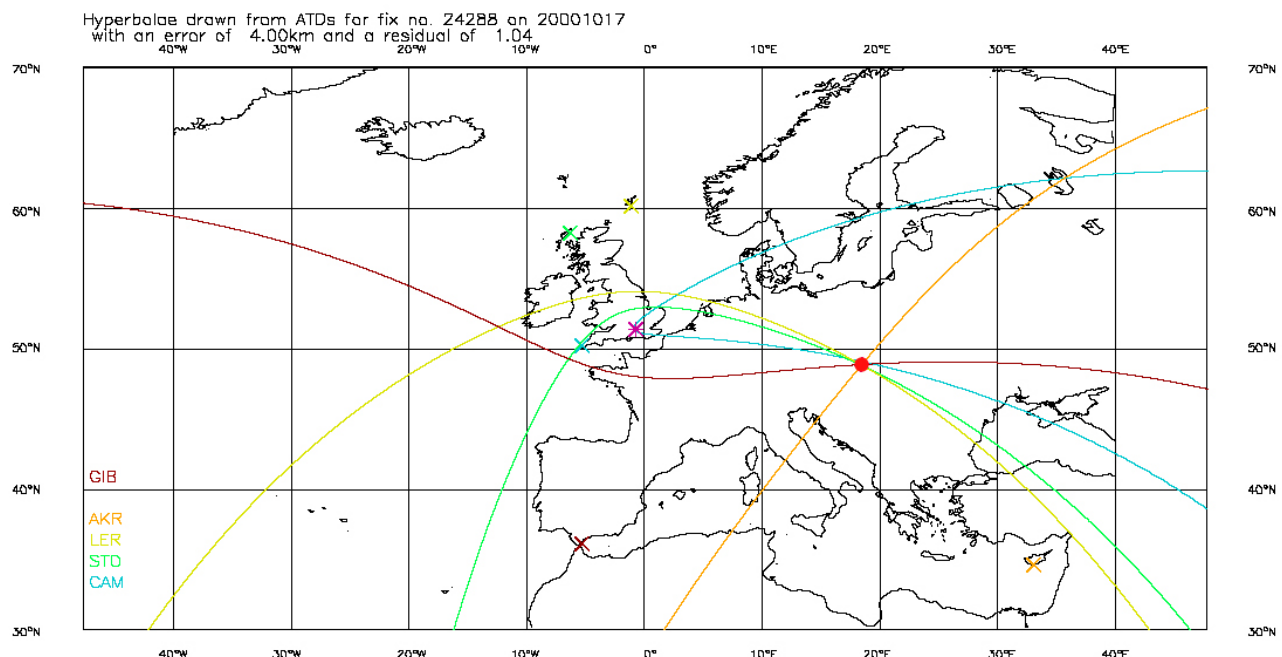


Figura 3.7 Metodo TOA applicato a 6 stazioni della rete ATDNET. La croce rosa è la stazione presa come riferimento, il confronto con le altre stazioni permette di determinare le iperboli di pari colore. Il punto rosso all'incrocio delle curve rappresenta il punto di impatto

3.5.2 Direction Finding

Utilizzando particolari tecniche è possibile determinare la direzione di provenienza del segnale radio rispetto alla singola stazione. Incrociando le informazioni ottenute da almeno due sensori (ma generalmente se ne utilizzano da tre in su) si può determinare il punto esatto dell'evento per un sistema di localizzazione bidimensionale, mentre per un sistema tridimensionale è necessario un minimo di 3 sensori. La maggior parte delle reti al suolo utilizza la tecnica detta Magnetic Direction Finding (MDF) alle basse frequenze mentre un numero ridotto di reti sfruttano la tecnica dell'interferometria nelle alte frequenze. Sulle piattaforme satellitari vengono invece utilizzate la semplice direzione di puntamento dell'antenna oppure l'interferometria per stabilire le provenienze del segnale radio.

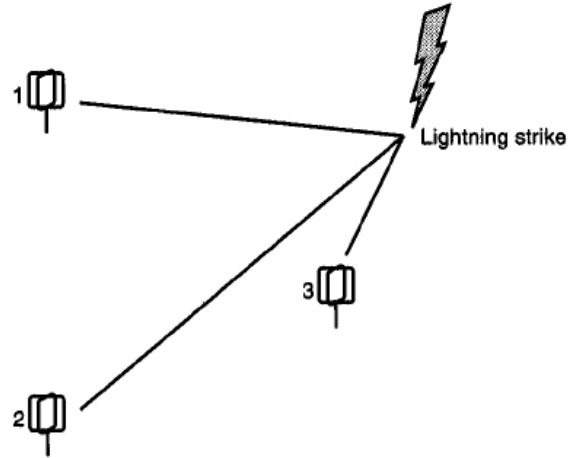


Figura 3.8 Metodo DF: ogni sensore determina la direzione di provenienza dell'onda radio e la scarica viene localizzata incrociando le traiettorie

3.5.2.1 Magnetic Direction Finding

Questa tecnica si basa sulla misurazione dell'intensità del campo magnetico associato all'onda radio durante il passaggio su una coppia di antenne a forma d'anello, le quali vengono poste ortogonalmente l'una all'altra con un orientamento N-S e E-O. Poiché l'intensità del segnale elettrico indotto dal passaggio del campo magnetico dipende dall'angolo formato dal piano dell'anello e dalla direzione di propagazione dell'onda (è massima quando sono paralleli e nulla quando sono ortogonali) è possibile determinare la direzione di propagazione in base ai valori registrati dai due anelli, secondo l'equazione:

$$\frac{\text{Intensità del segnale nell'anello E - O}}{\text{Intensità del segnale nell'anello N - S}} = \tan \theta$$

dove θ è l'angolo tra il piano dell'anello N-S e la direzione dell'onda.

Incrociando i dati di almeno due sensori (tre per una migliore precisione) si può quindi ottenere la localizzazione del fenomeno in esame.



Figura 3.9 I due anelli conduttori di un sensore che utilizza la tecnica MDF

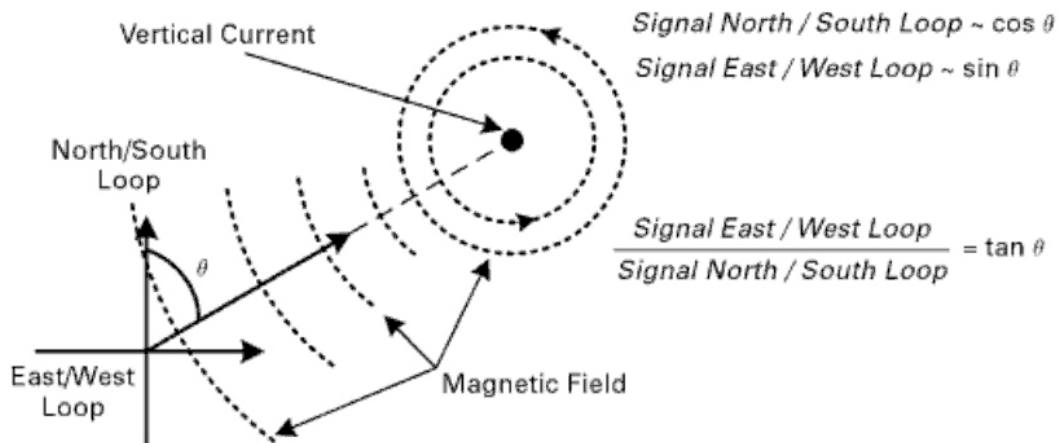


Figura 3.10 Visto dall'alto, il campo magnetico generato da un fulmine (il grosso punto in alto al centro) viene captato dai due anelli di un sensore MDF (in basso a sinistra): la corrente indotta varia in funzione dell'angolo θ e consente di determinare la direzione di provenienza dell'onda

3.5.2.2 Interferometria

Questa tecnica permette di calcolare la direzione di provenienza dell'onda misurando la differenza di fase del segnale radio ricevuto da due antenne dipolari. La differenza di fase è data dall'equazione:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{c} f \cdot D \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi$$

dove f è la frequenza del segnale, D la distanza tra le antenne e θ e φ gli angoli rappresentati in Figura 3.11.

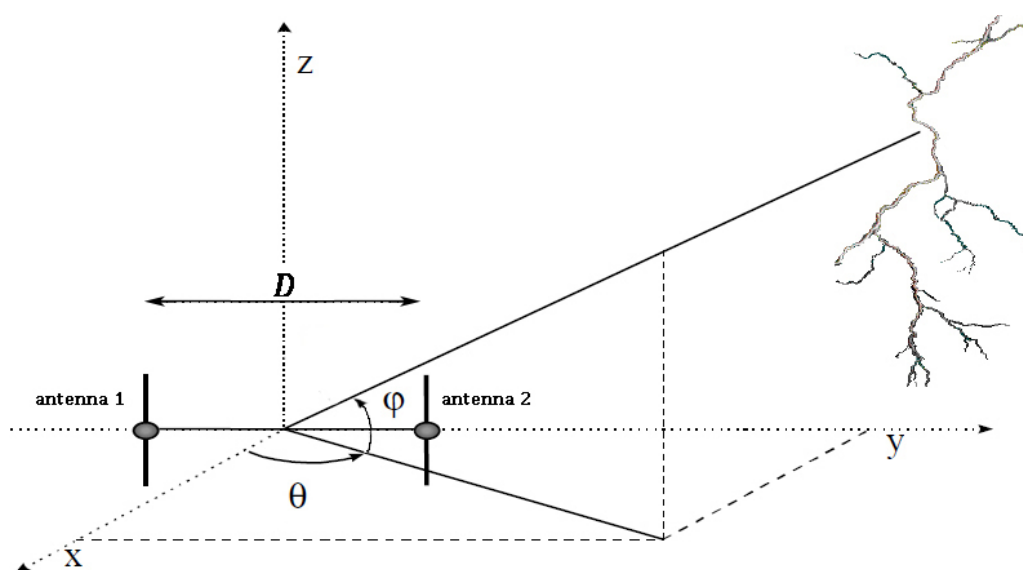


Figura 3.11 Struttura di un sistema per la localizzazione dei fulmini tramite interferometria



Figura 3.12 Le cinque antenne che costituiscono il sensore per l'utilizzo della tecnica interferometrica

Come per la tecnica MDF, utilizzando due coppie di antenne, poste ortogonalmente l'una rispetto all'altra, e facendo il rapporto tra le differenze di fase si ricava l'angolo θ ; invertendo poi l'equazione si ottiene anche l'angolo φ , riuscendo quindi a individuare l'esatta direzione di provenienza del segnale. Normalmente, per evitare ambiguità, ogni stazione utilizza un array di cinque antenne, confrontando i valori di ogni singola coppia. Di nuovo, combinando i dati di più stazioni si può stabilire il punto di origine della scarica.

Molti sensori utilizzano una combinazione di tecniche differenti per migliorare la qualità e la precisione dei dati forniti affiancando i due metodi TOA e DF; questo tipo di sensori vengono definiti sensori di tipo IMPACT (Improved Accuracy from Combined Technology) o, più di recente, IMPACT-ESP (Enhanced Sensitivity and Performance).

4 LE APPLICAZIONI DEI DATI DI FULMINAZIONE

L'interesse per i fenomeni di fulminazione ha molteplici motivazioni. Innanzitutto vi è sempre stata una componente puramente conoscitiva, dovuta al fatto che qualunque fenomeno naturale che non si è in grado di comprendere in maniera soddisfacente attira la nostra curiosità. Vi sono poi una serie di applicazioni pratiche dei dati di fulminazione, i quali possono essere utilizzati sia in ambito meteo-climatico sia in relazione a molte delle attività umane.

4.1 I fulmini e le scienze atmosferiche

Le discipline che si occupano dello studio dell'atmosfera hanno un notevole interesse a comprendere la relazione tra i fulmini ed altri fenomeni che si presentano in concomitanza con essi all'interno dei temporali oppure nel determinare le conseguenze delle numerose scariche elettriche atmosferiche sulle caratteristiche dell'atmosfera stessa.

4.1.1 I fulmini e la pioggia

Diversi studi, pubblicati a partire dagli anni '60, hanno messo in evidenza l'esistenza di una correlazione positiva tra il numero di fulmini prodotti da un temporale e l'intensità della precipitazione (Battan, 1965; Kinzer, 1974; Holle et al., 1994; Sist et al., 2010). In particolare pare che la precipitazione aumenti di intensità con l'aumentare della frazione di fulmini CG positivi (Soula and Chauzy, 2001); tuttavia l'alta variabilità delle caratteristiche dei diversi temporali rende praticamente impossibile definire una costante di correlazione tra i due fenomeni. Altri studi mostrano inoltre una correlazione temporale tra il picco dell'attività elettrica ed il massimo di

intensità della precipitazione, con il secondo che segue il primo di alcuni minuti (Piepgrass et al., 1982).

In base a tali correlazioni, la registrazione da parte di un LLS di un elevato numero di scariche può essere una buona indicazione di precipitazione intensa a breve termine, permettendo così di diramare avvisi di allerta in tempo reale nelle zone a rischio.

