

Docenti e studenti a confronto su:

**LO STUDIO DELL' ARIA
E DEI FENOMENI ATMOSFERICI**
Osservare e sperimentare nella scienza.

Firenze, 19-20 aprile 2023

Menzioni d'onore

SEZIONE TESINE TRIENNIO

IL FULMINE GOVERNA OGNI COSA

Studenti

Bonasia Nicola - Mundo Piergiuseppe

Classe 4E

Istituto di Istruzione Superiore
Liceo Scientifico Galileo Galilei
Bitonto (BA)

Docente Coordinatore
De Marzo Salvatore

L'argomento trattato riguarda il fenomeno atmosferico dei fulmini. L'approccio a questo fenomeno nel corso della storia e la descrizione dei principi fisici che ne sono all'origine sono esposti in modo chiaro ed esauritivo. L'attività sperimentale, limitata a riprodurre e monitorare il processo di carica e scarica di un condensatore, è stata condotta con cura utilizzando la piattaforma Arduino.

RELAZIONE DEL DOCENTE

ScienzaFirenze 2023: “Lo studio dell’aria e dei fenomeni atmosferici”

IL FULMINE GOVERNA OGNI COSA

Il tema del convegno sullo studio dell’aria e dei fenomeni atmosferici ci ha portato immediatamente a confrontarci con l’argomento della formazione dei fulmini.

I due studenti che hanno svolto questo esperimento e redatto il relativo elaborato si sono subito dimostrati entusiasti di fronte al tema e alla possibilità di coniugarlo nell’argomento dell’Elettrostatica e in particolare i condensatori.

Il percorso è stato progettato assieme agli studenti, investendo alcune ore di didattica per approfondire le necessarie premesse teoriche e digitali che fanno comunque parte del programma di Fisica e di Informatica del quarto anno di liceo scientifico: al fine poi di effettuare una corretta trattazione dei dati, l’esperimento è stato preso come esempio all’interno di un percorso che l’intero gruppo-classe ha affrontato sullo studio della carica/scarica di un condensatore.

Per svolgere il progetto è stato scelto un esperimento semplice, che potesse essere condotto anche in un laboratorio non particolarmente attrezzato e che comportasse l’uso di attrezzature digitali con lo scopo di partecipare in sicurezza all’attività sperimentale. I ragazzi hanno condotto l’esperienza, hanno raccolto i dati e documentato con video e fotografie quanto accadeva.

Le difficoltà maggiori sono sorte nella stesura della tesina, in cui i ragazzi hanno dovuto tirare le fila del lavoro svolto e costruire una narrazione unitaria e coesa.

L’esperimento svolto ha consentito ai ragazzi di interiorizzare concetti base su cui si fonda la Fisica e la loro viva partecipazione è sicuramente un incentivo a proseguire in questa direzione nell’insegnamento dell’Informatica applicata alla Fisica, partendo dall’osservazione e dall’esperimento per poi comprendere appieno la teoria.

INDICE

INDICE	1
INTRODUZIONE.....	2
NOTE STORICHE	2
L'ELETTRICITÀ NELL'ATMOSFERA.....	8
LA NASCITA DI UN FULMINE	11
CARICA-SCARICA DI UN CONDENSATORE	13
<i>Richiami teorici</i>	13
<i>Il nostro circuito</i>	14
APPLICAZIONI DEL LAVORO IN AMBITO SCIENTIFICO E CULTURALE	16
<i>Cenni sui supercondensatori</i>	17
CONCLUSIONI	18
BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	19

IL FULMINE GOVERNA OGNI COSA

INTRODUZIONE

Vi siete mai chiesti da cosa sono prodotti i fulmini durante i temporali e come hanno fatto gli uomini a studiare questo strabiliante fenomeno naturale?

Quante volte vi sarete soffermati ad osservare dalla finestra la pioggia che cade durante un temporale? In quei momenti quanto stupore e timore allo stesso tempo può provocare in noi la visione di un fulmine improvviso!



L'uomo da sempre è attratto dai fenomeni che il cielo gli offre: una palla di fuoco che ogni giorno fa capolino dall'orizzonte, delle piccole lucine che la notte governano il manto celeste, fino ad arrivare negli ultimi anni ad oggetti oscuri (così come la nostra attuale comprensione nei loro confronti) che ingeriscono tutto ciò che è sotto il loro raggio d'azione e che sembrano essere i motori delle galassie, nonché porte verso altri mondi. C'è però un fenomeno che da secoli affascina l'uomo più di tutti, la paurosa congiunzione tra cielo e terra che si verifica durante un temporale, un bagliore che per frazioni di secondo divide in cielo in due e restringe le pupille: il fulmine. Il fulmine è un giovane che ama sorprendere così come giovane e mai esausta è la curiosità che l'uomo nutre nei confronti di questi rami elettrici che innervano il cielo.

I fulmini sono scariche elettriche che si sviluppano generalmente tra nuvole e terreno quando, per ragioni che verranno successivamente illustrate, la differenza di potenziale tra la superficie inferiore della nuvola ed il terreno raggiunge un valore sufficiente per vincere la resistenza elettrica offerta dall'aria che separa le due superfici.

L'esperimento proposto ha il fine di indagare i principi fisici nascosti dietro questo opulento fenomeno mediante una semplificazione del processo fisico ed un'indagine che sia quanto più chiara ed esaustiva possibile.

NOTE STORICHE

Il fulmine è uno dei più vistosi, appariscenti e spettacolari (oltre che frequenti) fenomeni naturali: si calcola che sul pianeta Terra si verifichino circa 16 milioni di temporali all'anno, ovvero 44 mila al giorno, con una caduta di circa 100 fulmini al secondo. Si tratta di uno sfavillante fenomeno atmosferico dovuto ad un gioco elettrico-atmosferico che si verifica ad ogni latitudine (con maggiore

incidenza nelle zone tropicali) e che da secoli incanta l'uomo, terrorizzato ma mai domo della sua curiosità (attratto dall'ignoto come è proprio della sua stessa natura). Solo durante il XVII secolo l'uomo ha potuto liberarsi dei singolari significati che in precedenza si attribuivano al fulmine dando vita nel XVIII secolo ai primi esperimenti scientifici per comprenderlo. Esperimento chiave nello studio del fenomeno fu quello condotto da Benjamin Franklin a Filadelfia nel 1752 che contribuì ad identificare la natura elettrica del fulmine.

Fin dall'antichità, alcuni strani comportamenti della materia hanno attirato curiosità e sono stati oggetto di varie speculazioni. In particolare in