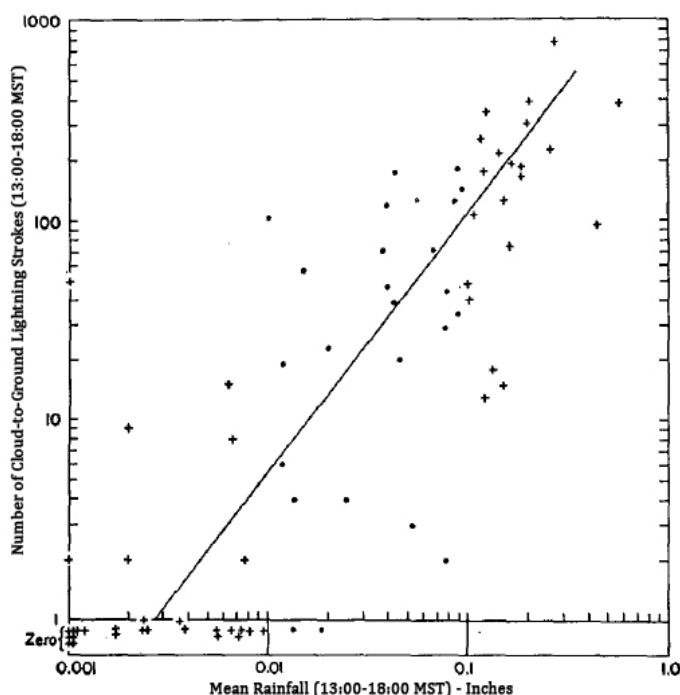


Figura 4.1 Una serie di misure effettuate nella stessa zona in giorni diversi, cumulate nello stesso arco di 5 ore, evidenziano l'esistenza di una correlazione positiva tra la quantità di precipitazione e il numero di fulmini CG (da Battan, 1965)

4.1.2 I fulmini e la grandine

Come per la pioggia, alcuni studi mostrano una forte correlazione tra il numero di fulmini CG positivi e la presenza di grandine (Rust et al., 1985; Reap and McGorman, 1989). Nei temporali che portano alla formazione di grandine di grosse dimensioni il rapporto tra IC e CG è molto più alto rispetto ai temporali che producono principalmente pioggia, ma si registra una frazione molto elevata di CG positivi, che può superare il 74% dei CG complessivi (Carey and Rutledge, 1998). In particolare, il numero di CG positivi registra un forte aumento alcuni minuti prima dell'inizio della precipitazione e raggiunge il suo picco con l'inizio della grandinata, andando poi ad esaurirsi circa 10 minuti dopo la fine della precipitazione (Williams et al., 1999).

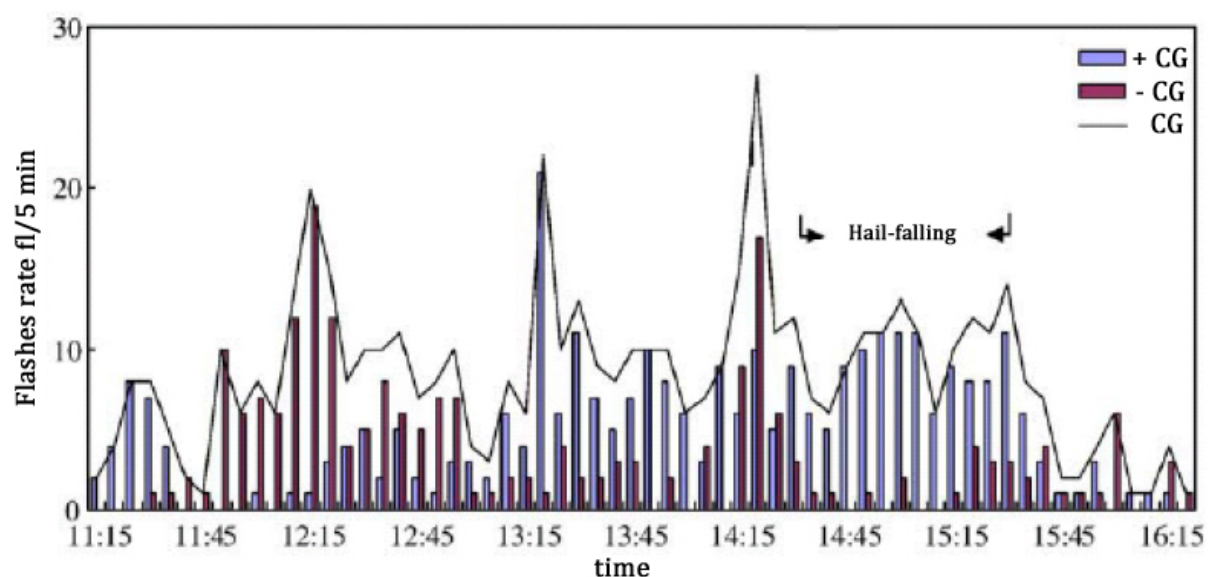


Figura 4.2 Evoluzione dei fulmini CG durante un temporale che ha prodotto grandine. Durante la grandinata si osserva la presenza quasi esclusiva di CG positivi, con il picco di fulminazione e il suo declino rispettivamente pochi minuti prima e dopo la comparsa di grandine (da Poelman, 2010)

4.1.3 I fulmini e gli eventi estremi

Alcune correlazioni sono state individuate tra l'evoluzione temporale dell'attività dei fulmini ed eventi meteorologici estremi collegati ai temporali come tornado (Buechler et al., 2000), wind gust e microburst (Laroche et al., 1991), flash flood (Petersen et al., 1999).

4.1.4 Evoluzione del temporale

Poiché la separazione delle cariche all'interno di un temporale in quantità sufficienti a produrre fulmini necessita della presenza di forti updraft, la localizzazione dei fulmini ci permette di individuare quali sono le parti più attive del temporale e di riconoscere se quest'ultimo è in fase di crescita (updraft intenso, intensa separazione delle cariche, formazione dei fulmini) o di dissipazione (updraft ridotto, poca separazione di cariche, fulmini in esaurimento), fornendo uno

strumento per il monitoraggio dei temporali che si aggiunge ai radar meteorologici e alle osservazioni satellitari.

4.1.5 Chimica atmosferica

I fulmini giocano un ruolo importante anche nella chimica atmosferica, in quanto contribuiscono alla formazione di NO_x (Wild, 2007). Il forte riscaldamento del canale di propagazione del fulmine in seguito al passaggio della scarica provoca la dissociazione termica di N_2 e O_2 che reagiscono per formare NO e, successivamente ad una ulteriore ossidazione, NO_2 . Più è lungo il canale di scarica del fulmine maggiore sarà la quantità di NO_x prodotti. Le stime attuali indicano una produzione di NO_x da parte dei fulmini compresa tra 2 e 20 Tg anno⁻¹, pari al 10% circa della produzione complessiva (Dooling, 2007). Questi gas contribuiscono alla formazione di ozono troposferico che è un gas fortemente ossidante ed è nocivo per gli organismi viventi, se accumulato in quantità relativamente elevate; inoltre è un gas serra e contribuisce al riscaldamento globale.

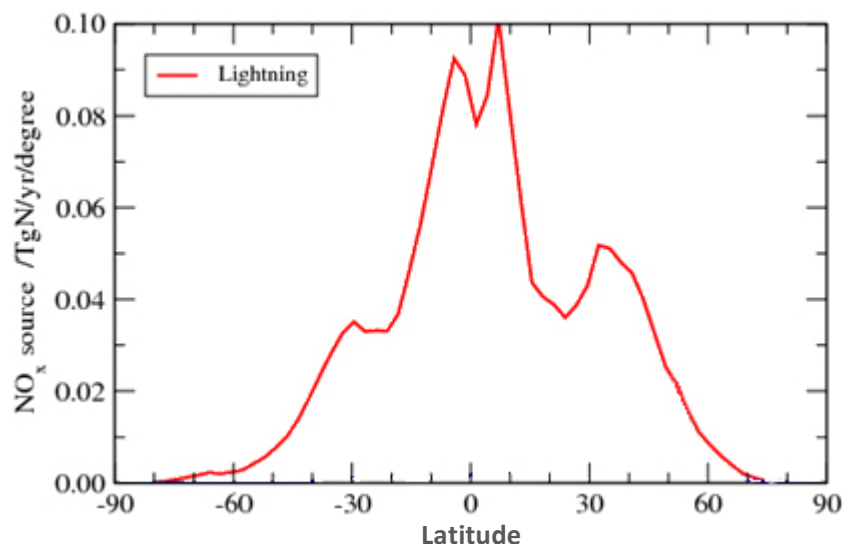


Figura 4.3 Produzione annuale stimata di NO_x da parte dei fulmini in funzione della latitudine. La massima produzione coincide con il massimo dell'attività temporalesca nella ITCZ (da Wild, 2007)

4.1.6 Cambiamenti climatici

La densità globale di fulmini è legata in parte anche ai cambiamenti climatici. Un aumento della temperatura media superficiale del pianeta provoca un aumento dell'evaporazione, quindi una maggiore quantità di vapore acqueo disponibile in atmosfera, e una maggiore possibilità di convezione intensa. Questi due fattori sono la chiave per la formazione di nubi temporalesche e quindi di fulmini. Alcuni studi associano un aumento della temperatura di 1 °C con un aumento dell'attività dei fulmini del 5–6% (Price and Rind, 1994). Altri risultati riportano un aumento dell'attività dei fulmini sulle aree continentali pari a circa il 50% per un aumento della temperatura di bulbo bagnato (che tiene conto quindi anche del contenuto di vapore acqueo) pari a 1 °C (Reeve

and Toumi, 1999). Inoltre un aumento della temperatura, seguito da un aumento dell'attività elettrica, porta ad un incremento della produzione di NO_x e ozono troposferico da parte dei fulmini (vedi il paragrafo precedente) quindi aumenta anche l'affetto serra dando origine ad un meccanismo di feedback positivo. Risulta quindi evidente che l'interesse per questi fenomeni andrà a crescere nel prossimo futuro a causa del previsto riscaldamento del sistema terra.

4.2 I fulmini e le attività umane

Al di là delle pure implicazioni meteorologiche, i fulmini possono costituire un pericolo per molte attività umane: in particolare i fulmini CG sono in grado di arrecare danni più o meno gravi a cose e persone e rappresentano un rischio che deve essere monitorato in maniera costante.

4.2.1 Assistenza al volo

Il monitoraggio costante dei fenomeni temporaleschi può essere ricavato indirettamente osservando l'attività dei fulmini. Questo monitoraggio è fondamentale per la sicurezza dei numerosi aeromobili che viaggiano continuamente attorno al globo, in particolar modo durante le fasi di decollo ed atterraggio, sia per il rischio dovuto ai fulmini sia per i possibili problemi derivanti dalla presenza di forti raffiche di vento, precipitazione intensa, grandine di grosse dimensioni e altri fenomeni correlati ai temporali. L'aviazione, sia civile che militare, risulta pertanto uno dei maggiori fruitori dei dati per il nowcasting ricavati dai vari LLS, tanto che alcuni grandi aeroporti sono dotati di propri strumenti di osservazione dislocati nell'area circostante le piste, in modo da poter modificare in tempo utile le rotte degli aeromobili in caso di necessità.

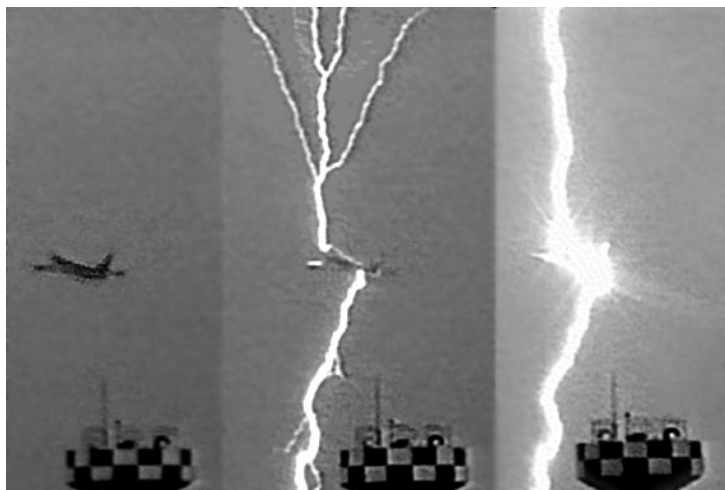


Figura 4.4 Un aeroplano colpito da un fulmine durante il decollo dall'aeroporto di Osaka nel 2007

Simili precauzioni sono utilizzate anche dagli enti aerospaziali al fine di evitare incidenti come quelli accaduti a due missioni della National Aeronautics and Space Administration (NASA) in cui le navicelle furono colpite da un fulmine durante la fase di lancio: la missione Apollo12 del 1969 (fortunatamente senza gravi conseguenze, solo qualche sistema secondario andato fuori uso) e il

razzo Atlas/Centaur-67 nel 1987 (il sistema di guida venne danneggiato dalla scarica e il razzo esplose in volo).

4.2.2 Attività produttive

I dati forniti per il nowcasting sull'attività elettrica in atmosfera possono essere utilizzati dagli impianti di produzione e distribuzione dell'energia per mettere in atto procedure di sicurezza mirate a limitare i danni alle strutture ed evitare le interruzioni nella fornitura di energia, per esempio mobilitando le squadre di pronto intervento ed organizzando possibili forniture energetiche alternative. Vi sono poi numerose altre categorie di industrie che possono essere interessate dal fenomeno, oppure i cantieri edili, particolarmente esposti a causa della presenza di gru, ponteggi e altre strutture metalliche.

4.2.3 Depositi di esplosivi

I depositi di esplosivi, che siano depositi militari, fabbriche di armamenti o anche solo fabbriche e magazzini di fuochi d'artificio, sono seriamente minacciati dalla presenza dei fulmini, come è accaduto ad esempio all'arsenale statunitense di Picatinny nel 1926 (14 morti) o al deposito di munizioni russo a Buryatia nel 2001 (17 morti). Per questo tipo di strutture è importante conoscere in tempo reale il rischio di caduta di fulmini in modo da poter prendere provvedimenti di messa in sicurezza dei materiali pericolosi e del personale addetto.

4.2.4 Incendi

I fulmini sono la principale causa naturale di incendi che possono portare alla distruzione di vaste aree boschive, specialmente nella stagione estiva quando i fulmini sono più numerosi e la vegetazione è relativamente secca. In particolare la fase del fulmine che risulta più pericolosa in questo senso è il passaggio continuato della corrente che segue ogni singola scarica di ritorno. Il monitoraggio da parte dei LLS permette di emettere allerte in tempo utile ai vigili del fuoco e alla protezione civile in modo da poter intervenire tempestivamente in caso di necessità e limitare sia la perdita boschiva sia i pericoli per le aree urbane limitrofe.

4.2.5 Attività ricreative

Come molti altri settori, anche gli eventi ricreativi sono esposti al rischio generato dai fulmini e dagli eventi meteorologici ad essi correlati (vento forte, pioggia, grandine). Il rischio va dal singolo individuo alle grandi manifestazioni, dai concerti (basti ricordare l'Heineken Jammin Festival di Mestre nel 2007) ai parchi divertimenti ed ai campi da golf.

4.2.6 Assicurazioni

Il settore delle assicurazioni non è interessato ai dati di fulminazione per il nowcasting, ma ai dati d'archivio; risulta infatti che circa il 9% di tutte le richieste d'assicurazione riguarda danni da parte di fulmini (Kithil, 1999). Le compagnie devono quindi essere in grado di verificare la veridicità dell'evento per poter effettuare un rimborso oppure negarlo e necessitano a questo scopo delle informazioni di localizzazione più precise possibili.

5 CARATTERISTICHE DEI LLS

Per ogni strumento ed ogni rete che costituisce un LLS, che si trovi al suolo o montato su un satellite, vengono definiti una serie di parametri che ne identificano l'affidabilità, la precisione e le possibilità d'impiego.

5.1 Detection Efficiency

L'efficienza di rilevamento (Detection Efficiency, DE) è un parametro che viene espresso in percentuale e rappresenta la frazione di fulmini che il LLS in questione è in grado di individuare rispetto al numero reale di eventi.

Poiché ogni LLS ha un certo valore di soglia che viene utilizzato per discriminare tra il segnale generato da un fulmine e il rumore dovuto all'ambiente circostante, alcuni fulmini al di sotto di tale soglia non possono essere riconosciuti come tali.

Anche la conformazione del territorio, specialmente in zone montuose, può impedire la ricezione di alcuni segnali o la distorsione di altri che quindi non vengono riconosciuti come causati da un fulmine.

Inoltre la DE cala all'aumentare della distanza del fulmine dai sensori, scendendo da un valore superiore al 90% al centro di molti LLS, in cui ogni evento viene rilevato da un alto numero di sensori ravvicinati, ad un valore inferiore al 50% a poche centinaia di chilometri al di fuori della rete, dove la scarica viene rilevata soltanto da pochi sensori lontani dalla sorgente.

Un ulteriore fattore che influisce sull'efficienza di un LLS è il tempo che impiega il sistema per registrare un segnale; durante la fase di registrazione e immagazzinamento dei dati il sensore rimane sostanzialmente inattivo e non è quindi in grado di registrare ulteriori scariche. Poiché si stima che sul pianeta cadano oltre 100 fulmini al secondo, si capisce come sia di fondamentale importanza ridurre il più possibile questi tempi morti.

5.2 False Alarm Rate

L'indice False Alarm Rate (FAR) è in qualche modo complementare alla DE e rappresenta la frazione di segnali di varia natura che vengono interpretati erroneamente come fulmini. Solitamente si applicano criteri di forma e ampiezza del segnale per ridurre al minimo questo tipo di errori, mantenendo il FAR, indicato anch'esso in percentuale, su valori inferiori al 5–10%.

5.3 Location Accuracy

La precisione con cui si riesce a localizzare un evento di fulminazione nello spazio (Location Accuracy, LA) può variare tra le poche centinaia di metri e le decine di chilometri a seconda delle caratteristiche del LLS in esame, sia a livello del singolo sensore sia a livello di struttura della rete nel suo complesso. Il livello di precisione disponibile caratterizza in maniera determinante le possibilità di utilizzo dei dati, in quanto ci sono settori in cui è fondamentale avere la massima precisione possibile (per esempio il settore assicurativo) ed altri in cui è sufficiente identificare in linea di massima l'area interessata dal fenomeno (per esempio la climatologia).

I sensori ottici impiegati nella localizzazione da satellite hanno in genere una risoluzione compresa tra i 5 e i 10 km poiché queste sono le dimensioni tipiche delle porzioni di nube illuminate dai fulmini a causa dello scattering che si verifica al loro interno.

I sistemi che sfruttano la localizzazione tramite onde radio hanno invece una risoluzione che può raggiungere anche i 100 m nell'individuare il punto d'impatto di un fulmine CG.

Poiché la maggior parte delle reti non ha una copertura globale ma è limitata ad un'area circoscritta, la loro LA cambia se ci si riferisce all'area interna, coperta da più sensori, o alle zone limitrofe da cui è ancora possibile ricevere dei segnali. In particolare, nelle reti che utilizzano le VLF per la localizzazione a grandi distanze si possono avere errori di decine di chilometri per eventi che si verificano a migliaia di chilometri di distanza. Ovviamente, in generale, più una rete è fitta più alta sarà la sua LA, anche grazie al fatto che ogni evento viene identificato da un alto numero di sensori.

5.4 Caratteristiche della scarica

Oltre a definire la posizione in cui si è verificato il fulmine, molti LLS sono in grado di fornire una serie di informazioni aggiuntive che si basano sull'analisi del segnale ricevuto; è possibile così distinguere innanzitutto tra le categorie CG e IC, riconoscere se il fulmine è positivo o negativo, determinare la corrente trasportata dalla scarica e contare il numero di scariche successive che costituiscono il fulmine completo. Ovviamente non tutti i LLS sono in grado di fornire queste informazioni oppure ne possono fornire solo alcune. Allo stesso tempo alcuni utenti finali dei dati non richiedono esplicitamente tali informazioni, ritenute non necessarie per i propri scopi.

5.5 Tempo di elaborazione

I dati che vengono raccolti dai LLS devono ovviamente essere elaborati per poter fornire le informazioni richieste. Il tempo che ogni rete impiega per registrare i dati, trasferirli ad un elaboratore centrale, elaborarli e renderli disponibili per gli utenti determina il tipo d'uso che se ne può fare. Molti utenti finali dei dati di fulminazione necessitano di informazioni in tempo reale

sulle attività temporalesche, ad esempio gli aeroporti, i centri meteorologici o le protezioni civili, ed è quindi importante rendere disponibili tali informazioni nell'arco di pochi minuti; in altri ambiti invece le informazioni possono essere elaborate anche nell'arco di ore e giorni o addirittura è necessario che vengano cumulate per lunghi periodi, ad esempio in ambito climatologico qualora si volesse determinare la distribuzione dei fulmini sulla superficie del pianeta.

6 LE RETI AL SUOLO

A partire dagli anni '60-'70 sono comparse le prime reti costruite appositamente per il monitoraggio degli eventi di fulminazione. Col passare del tempo le tecnologie sono migliorate, sono cambiate le tecniche di osservazione e le reti si sono ampliate e diffuse nel mondo.

Attualmente molti paesi dispongono di una propria rete per il monitoraggio dei fulmini, la cui estensione è solitamente limitata ai confini nazionali o alle aree immediatamente circostanti. Esistono tuttavia collaborazioni internazionali nate con lo scopo di unificare le singole informazioni nazionali in una più ampia rete di dimensioni continentali, come ad esempio l'European Cooperation for Lightning Detection (EUCLID) che riunisce 24 paesi europei o la North American Lightning Detection Network (NALDN) a cui collaborano Canada e USA. A queste reti piuttosto



Figura 6.1 Il segnale prodotto da un fulmine viene ricevuto da diversi sensori e la localizzazione avviene confrontandone i dati

ampie si aggiungono reti più piccole, su scala locale, gestite ad esempio dai grandi aeroporti. Ci sono inoltre reti più o meno ampie create da università e gruppi di ricerca, che possono essere installate in forma stabile o per periodi brevi durante singole campagne di misura.

Poiché la maggior parte degli utenti finali dei dati di fulminazione è interessato soprattutto ai fulmini CG (più pericolosi per le attività umane) la maggior parte delle reti oggi esistenti registra i segnali in LF/VLF. In particolare il sistema di localizzazione più utilizzato si basa su una tecnica ibrida MDF e TOA (IMPACT) che

garantisce risultati migliori rispetto all'utilizzo di una sola delle due. Risulta comunque importante registrare anche il passaggio delle onde VHF poiché si osserva che in molti temporali i fulmini IC (che emettono principalmente in VHF) precedono la comparsa dei fulmini CG e dei fenomeni meteorologici più intensi (tornado, wind gust, microburst), con tempi che vanno da pochi secondi ad alcune decine di minuti (Chauzy et al., 2005), permettendo quindi l'emissione delle allerte con un preavviso appropriato.

Il maggior fornitore mondiale di questo tipo di strumentazione è la società finlandese Vaisala.

Le più importanti limitazioni di questi sistemi sono dovute all'impossibilità di coprire in maniera adeguata alcune aree del pianeta. Molte zone dell'Africa, dell'Asia e del Centro e Sud America non hanno infatti i mezzi economici necessari per allestire reti di monitoraggio oppure si tratta di zone di guerra in cui non è possibile operare in sicurezza. Inoltre, poiché è impossibile installare dei sensori in mare aperto, tutte le aree oceaniche non dispongono di un'adeguata copertura. I

sensori disposti lungo le coste non arrivano oltre poche centinaia di chilometri dalla riva e le reti ad ampio raggio, che sono in grado di coprire migliaia di chilometri, non garantiscono una risoluzione adeguata.

Rimangono quindi molte aree scoperte o con bassa risoluzione, la maggior parte delle quali si trova nella cosiddetta ITCZ dove si verifica circa il 60% dei temporali, rappresentando dunque una mancanza di informazione notevole a livello globale.

Quello che segue è un breve elenco di alcune delle reti al momento attive, in cui viene dato maggiore risalto a quelle presenti in Europa.

6.1 SIRF

Il Sistema Italiano di Rilevamento Fulmini (SIRF), di proprietà della CESI S.p.A., è la rete di riferimento in Italia per la localizzazione dei fulmini. Creata nel 1994, attualmente è composta da 16 sensori disposti su tutto il territorio nazionale e da una decina di sensori distribuiti subito oltre confine tra Francia, Svizzera e Austria, in modo da consentire il monitoraggio dei temporali in avvicinamento alla nostra penisola. Tutti i sensori sono del tipo IMPACT e permettono la localizzazione dei soli fulmini CG attraverso le LF, con una LA di circa 500 m ed un'efficienza dichiarata del 90%. Tutti i dati raccolti vengono elaborati e inviati agli utenti in tempo reale, con un ritardo di soli 15 s, con informazioni sul punto d'impatto, l'intensità di corrente, la polarità e il numero di scariche successive nel caso di un fulmine multiplo.

6.2 LAMPINET

La rete LAMPINET è nata nel 2004 come rete del Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare Italiana (Biron et al., 2006) ed è strutturalmente molto simile al SIRF. È costituita da 15 sensori di tipo IMPACT-ESP nelle LF distribuiti sull'intero territorio nazionale. Anche in questo caso il sistema consente la localizzazione dei fulmini CG con una LA di 500 m ed un'efficienza del 90%, oltre ad essere in grado di localizzare alcuni tra i fulmini IC più intensi, ma con un'efficienza non superiore al 10–20%. Oltre al punto d'impatto vengono determinate l'intensità di corrente, la polarità e il numero di scariche successive in tempo reale, in modo da poter garantire la sicurezza degli aeromobili.

6.3 LINET

La rete che offre la più alta precisione di localizzazione è probabilmente il sistema Lightning Network (LINET). Creato nel 1990 dal progetto del gruppo di ricerca dell'Università Ludwig-Maximilians di Monaco (Betz et al., 2005), si è ingrandito negli anni fino a coprire tutta l'Europa con un centinaio di sensori, di cui circa un terzo situato in Germania. LINET utilizza LF e VLF per

localizzare sia i fulmini CG che i fulmini IC, anche di intensità molto debole, discriminando tra l'una e l'altra categoria grazie ad una particolare tecnica ibrida MDF e TOA; le coordinate dell'evento vengono determinate con il sistema MDF e successivamente, confrontando i tempi di ricezione dei vari sensori con i tempi teorici calcolati per un fulmine CG, è possibile riconoscere se si trattava effettivamente di un CG oppure di un IC. Infatti il tempo di ricezione risulta leggermente più alto per l'IC per questioni geometriche. L'alta densità di sensori consente di raggiungere una DE superiore al 90% per i fulmini CG, più bassa per gli IC, ed una LA dichiarata inferiore ai 150 m nelle zone centrali della rete.

6.4 XDDE

Una delle reti europee che utilizza le onde VHF è la Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques atmosfèriques (XDDE) del Servizio Meteorologico della Catalogna. Inaugurata nel 2003, è costituita da soli 4 sensori ma è sufficiente per coprire il territorio catalano con un'efficienza superiore al 90%. Due stazioni sono attrezzate con sensori interferometrici nelle VHF mentre le altre due sono dotate sia di sensori interferometrici nelle VHF che di sensori IMPACT nelle LF. Questa struttura consente il riconoscimento di tutte le categorie di fulmini con una LA inferiore al chilometro e determina l'intensità di corrente, la polarità e il numero di scariche successive per i fulmini CG.

6.5 ATDNET

Il Servizio Meteorologico del Regno Unito (MetOffice) gestisce dal 1987 una rete ad ampio raggio in grado di individuare i fulmini CG operando nella banda delle VLF; poiché a questa frequenza le onde radio viaggiano per migliaia di chilometri "rimbalzando" nel canale formato dal suolo e dalla ionosfera con una ridotta attenuazione, la Arrival Time Difference Network (ATDNET; Keogh et al., 2006) è attualmente in grado di coprire l'Europa, l'Africa, l'Oceano Atlantico e buona parte del Sud America con soli 14 sensori, di cui 10 dislocati in Europa. La tecnica utilizzata è quella del TOA, da cui deriva il nome della rete, ma per via delle dimensioni e del ridotto numero di stazioni non è possibile ottenere risoluzioni molto accurate; si va così dai 2–3 km in Europa, dove ci sono più sensori, ai 5 km dell'Africa, ai 10 km del Sud America, abbinati a DE che variano dal 90 al 20 %.

6.6 ZEUS

Un'altra rete per la localizzazione a grandi distanze tramite VLF è nata come progetto sperimentale nel 2001 dalla collaborazione tra l'Osservatorio Nazionale di Atene e l'Università del Connecticut ed è stata chiamata come il mitologico re degli dei Zeus (Anagnostou et al., 2002; Anagnostou, 2006). Questa rete è stata ampliata negli anni espandendosi dall'Europa all'Africa e al Sud America, coinvolgendo l'Università del Nevada e l'Università di San Paolo del Brasile, che già possedeva una propria rete denominata Sferics Timing And Ranging Network (STARNET). Dal 2006 il progetto è stato però suddiviso in due tronconi: il primo ha mantenuto la denominazione ZEUS

sotto la gestione dell'Osservatorio Nazionale di Atene e comprende i 6 rilevatori dislocati in Europa, mentre il secondo è stato integrato nella rete STARNET che ora dispone di 10 sensori divisi tra Sud America e Africa. ZEUS sfrutta le VLF utilizzando la tecnica TOA e raggiunge un'efficienza pari a circa il 25% con una LA di 7 km, piuttosto scarsi in confronto ai parametri garantiti dai LLS a piccola scala, ma comparabili con i risultati ottenuti da ATDNET, il che risulta comunque un buon risultato per un sistema su scala così ampia. Una comparazione effettuata da Lagouvardos et al. (2009) tra i dati di ZEUS e quelli di LINET ha rivelato che ZUES distingue non soltanto i CG, ma anche gli IC; la distribuzione spaziale dei dati di ZEUS è molto simile a quella di LINET, anche se il numero totale di scariche osservate da ZEUS è molto più basso di quello rivelato da LINET.

6.7 EUCLID

La collaborazione tra i numerosi Servizi Meteorologici Nazionali europei ha portato alla nascita di EUCLID, un programma internazionale per la condivisione dei dati di fulminazione e lo scambio di conoscenze e tecnologie in questo settore. Attualmente questo progetto coinvolge 24 Paesi in cui sono dislocati circa 140 sensori, di cui la maggior parte operante nelle onde LF per la localizzazione dei fulmini CG. I dati ricavati dai singoli Servizi Nazionali vengono inviati a due centri operativi dedicati che analizzano i dati e rendono disponibili le relative informazioni in tempo reale a tutti i partecipanti al progetto.

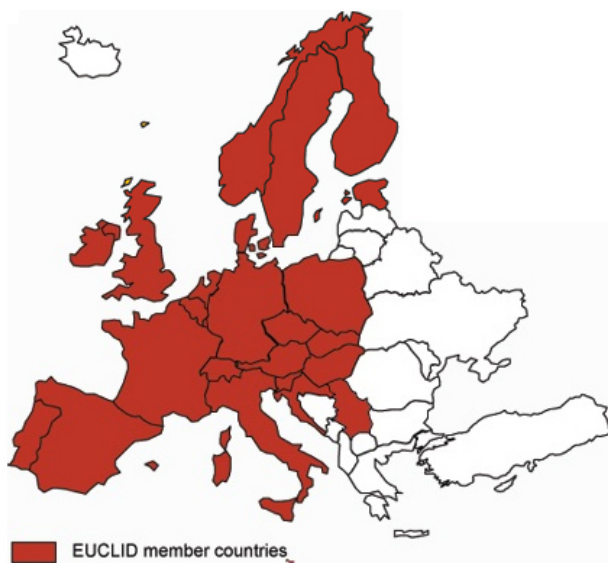


Figura 6.2 I 24 Paesi europei attualmente coinvolti nel progetto EUCLID

6.8 WWLLN

Una delle pochissime reti che al momento forniscono una copertura globale per gli eventi di fulminazione è la World Wide Lightning Location Network (WWLLN), creata dall'Università di Washington. Una cinquantina di sensori nelle VLF sono dislocati in tutto il mondo e utilizzano una tecnica detta Time Of Group Arrival (TOGA) per determinare il punto d'impatto dei fulmini CG, concettualmente identica alla tecnica TOA, ma che invece di rilevare l'istante di massima intensità

del segnale si basa sull'analisi dell'intero pacchetto d'onda. Per via dell'estensione che si vuole raggiungere con un numero relativamente basso di sensori, la WWLLN ha una DE che non supera il 30% ed una LA di circa 15 km; tuttavia, le informazioni che si ricavano sulla distribuzione delle aree elettricamente più attive sono di grande importanza, soprattutto in ambito climatologico.

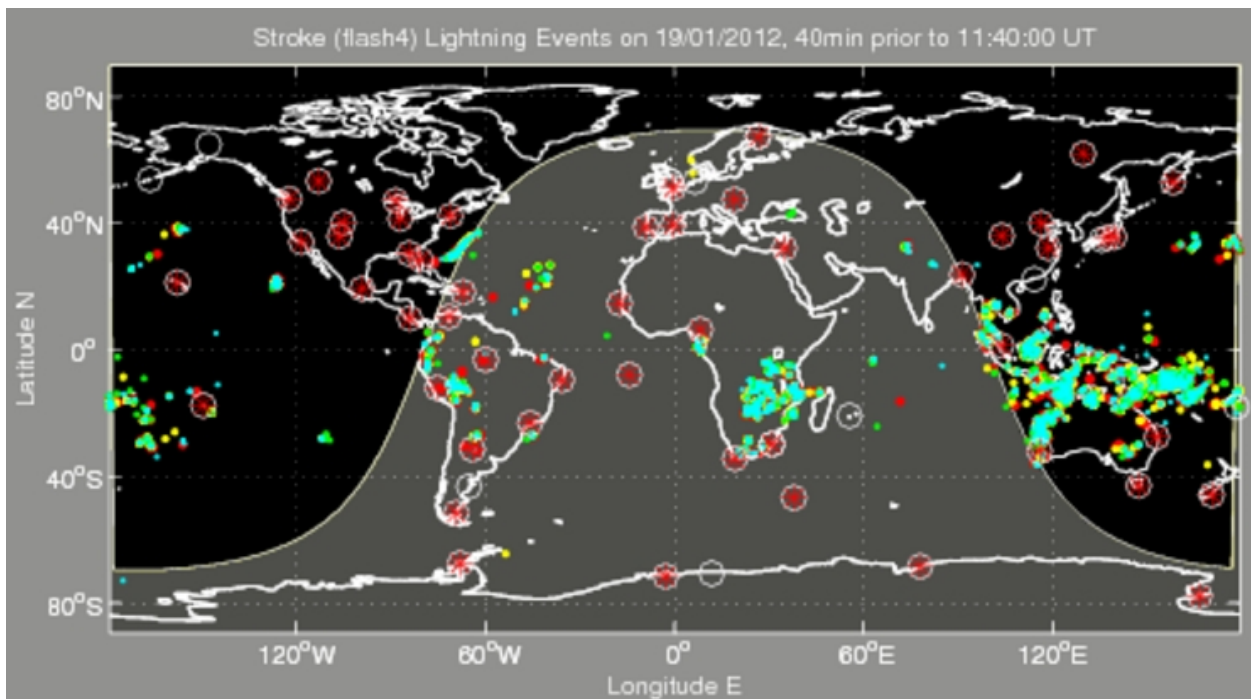


Figura 6.3 Rappresentazione dei fulmini individuati dalla WWLLN nell'arco di 40 minuti. Gli asterischi rossi dentro i cerchi bianchi sono le stazioni attive mentre gli altri punti colorati sono i fulmini: la scala di colore va dall'azzurro (fulmini caduti negli ultimi 10 minuti), al verde, al giallo e infine al rosso (fulmini caduti tra 30 e 40 minuti prima). La fascia grigia è la zona diurna, quella nera la fascia notturna

6.9 ENTLN

La Earth Networks Total Lightning Network (ENTLN), creata nel 2009 dal gruppo statunitense Earth Networks, utilizza oltre 500 sensori sparsi in tutto il mondo per ottenere una copertura globale degli eventi di fulminazione con una buona risoluzione spaziale ed un'alta efficienza. Tali sensori sono in grado di operare su una banda di frequenze molto ampia, tra 1 Hz e 12 MHz, riuscendo in tal modo a distinguere i fulmini IC dai CG con una precisione piuttosto elevata, cosa che risulta impossibile per i sistemi come il WWLLN che utilizzano solamente le VLF.

6.10 Il futuro delle reti al suolo

Molte delle reti attualmente esistenti hanno ormai raggiunto standard qualitativi piuttosto alti, in grado di soddisfare la maggior parte delle necessità degli utenti. Tuttavia, con il continuo miglioramento delle tecnologie disponibili si avrà probabilmente anche un aumento delle performance richieste. Uno studio effettuato tra i Servizi Meteorologici di vari Paesi europei, le

Protezioni Civili e gli Enti per il controllo del traffico aereo (De Leonibus et al., 2007) rivela che non sono attesi grossi miglioramenti dell'efficienza dal punto di vista dell'elaborazione dei dati, cioè aumenti della potenza di calcolo degli elaboratori o incrementi della velocità di trasmissione dei dati non dovrebbero portare a cambiamenti radicali; si attendono invece miglioramenti sotto l'aspetto della copertura fornita da ogni singola rete, cioè per aumentare l'efficienza del sistema bisognerà disporre di un più alto numero di sensori posti più vicini gli uni agli altri: maggiore è il numero di sensori che registra lo stesso fulmine, maggiore è la precisione finale. Ovviamente questo è in contrasto con la logica di reti come ATDNET che fanno del basso numero di sensori il loro punto di forza, in quanto comporta un basso costo di realizzazione e manutenzione a fronte di una copertura molto estesa, seppur con basse efficienze.

Ci si aspetta inoltre che nei prossimi anni aumenti il numero delle reti esistenti, con un maggior numero di Paesi che si doterà di una propria rete nazionale, accrescendo la copertura disponibile.

7 I SISTEMI SATELLITARI

L'osservazione dei fenomeni elettrici in atmosfera viene effettuata ormai da decenni anche dallo spazio. I primi approcci sono state le semplici osservazioni visive da parte degli astronauti, correlate da foto o da brevi filmati; successivamente sono state ricavate informazioni da apposite apparecchiature installate su alcuni satelliti e sullo Space Shuttle, sul quale sono stati effettuati numerosi esperimenti in questo campo. Tuttavia questi primi tentativi non hanno prodotto risultati eccellenti poiché l'accuratezza delle misure è rimasta sempre molto bassa, dell'ordine di circa 100 km, abbinata ad efficienze ridotte. Soltanto negli anni '90 si è potuto raggiungere un livello tecnologico sufficiente ad ottenere informazioni con qualità paragonabili a quelle ottenute dalle reti al suolo.

I sistemi di localizzazione satellitare attualmente in uso sono tutti sistemi orbitanti, ciò significa che effettuano una serie di passaggi successivi sulle aree da monitorare con tempi che cambiano



Figura 7.1 Un satellite orbitante spazza la superficie osservando ogni punto solo per pochi minuti ad ogni passaggio

in base alla struttura dell'orbita stessa; questa caratteristica non consente il monitoraggio continuo di una determinata zona, in cui per esempio si stia sviluppando un sistema temporalesco, risultando in una serie di dati "spezzettati" intervallati da tempi più o meno lunghi. Nonostante questa limitazione, ogni singola area del pianeta viene osservata per un tempo sufficientemente lungo (circa 2–3 minuti) per consentire di determinare le caratteristiche del singolo temporale; in particolare è possibile determinarne il tasso di fulminazione, che nel caso minimo si attesta attorno ad 1–2 fulmini al minuto (Chauzy et al., 2005), e ricavare informazioni utili in campo climatologico e sull'evoluzione dei fenomeni temporaleschi in generale.

Il grande vantaggio dell'osservazione satellitare sta nel fatto che si è in grado di monitorare qualunque punto della superficie terrestre, sia che si trovi sopra i continenti sia che si trovi in mezzo all'oceano, con una risoluzione omogenea.

Per individuare i fulmini dallo spazio vengono utilizzate due tecniche differenti: la più utilizzata prevede l'utilizzo di un sensore ottico per riconoscere il lampo emesso dalla scarica di ritorno mentre la seconda tecnica consiste nel captare l'onda radio emessa dal fulmine nelle VHF (l'utilizzo delle LF/VLF è limitato dalla presenza della ionosfera). Per poter localizzare spazialmente il fulmine non si esegue in genere una triangolazione delle segnale captato da più sensori come nelle reti al suolo, ma si utilizza la direzione di puntamento del sensore per stabilire il punto esatto della scarica. Con questa tecnica è sufficiente utilizzare un solo satellite anziché dover mettere in orbita una costellazione completa; l'unica imprecisione, oltre alle limitazioni intrinseche del sistema

utilizzato, può essere dovuta all'effetto di parallasse che si verifica nel localizzare un fulmine in quota in un'area che non viene osservata esattamente al nadir.

Quanto segue è la descrizione di tre sistemi utilizzati per la localizzazione satellitare.

7.1 OTD

Il primo sensore di buona qualità ad essere lanciato in orbita è stato l'Optical Transient Detector (OTD). Questo sensore è stato lanciato dalla NASA nel 1995 a bordo del satellite MicroLab-1 ed ha completato la sua missione nel 2000. Il satellite orbitava ad un'altitudine di 740 km con un'inclinazione di 70° rispetto al piano equatoriale; questi parametri consentivano al satellite di compiere un'orbita completa ogni 100 minuti, durante la quale ogni punto della superficie veniva monitorato per una media di 3 minuti. Dalla sovrapposizione della rotazione del satellite e della rotazione terrestre si otteneva una serie di circa 400 osservazioni l'anno, di 3 minuti ciascuna, per ogni punto della superficie terrestre compreso tra i 70° N e i 70° S.

OTD era costituito da un sensore ottico in grado di osservare una porzione di superficie terrestre di $1300 \times 1300 \text{ km}^2$ con una griglia di 128×128 pixel, che gli conferiva una risoluzione spaziale di circa 10 km. Il sensore ottico era in grado di osservare la radiazione emessa dall'ossigeno a 777.4 nm; se l'energia captata da un pixel del sensore, cumulata nei 2 ms del campionamento, superava la soglia prevista, variabile tra $11.7 \mu\text{J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ nelle ore notturne e $16.8 \mu\text{J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ al mezzogiorno locale, veniva registrato un "evento"; più eventi registrati su pixel adiacenti negli stessi 2 ms venivano registrati come "gruppo", corrispondente sostanzialmente ad una singola scarica di ritorno; più gruppi ravvicinati spazialmente e temporalmente venivano classificati in un "flash", corrispondente ad un fulmine completo di più scariche successive; più flash identificati in un'area geografica ristretta venivano raggruppati in un'"area", corrispondente in pratica ad un singolo temporale. Questo tipo di classificazione è comune anche ad altri strumenti ottici satellitari, anche se a volte con nomi differenti per le varie categorie.

La tecnica utilizzata da OTD permette l'osservazione dei fulmini totali, quindi sia i fulmini IC che i fulmini CG, ma non consente in alcun modo di discriminare tra l'una e l'altra categoria. La DE di OTD variava tra il giorno e la notte, con un range tra il 40% e il 65% rispettivamente, a causa delle diverse condizioni di illuminazione che influiscono sulla localizzazione.

Come già accennato in precedenza, i dati di OTD, come quelli di tutti i satelliti orbitanti, non hanno una particolare utilità per il nowcasting, ma sono importanti in campo climatologico, oltre a fornire validi elementi di paragone per i sistemi di rilevamento a terra, specialmente quelli progettati per le grandi distanze come ATDNET. In particolare, le osservazioni di OTD hanno fornito una prima misura della frequenza globale di fulmini pari a circa 40 fulmini al secondo, decisamente inferiore alle stime più accreditate che parlano di oltre 100 fulmini al secondo; questa contraddizione in

realtà è probabilmente dovuta alla limitata DE di OTD ed all'osservazione non continua dell'intera superficie terrestre, ma risulta comunque un punto di partenza per studi ulteriori.

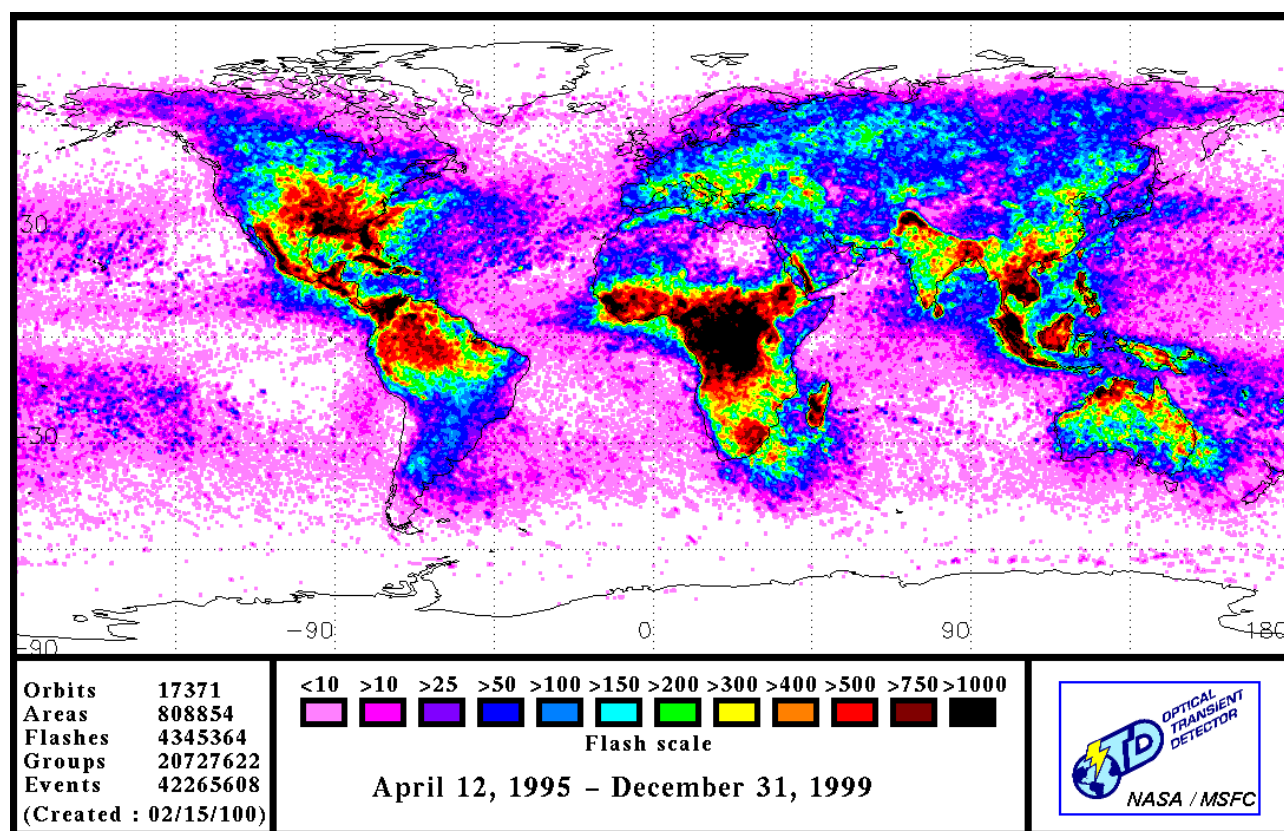


Figura 7.2 Distribuzione globale e densità della fulminazione osservata da OTD durante il suo intero ciclo di funzionamento, dall'Aprile 1995 al Dicembre 1999 (la missione di OTD si è conclusa nel Marzo 2000). La scala colorata indica i fulmini km^{-2} mentre nel riquadro in basso a sinistra sono riportate le orbite effettuate e il numero di segnali ricevuti per ogni categoria di classificazione

7.2 LIS

Il successore di OTD è il sensore denominato Lightning Imaging Sensor (LIS), lanciato nel 1997 a bordo del satellite Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) nell'ambito di un progetto congiunto tra la NASA e la Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). Il satellite, tuttora attivo, fu lanciato inizialmente ad un'altitudine di 350 km con un'inclinazione di 35° rispetto all'equatore, in modo da poter osservare principalmente la fascia ITCZ dove i temporali sono più frequenti, e fu poi spostato nel 2001 su un'orbita più alta, ad una quota di 400 km, sempre tra i 35° N e i 35° S.

Il principio costruttivo del LIS è molto simile a quello di OTD, ma con alcuni miglioramenti sia sul piano tecnico che nell'elaborazione dei dati (Christian et al., 1999; Boccippio et al., 2002). Il sensore ottico è in grado di osservare una porzione della superficie terrestre di $600 \times 600 \text{ km}^2$ con una griglia di 128×128 pixel, ottenendo quindi una risoluzione spaziale di circa 5 km. Per via dell'orbita più bassa e del campo visivo più ristretto rispetto ad OTD i tempi di monitoraggio per ogni singola area da parte di LIS sono più brevi, attorno ai 90 s per ciascuna. Rispetto ad OTD è stata ridotta anche la soglia di energia necessaria per registrare un evento, scesa a $4.7 \mu\text{J m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$

in modo da poter registrare anche i fulmini meno intensi, misurata sempre ad una lunghezza d'onda di 777.4 nm e cumulata per 2 ms. Grazie alla soglia più bassa e all'introduzione di tecnologie più avanzate, l'efficienza di LIS è decisamente più alta rispetto a quella di OTD e raggiunge il 90% indipendentemente per il giorno e la notte. Anche LIS, così come OTD, non è in grado di distinguere in alcun modo i fulmini CG da quelli IC e fornisce informazioni sulla fulminazione totale.

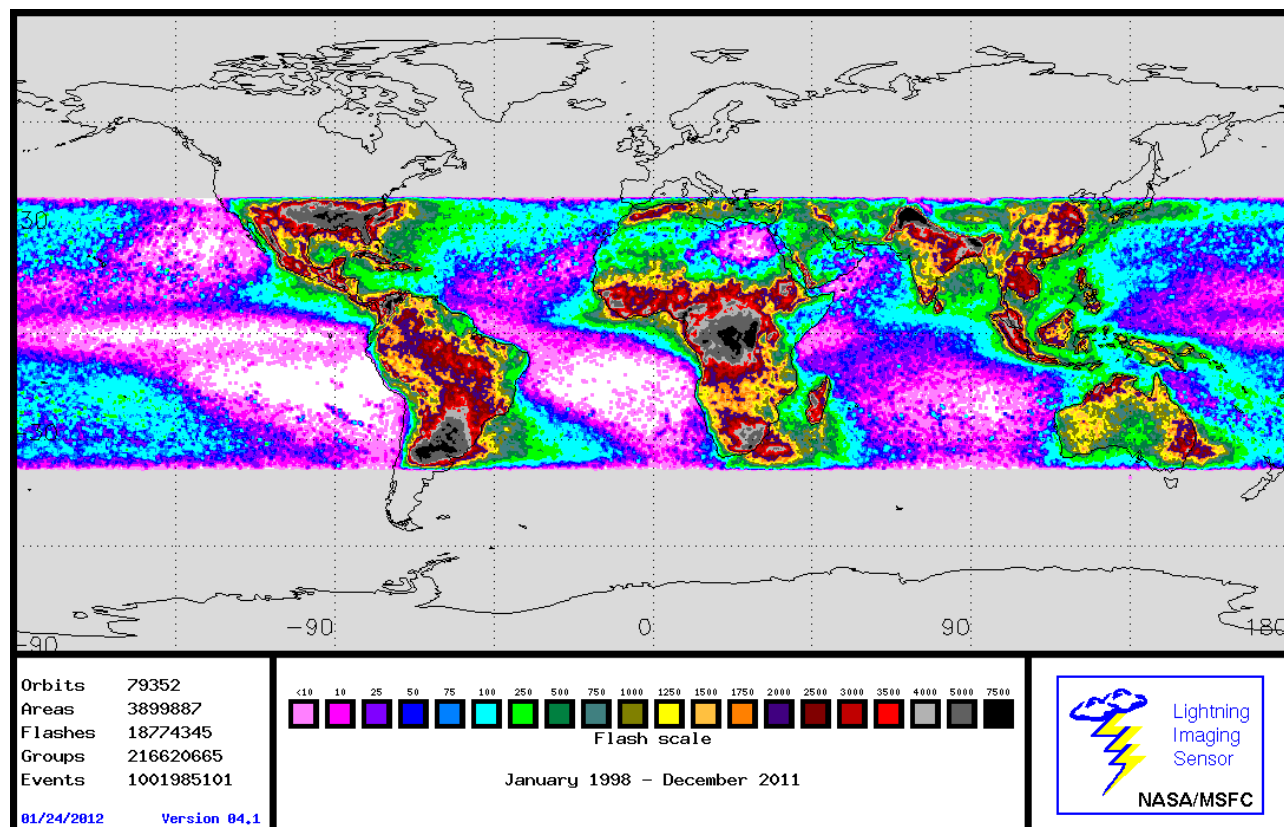


Figura 7.3 Distribuzione globale e densità della fulminazione osservata da LIS durante il suo intero ciclo di funzionamento, dal Gennaio 1998 al Dicembre 2011. La scala colorata indica i fulmini km^{-2} mentre nel riquadro in basso a sinistra sono riportate le orbite effettuate e il numero di segnali ricevuti per ogni categoria di classificazione. L'inclinazione ridotta dell'orbita lascia scoperte le alte latitudini

7.3 FORTE

Una collaborazione tra il Los Alamos National Laboratory e i Sandia National Laboratories ha portato nel 1997 al lancio del satellite Fast On-orbit Recording of Transient Events (FORTE) su un'orbita con un'inclinazione di 70° rispetto all'equatore ad un'altitudine di 800 km. Questo satellite ha a bordo una strumentazione per la localizzazione dei fulmini costituita da sensori ottici e antenne per il rilevamento delle onde VHF e costituisce quindi un passo in avanti rispetto a OTD e LIS (Light et al., 2001).

Gli strumenti ottici sono due: il primo è un fotodiode in grado di osservare la radiazione nel visibile e nel vicino infrarosso tra 0.4 e 1.1 μm in modo tale da fornire un dato di background della situazione corrente ed è dotato di un campo visivo circolare di 1200 km di diametro al suolo; il

secondo è un sensore ottico simile a quelli di OTD e LIS in grado di misurare la radiazione emessa dal canale di scarica a 777.4 nm, il cui campo visivo è un quadrato inscritto nel campo del fotodiodo e suddiviso in 128×128 pixel, il che gli conferisce una risoluzione di circa 10 km.

La strumentazione radio è costituita da tre ricevitori distinti: un ricevitore opera su una banda di 85 MHz di larghezza che può essere scelta fra le tre in cui vengono suddivise le VHF e fornisce un dato di background; gli altri due ricevitori

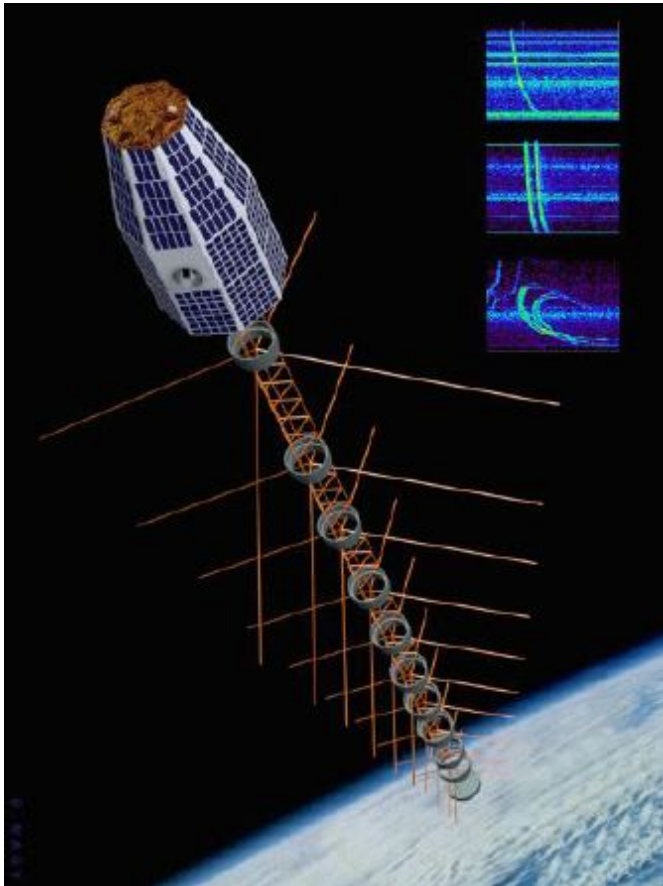


Figura 7.4 Il satellite FORTE presenta numerose antenne per la ricezione delle onde radio in VHF

operano ciascuno su una larghezza di banda di soli 22 MHz che può essere scelta in maniera indipendente sulle VHF. All'interno di ognuna delle due bande da 22 MHz vengono distinte 8 sotto-bande di 1 MHz ciascuna: un segnale viene convalidato solo se supera un certo valore di intensità di soglia in almeno 5 di queste 8 sotto-bande; con questo sistema si può discriminare in maniera efficace il segnale prodotto da un fulmine dal rumore di fondo. Ogni impulso che viene registrato viene correlato da 500 μ s di informazione precedente l'impulso stesso e 300 μ s di informazione successiva, in maniera tale da ottenere più informazione possibile per ciascun evento. Il campo visivo degli strumenti radio dipende dalla struttura delle antenne, che rimangono sempre puntate verso il nadir, ed è un cerchio di 1200 km di diametro al suolo, come per il fotodiodo.

Grazie alla combinazione dei sensori ottici con le antenne radio FORTE è in grado di distinguere i fulmini CG dagli IC e di ricostruire la struttura del canale di scarica, fornendo anche informazioni sull'intensità e la polarità delle scariche.

Uno dei risultati più importanti ottenuti dal progetto FORTE è stata la spiegazione dei cosiddetti Trans-Ionospheric Pulse Pairs (TIPP), coppie di impulsi successivi nelle VHF che si susseguono a pochi microsecondi di distanza l'uno dall'altro: l'analisi dei dati forniti da FORTE ha riconosciuto che il segnale emesso da un fulmine IC e ricevuto dal sensore viene seguito da un secondo impulso più debole dovuto alla riflessione dell'onda radio sulla superficie terrestre, dando origine ai TIPP.

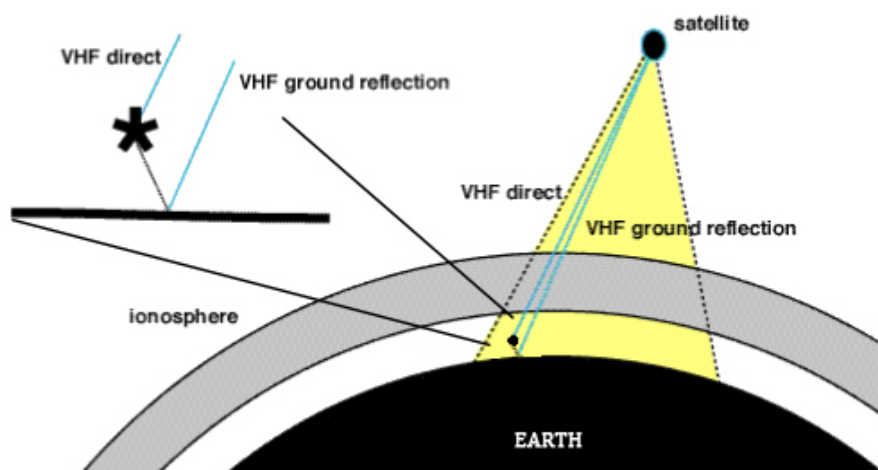


Figura 7.5 Riflessione dell'onda VHF sulla superficie terrestre e formazione di un TIPP

7.4 Il futuro dei sistemi satellitari

Per quanto riguarda i prossimi sviluppi delle tecnologie per la localizzazione satellitare non ci si aspettano grossi miglioramenti nella LA delle strumentazioni ottiche per via delle limitazioni intrinseche dovute allo scattering della radiazione all'interno delle nubi, che impediscono di identificare il punto di scarica con un dettaglio inferiore a 5–10 km, mentre si attendono miglioramenti nelle tecniche di elaborazione dei dati che dovrebbero consentire una migliore efficienza nel riconoscimento dei fulmini. I miglioramenti alla LA possono arrivare soltanto dall'integrazione delle tecniche ottiche con la localizzazione tramite onde radio.

In particolare esistono alcuni progetti, attualmente in fase di realizzazione, che intendono sfruttare la tecnica interferometrica.

7.4.1 V-GLASS

Il progetto VHF Global Lightning And Severe Storm (V-GLASS), portato avanti dal Los Alamos National Laboratory, prevede di utilizzare una costellazione di satelliti orbitanti dotati di antenne interferometriche in modo da poter localizzare i fulmini mediante la triangolazione del segnale ricevuto. Per poter realizzare questa costellazione si è pensato di appoggiarsi ai satelliti della rete GPS che verranno aggiornati nei prossimi anni, i quali orbitano a 26560 km di altitudine, con un'inclinazione di 55° rispetto all'equatore e un periodo di rotazione di 12 ore; in particolare si intende montare i ricevitori VHF sul blocco IIF, un gruppo di 12 satelliti di cui sono già stati lanciati i primi due (uno nel 2010 e l'altro nel 2011) e di cui si prevede di lanciare i successivi entro il 2014.

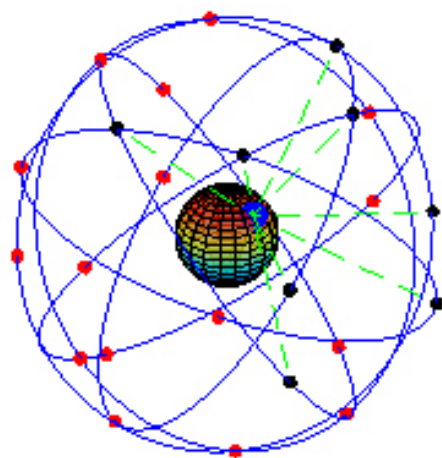


Figura 7.6 I satelliti della rete GPS

7.4.2 GLIMS

Il progetto Global Lightning and Sprite Measurements (GLIMS), sviluppato dalla JAXA, prevede di portare una serie di strumentazioni per lo studio dei fulmini e dei TLE sulla Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station, ISS) nella prima metà del 2012 (Sato et al., 2011; Ushio et al., 2011). Tali strumentazioni comprendono diversi sensori ottici, operanti a lunghezze d'onda variabili tra i 150 e i 900 nm, oltre a due antenne interferometriche nelle VHF che resteranno puntate verso il nadir della ISS e che consentiranno di osservare la struttura tridimensionale dello sviluppo dei fulmini.

7.4.3 I satelliti geostazionari

Un importante passo in avanti per l'osservazione dallo spazio dovrebbe arrivare dall'utilizzo di piattaforme satellitari in orbite geostazionarie: questo tipo di strumenti hanno il grande vantaggio di poter monitorare in maniera costante l'area di competenza, cosa che i satelliti in orbita bassa non sono in grado di fare. Un satellite geostazionario sarebbe quindi in grado di seguire l'evoluzione di un singolo temporale per tutto il suo ciclo di vita, garantendo informazioni utili a scopo di nowcasting ed allerta. Un monitoraggio continuo permetterebbe anche di ottenere precise informazioni climatologiche sulla distribuzione globale dei fulmini e consentirebbe di determinare l'effettivo impatto della fulminazione sulla produzione degli NO_x atmosferici.

Un monitoraggio realmente continuo verrebbe realizzato solamente da un satellite privo di spin, cioè senza rotazione attorno ad uno dei suoi assi. La rotazione è un meccanismo che risulta utile per la stabilizzazione del satellite e permette di spazzare tutta la superficie senza ricorrere a componenti mobili che potrebbero rendere instabile l'orbita stessa; in questo modo ogni spazzata, per un satellite che compia 100 rotazioni al minuto, dura circa 30 ms e ogni singola area di $10 \times 10 \text{ km}^2$ viene osservata per soli 23 μs , un tempo troppo breve per poter individuare correttamente i fenomeni elettrici. Per questo motivo i futuri satelliti geostazionari con a bordo strumentazione per la localizzazione dei fulmini dovranno essere stabilizzati senza spin.

Un ulteriore vantaggio per un satellite geostazionario è dato dal fatto che, trovandosi ad una quota di 35800 km, potrebbe fornire in continuo informazioni su un'area molto vasta, teoricamente compresa tra 81.3° N e 81.3° S .

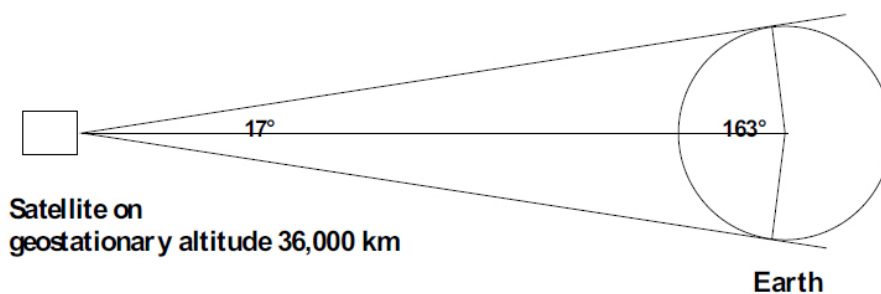


Figura 7.7 Il campo visivo di un satellite geostazionario è in grado di coprire circa 163° di latitudine

In realtà l'ampiezza dell'area osservata sarà minore di quella massima raggiungibile: infatti, mentre le misurazioni effettuate al nadir potranno raggiungere risoluzioni di circa 6–8 km per strumenti ottici, man mano che si aumenta l'angolo di visuale l'area osservata da ogni singolo pixel del sensore aumenta progressivamente, riducendo quindi la risoluzione. A questo si aggiunge la possibilità di avere errori di parallasse tanto maggiori quanto maggiore è l'angolo di vista: questo porta ad esempio ad un errore di localizzazione di circa 15 km per un fulmine che si verifichi a 12 km d'altezza a 46° di latitudine.

Attualmente sono in progetto due missioni su satelliti geostazionari, una europea ed una statunitense, che trasporteranno sensori per la localizzazione dei fulmini.

7.4.3.1 LI

La European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites (EUMETSAT), in collaborazione con l'European Space Agency (ESA), ha in programma di lanciare la terza generazione di satelliti Meteosat, i Meteosat Third Generation (MTG). Il progetto consiste nel lanciare 6 satelliti in orbita geostazionaria privi di spin di cui 4 disporranno, oltre alle altre strumentazioni, anche di un sensore ottico per il rilevamento dei fulmini, il Lightning Imager (LI) (Finke et al., 2002a,b; Finke 2006). Questo sensore riconoscerà i fulmini totali, senza distinzione tra IC e CG, misurando la radiazione emessa dal canale di scarica alla lunghezza d'onda di 777.4 nm e

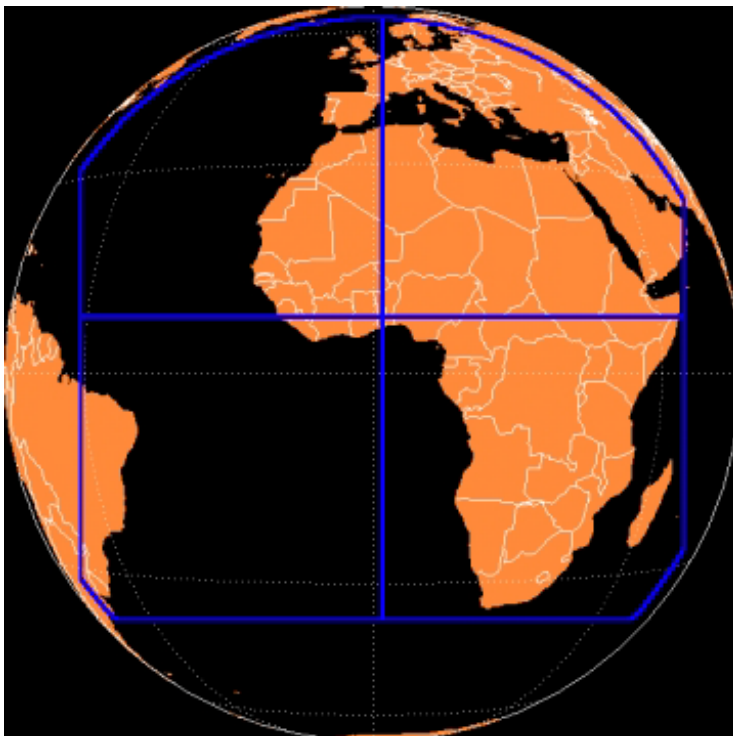


Figura 7.8 Copertura prevista per un satellite MTG su Europa e Africa. Il centro del campo visivo è spostato verso nord rispetto all'equatore per coprire meglio l'Europa centro-settentrionale

registrerà un evento di fulminazione ogni volta che l'energia ricevuta supererà la soglia di $4 \mu\text{J m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. Per energie comprese tra 4 e $10 \mu\text{J m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ l'efficienza del LI dovrebbe risultare pari o superiore al 70% e raggiungerebbe il 90% o più per energie superiori ai $10 \mu\text{J m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. Il sensore dovrebbe avere un'apertura angolare di 16° , con il cono visivo leggermente spostato verso Nord o verso Sud, a seconda del singolo satellite, in modo da ottenere una migliore risoluzione alle alte latitudini; in questo modo ci si attende una risoluzione spaziale di almeno 10 km sull'Europa centrale, a 50° di latitudine, il che comporterebbe una risoluzione di 6 km al nadir. Il lancio del primo satellite MTG è previsto per il 2017.

7.4.3.2 GLM

I sistemi satellitari statunitensi per la meteorologia nascono dalla collaborazione tra la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e la NASA e verranno integrati da due nuovi satelliti, i Geostationary Operational Environmental Satellite – R Series (GOES-R), il cui lancio è previsto nel 2015. I due satelliti, indicati con GOES-East e GOES-West, trasporteranno vari strumenti meteorologici tra cui un sensore ottico, il Geostationary Lightning Mapper (GLM; Goodman, 2010), in grado di operare alla solita lunghezza d'onda di 777.4 nm. Questo sensore, costituito da una matrice di 1372×1300 pixel, sarà in grado di osservare la superficie terrestre tra 52° N e 52° S, con una risoluzione variabile tra gli 8 km al nadir e i 14 km ai margini del proprio campo visivo, ed una DE compresa tra un minimo del 70% nelle ore diurne e un massimo del 90% durante la notte.

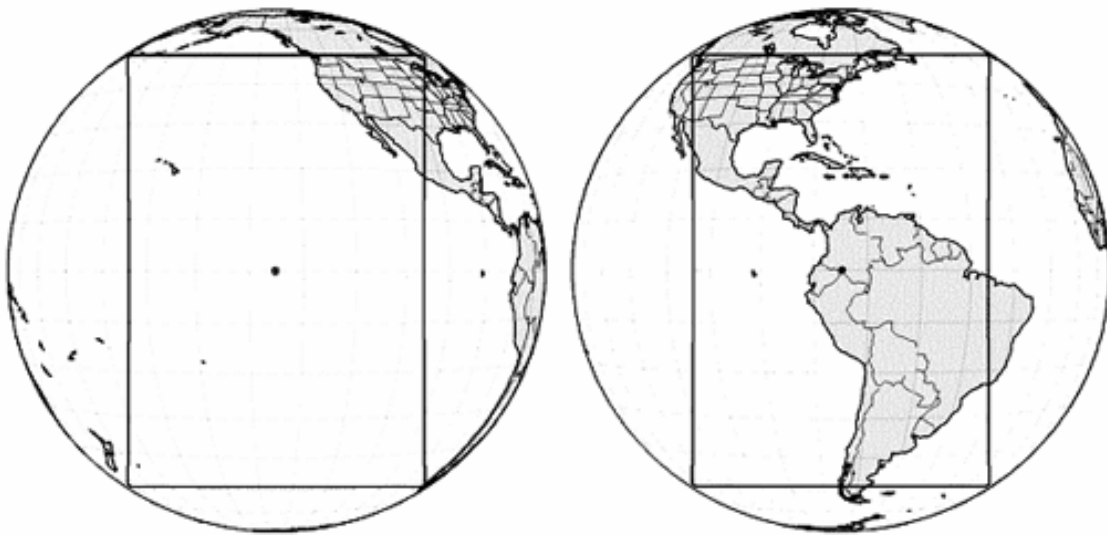


Figura 7.9 Copertura prevista per i due satelliti GOES-West (a sinistra) e GOES-East (a destra)

8 RETI AL SUOLO E SISTEMI SATELLITARI A CONFRONTO

Confrontando le caratteristiche dei diversi LLS si notano alcune importanti differenze tra i sistemi che operano al suolo ed i sistemi sviluppati per lo spazio.

Innanzitutto si nota una differente copertura del globo realizzata dai due sistemi, con le reti al suolo che si sviluppano principalmente nei paesi industrializzati, lasciando scoperte ampie zone della superficie terrestre, mentre i satelliti forniscono una copertura omogenea su tutta la fascia latitudinale di competenza e restano fondamentali per monitorare le aree oceaniche. Le poche reti in grado di fornire una copertura globale sono limitate da DE e LA molto basse che ne limitano molte applicazioni pratiche.

A questo si contrappone il fatto che mentre le reti al suolo sono in grado di monitorare costantemente le aree, seppur limitate, in cui sono installate, i satelliti non sono in grado di osservare ogni punto della superficie per più di qualche minuto di seguito limitando di fatto il numero di fulmini che possono essere rilevati, almeno finché non verranno introdotti i sistemi geostazionari, con i quali questa limitazione verrà rimossa.

Esiste poi una grossa differenza nella precisione con cui i fulmini vengono localizzati spazialmente. Al suolo è possibile installare un numero molto vasto di sensori a distanza di pochi chilometri l'uno dall'altro il che consente, utilizzando le onde radio, di determinare il punto di sviluppo del fulmine con poche centinaia di metri di errore. Al contrario, i sistemi satellitari utilizzano in gran parte i sensori ottici che hanno incertezze dell'ordine di alcuni chilometri. L'introduzione di tecniche interferometriche da satellite migliorerà questa situazione, ma non è detto che si possano raggiungere risultati equiparabili a quelli ottenuti con le reti al suolo, soprattutto a causa delle distanze dalla superficie terrestre a cui i satelliti devono orbitare.

Sempre considerando le differenti tecniche che vengono utilizzate, i sistemi al suolo sono solitamente in grado di separare i fulmini CG dagli IC, caratteristica importante per molte applicazioni pratiche, mentre la maggior parte dei sistemi satellitari determina solamente i fulmini totali senza alcuna distinzione di categoria, a meno che non vengano dotati di strumentazioni per la localizzazione tramite le onde radio come nel caso di FORTE. Tuttavia nella maggior parte delle reti al suolo la distinzione tra IC e CG è fittizia in quanto nella maggioranza dei casi vengono rilevati soltanto i CG, quindi l'utilizzo dei dati da satellite completa l'informazione con l'osservazione dei fulmini totali, in particolare degli IC.

Vi sono inoltre problemi di costo relativi all'installazione e alla manutenzione di questi sistemi. Mentre una rete al suolo può essere installata, ampliata, modificata e mantenuta con costi relativamente ridotti, ogni satellite richiede investimenti notevoli per essere lanciato in orbita e non è possibile effettuare manutenzione e rinnovo dei componenti per prolungare la vita del satellite, ad eccezione di casi molto particolari e con grosse spese come è avvenuto per il

telescopio spaziale Hubble. È però anche vero che un solo satellite offre la stessa copertura di diverse centinaia di sensori dislocati a terra.

Entrambi i sistemi presentano quindi punti di forza, ma anche limitazioni, alcune delle quali verranno verosimilmente risolte in un prossimo futuro mentre altre sono sostanzialmente insormontabili e devono essere aggirate integrando le informazioni fornite da strumentazioni diverse. Bisogna quindi mantenere aperte più strade e sviluppare in parallelo sia gli strumenti da utilizzare al suolo sia quelli per uso satellitare in modo da ottenere il maggior numero possibile di informazioni.

La Tabella 8.1 riassume le caratteristiche di alcuni dei sistemi presentati in precedenza.

RETI AL SUOLO	SIRF	LAMPINET	LINET	XDDE	ATDNET	WWLLN
Frequenza di esercizio	LF	LF	LF + VLF	VHF + LF	VLF	VLF
Tecnica di localizzazione	MDF + TOA	MDF + TOA	MDF + TOA	interferometria e MDF + TOA	TOA	TOGA
Categorie osservate	CG	CG (forti IC)	CG + IC	CG + IC	CG	CG
Distingue IC/CG ?	no	no	sì	sì	no	no
Detection Efficiency	90%	> 90% (< 10% IC)	> 90% (CG)	> 90%	> 20% < 90%	< 30%
Location Accuracy	500 m	500 m	< 150 m	< 1 km	> 2 km < 10 km	15 km
Misura la corrente ?	sì	sì	sì	sì	no	
Riconosce la polarità ?	sì	sì	sì	sì	no	
Conta il numero di colpi ?	sì	sì	sì	sì	no	

SISTEMI SATELLITARI	LIS	FORTE	V-GLASS	LI	GLM
Frequenza di esercizio	ottico	ottico + VHF	VHF	ottico	ottico
Tecnica di localizzazione	puntamento	puntamento	interferometria	puntamento	puntamento
Categorie osservate	CG + IC	CG + IC	CG + IC	CG + IC	CG + IC
Distingue IC/CG ?	no	sì	sì	no	no
Detection Efficiency	90%			>70% < 90%	>70% < 90%
Location Accuracy	5 km	10 km		> 6 km < 10 km	> 8 km < 14 km
Misura la corrente ?	no	sì	sì	no	no
Riconosce la polarità ?	no	sì	sì	no	no
Conta il numero di colpi ?	no	sì		no	no

Tabella 8.1 Confronto tra le specifiche tecniche di alcuni LLS per il rilevamento al suolo (in alto) e da satellite (in basso) presentati nei capitoli precedenti

9 CONCLUSIONI

I fulmini sono fenomeni estremamente complessi dal punto di vista fisico e nonostante decenni di studi scientifici abbiano descritto molti degli aspetti della loro formazione non si è ancora riusciti a comprenderne appieno tutti i meccanismi, soprattutto per quanto riguarda la separazione delle cariche all'interno della nube temporalesca, anche se il meccanismo principale sembra riguardare le collisioni tra graupel e cristalli di ghiaccio. Numerosi studi hanno inoltre evidenziato che esistono dei collegamenti tra i fulmini e gli altri fenomeni atmosferici che accompagnano l'evoluzione di un temporale, quali la precipitazione, la formazione di grandine, la comparsa di tornado, wind gust e microburst, i quali risultano particolarmente legati, secondo una correlazione positiva, alla quantità dei fulmini CG positivi. Monitorando l'attività di fulminazione risulta quindi possibile mantenere sotto sorveglianza l'attività dei temporali ed emettere avvisi di allerta in caso di necessità. Per realizzare questo tipo di monitoraggio vengono sfruttate alcune delle proprietà dei fulmini in modo da poterli localizzare a distanza. In particolare si è osservato che i fulmini emettono onde radio durante le varie fasi del loro sviluppo, a frequenze comprese tra pochi Hz, durante la scarica di ritorno di un fulmine CG, e diverse centinaia di MHz, durante la fase di stepped leader di entrambe le categorie di fulmini e durante la scarica di ritorno di un fulmine IC. Disponendo di una rete di sensori al suolo in grado di individuare tali onde radio si ottiene la localizzazione dei fulmini utilizzando le tecniche TOA, MDF o interferometriche. Le numerose reti esistenti per la localizzazione dei fulmini utilizzano queste tecniche ottenendo DE variabili dal 20% fino ad oltre il 95% e LA che variano da circa 100 m a diverse decine di chilometri a seconda della struttura della rete stessa, anche se in gran parte tali valori riguardano esclusivamente i fulmini CG; in particolare più i sensori sono ravvicinati tra loro più alte risultano DE e LA, mentre reti che dispongono di pochi sensori distanti gli uni dagli altri raggiungono valori molto bassi per tali parametri. I sistemi che vengono montati sui satelliti utilizzano invece in gran parte sensori ottici in grado di misurare la radiazione luminosa emessa dal passaggio della scarica di ritorno lungo il canale di propagazione del fulmine. Questa tecnica consente di raggiungere una LA di circa 5–10 km con una DE pari al 90% per ogni categoria di fulmini, ma non permette di separare IC e CG, a meno che non venga accompagnata da un sistema di localizzazione che utilizzi le onde radio. In più i sistemi satellitari sono in grado di monitorare tutta la superficie del pianeta, anche se ogni punto viene osservato per periodi brevi a causa della struttura dell'orbita, senza distinzioni tra oceani e continenti, tra Paese e Paese, dando un'informazione molto più ampia rispetto alle reti al suolo, limitate in gran parte entro i confini dei paesi industrializzati. Questo tipo di informazione diventerà disponibile in maniera continuata per ogni punto della superficie, ad esclusione delle aree a latitudini molto elevate, con l'introduzione dei LLS in orbita geostazionaria, che forniranno un contributo significativo al monitoraggio dei temporali a scopo di nowcasting ed allerta, oltre a fornire informazioni più complete dal punto di vista climatologico. Da quanto riassunto finora risulta quindi evidente che né le reti al suolo né i sistemi satellitari, orbitanti o geostazionari, sono in grado da soli di fornire le informazioni richieste dagli utenti in maniera completa, ma ottimi risultati possono e devono essere ricavati dalla sinergia tra i due sistemi, con l'obiettivo di incrementare in futuro le capacità di tali sistemi e la nostra conoscenza del fenomeno di fulminazione.

10 ACRONIMI

ATDNET	Arrival Time Difference Network
CA	Cloud-to-Air
CC	Cloud-to-Cloud
CG	Cloud-to-Ground
DE	Detection Efficiency
DF	Direction Finding
ENTLN	Earth Networks Total Lightning Network
ESA	European Space Agency
ESP	Enhanced Sensitivity and Performance
EUCLID	European Cooperation for Lightning Detection
EUMETSAT	European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites
FAR	False Alarm Rate
FORTE	Fast On-orbit Recording of Transient Events
GLIMS	Global Lightning and Sprite Measurements
GLM	Geostationary Lightning Mapper
GOES	Geostationary Operational Environmental Satellite
GPS	Global Positioning System
IC	Intra-Cloud
IMPACT	Improved Accuracy from Combined Technology
ISS	International Space Station
ITCZ	InterTropical Convergence Zone
JAXA	Japan Aerospace Exploration Agency
LA	Location Accuracy
LF	Low Frequency
LI	Lightning Imager
LINET	Lightning Network
LIS	Lightning Imaging Sensor
LLS	Lightning Location System
MTG	Meteosat Third Generation
NALDN	North American Lightning Detection Network
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OTD	Optical Transient Detector
SIRF	Sistema Italiano di Rilevamento Fulmini
STARNET	Sferics Timing And Ranging Network
TGF	Transient Gamma Flash
TIPP	Trans-Ionospheric Pulse Pair
TLE	Transient Luminous Event
TOA	Time Of Arrival

TOGA	Time Of Group Arrival
TRMM	Tropical Rainfall Measuring Mission
V-GLASS	VHF Global Lightning And Severe Storm
VHF	Very High Frequency
VLF	Very Low Frequency
WWLLN	World Wide Lightning Location Network
XDDE	Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques atmosfèriques

11 BIBLIOGRAFIA

- Anagnostou, E. N., 2006: ZEUS long-range lightning detection system. Popular Summary [available at http://www.eol.ucar.edu/projects/amma-us/docs/ZEUS_popular_summary_2006.pdf]
- Anagnostou, E. N., T. Chronis, and D. P. Lalas, 2002: New receiver network advances long-range lightning monitoring. *Eos Trans, AGU*, **83(50)**, 589, doi:10.1029/2002EO000403.
- Battan, L. J. 1965. Some factors governing precipitation and lightning from convective clouds. *J. Atmos. Sci.*, **22**, 79–84.
- Betz, H.-D., W. P. Oettinger, K. Schmidt, and M. Wirz, 2005: Modern lightning detection and implementation of a new network in Germany. *Geophys. Res. Abstracts*, **7**, 00685, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-00685.
- Biron, D., L. De Leonibus, and F. Zauli, 2006: The lightning network LAMPINET of the Italian Air Force Meteorological Service. *Proc. 19th Int. Lightning Detection Conf.*, 24-25 April, Tucson, Arizona, USA.
- Boccippio, D. J., S. J. Goodman, and S. Heckman, 2000: Regional differences in tropical lightning distributions. *J. Appl. Meteor.*, **39**, 2231–2248.
- Boccippio, D. J., K. L. Cummins, H. J. Christian, and S. J. Goodman, 2001: Combined satellite- and surface-based estimation of the intracloud–cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States. *Mon. Wea. Rev.*, **129**, 108–122.
- Boccippio, D. J., W. J. Koshak, and R. J. Blakeslee, 2002: Performance assessment of the Optical Transient Detector and Lightning Imaging Sensor. Part I: Predicted diurnal variability. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **19**, 1318–1332.
- Brooks, C. E. P., 1925: The distribution of thunderstorms over the globe. *Geophys. Memo.*, **3(24)**, 147–164.
- Buechler, D. E., K. T. Driscoll, S. J. Goodman, and H. J. Christian, 2000: Lightning activity within a tornadic thunderstorm observed by the Optical Transient Detector (OTD). *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2253–2256.
- Carey, L. D., and S. A. Rutledge, 1998: Electrical and multiparameter radar observations of a severe hailstorm. *J. Geophys. Res.*, **103**, 13979–14000.
- Chauzy, S., S. Coquillat, and S. Soula, 2005: On the relevance of lightning imagery from geostationary satellite observation for operational meteorological applications. Rep. UMR UPS/CNRS, no. 5560 and EUMETSAT EUM/COL/LET/02/1562.
- Christian, H. J., R. J. Blakeslee, S. J. Goodman, D. A. Mach, M. F. Stewart, D. E. Buechler, W. J. Koshak, J. M. Hall, W. L. Boeck, K. T. Driscoll, and D. J. Boccippio. 1999: The Lightning Imaging Sensor. NASA Rep. [available at http://thunder.msfc.nasa.gov/bookshelf/pubs/LIS_ICAE99_Print.pdf]

- De Leonibus, L., D. Biron, C. Giorgi, A. Mäkelä, T. Tuomi, P. Pylkkö, and J. Haapalainen, 2007: Study on the present status and future capabilities of ground-based lightning location networks. Rep. EUMETSAT, EUM/CO/06/1584/KJG.
- Dooling, D., 2007: Noxious lightning. *NASA Space Sci. News*. [available at http://www.spacedaily.com/reports/Noxious_Lightning_999.html]
- Finke, U., 2006: Characterising the lightning source for the MTG Lightning Imager mission. Rep. EUMETSAT, EUM/MTG/SOW/05/0028.
- Finke, U., and O. Kreyer, 2002a: Detect and locate lightning events from geostationary satellite observations. Part I - Review of existing lightning location systems. Rep. EUMETSAT, EUM/CO/02/1016/SAT.
- Finke, U., and T. Hauf, 2002b: Detect and locate lightning events from geostationary satellite observations. Part II - Feasibility of lightning location from a geostationary orbit. Rep. EUMETSAT, EUM/CO/02/1016/SAT.
- Goodman, S., 2010: The GOES-R Geostationary Lightning Mapper(GLM) and opportunities for assimilation of the data into NWP models. *Joint Center for Satellite Data Assimilation Seminar*, 26 May, Camp Springs, MD, USA.
- Holle, R. L., A. I. Watson, R. E. Lopez, D. R. McGorman, R. Ortiz, and W. D. Otto, 1994: The life cycle of lightning and severe weather in a 3–4 June 1985 PRE-STORM mesoscale convective system. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1798–1808.
- Keogh, S. J., E. Hibbett, J. Nash, and J. Eyre, 2006: The Met Office Arrival Time Difference (ATD) system for thunderstorm detection and lightning location. *Forecasting Research Technical Rep.*, **488**, Met Office, UK.
- Kinzer, G. D., 1974: Cloud-to-Ground lightning versus radar reflectivity in Oklahoma thunderstorms. *J. Atmos. Sci.*, **31**, 787–799.
- Kithil, R., 1999: *Annual USA lightning costs and losses*. National Lightning Safety Institute. [available at http://www.lightningsafety.com/nlsi_lls/nlsi_annual_usa_losses.html]
- Krehbiel, P. R., 1986: The electrical structure of thunderstorms. *Studies in Geophysics - The Earth's electrical environment*, National Academy Press, 90-113.
- Krehbiel, P. R., R. J. Thomas, W. Rison, T. Hamlin, J. Harlin, and M. Davis, 1999: Three-dimensional lightning mapping observations during MEaPRS in central Oklahoma. *Proc.*, *11th Int. Conf. Atmospheric Electricity*, Guntersville, AL, NASA/CP-1999-209261, 376.
- Lagouvardos, K., V. Kotroni, H.-D. Betz, and K. Schmidt, 2009: A comparison of lightning data provided by ZEUS and LINET networks over Western Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 1713–1717.
- Laroche, P., C. Malherbe, A. Bondiou, M. Weber, C. Engholm, and V. Coel, 1991: Lightning activity in microburst producing storm cells. *Prepr. 25th Int. Conf. Radar Meteorology*, 24–28 June, Paris.

- Levizzani, V., 2010: Dispense del corso di Fisica delle Nubi. Università di Bologna.
- Light, T. E., D. M. Suszcynsky, and A. R. Jacobson, 2001: Coincident radio frequency and optical emissions from lightning, observed with the FORTE satellite. *J. Geophys. Res.*, **106**, 28223–28231.
- Nesbitt, S. W., E. J. Zipser, and D. J. Cecil, 2000: A census of precipitation features in the Tropics using TRMM: Radar, ice scattering, and lightning observations. *J. Climate*, **13**, 4087–4106.
- Oetzel, G.N., and E. T. Pierce, 1969: VHF technique for locating lightning. *Radio Sci.*, **4**, 199–202.
- Petersen, W. A., L. D. Carey, and S. D. Rutledge, 1999: Polarimetric radar observations and cloud modeling studies of low lightning producing convection in the Fort Collins flash flood. *Prepr. 11th Int. Conf. Atmospheric Electricity*, 7–11 June, Guntersville, Alabama, USA.
- Piepglass, M. V., E. P. Krider, and C. B. Moore, 1982: Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, **87**, 11193–11201.
- Poelman, D. R., 2010: On the science of lightning: An overview. *Publication scientifique et technique No 56*, Institut Royal Meteorologique de Belgique, 62 pp.
- Price, C., and D. Rind, 1994: Possible implications of global climate change on global lightning distributions and frequencies. *J. Geophys. Res.*, **99**, 10823–10831.
- Rakov, V. A., and M. A. Uman, 2003: *Lightning: Physics and effects*. Cambridge University Press, 687 pp.
- Reap, R. M., D. R. McGorman, 1989: Cloud-to-Ground lightning: Climatological characteristics and relationships to model fields, radar observations, and severe local storms. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 518–535.
- Reeve, N., and R. Toumi, 1999: Lightning activity as an indicator of climate change. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **125**, 893–903.
- Rust, W. D., D. R. McGorman, and S. J. Goodman, 1985: Unusual positive cloud-to-ground lightning in Oklahoma storms on 13 May 1983. *Prepr. 14th Conf. Severe Local Storms*, Indianapolis, IN, Amer. Meteor. Soc., 372–375.
- Sato, M., T. Ushio, T. Morimoto, M. Suzuki, A. Yamazaki, M. Kikuchi, R. Ishida, Y. Takahashi, I. Umran, Y. Hobara, Y. Sakamoto, and H. Ishikawa, 2011: Current status of JEM-GLIMS onboard ISS and expected science outputs. *Proc. Japan Geoscience Union Meeting*, 22–27 May, Makuhari, Chiba, Japan.
- Sist, M., F. Zauli, D. Biron, and D. Melfi, 2010: A study about the correlation link between lightning data and meteorological data. *Proc. 2010 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference*, 20–24 September, Cordoba, Spain.
- Soula, S., and S. Chauzy, 2001: Some aspects of the correlation between lightning and rain activities in thunderstorms. *Atmos. Res.*, **56**, 355–373.

- Ushio, T., Z.-I. Kawasaki, M. Akita, S. Yoshida, T. Morimoto, and Y. Nakamura, 2011: A VHF broadband interferometer for lightning observation. *Proc. XXX URSI General Assembly*, Istanbul, 15-18 August 2011.
- Wild, O., 2007: Lightning, chemistry and the impacts on climate. *Royal Meteorological Society National Meeting: The electrifying atmosphere*, 12 Dec., London, UK.
- Williams, E. R., R. Boldi, A. Matlin, M. Weber, S. Hodanish, D. Sharp, S. Goodman, R. Raghavan, and D. Buechler, 1999: The behavior of total lightning activity in severe Florida thunderstorms. *Atmos. Res.*, **51**, 245–265.
- Zemke, A. R., 1992: Temporal monitoring of VHF and LF atmospherics and their relation to lightning. Master Thesis, Tufts Univ. [available at <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA252617>]

RIFERIMENTI INTERNET

<http://www.fulmini.it/>
<https://www.nowcast.de/>
<http://www.meteo.cat/>
<http://www.metoffice.gov.uk/>
<http://www.zeus.iag.usp.br/>
<http://www.euclid.org/>
<http://wwlln.net/>
<http://earthnetworks.com/OurNetworks/LightningNetwork.aspx>
<http://thunder.msfc.nasa.gov/>
<http://trmm.gsfc.nasa.gov/>
<http://www.forte.lanl.gov/>
<http://www.eumetsat.int/Home/Main/Satellites/MeteosatThirdGeneration/>
<http://www.goes-r.gov/>
<http://www.vaisala.com/en/meteorology/products/thunderstormandlightningdetectionsystems/>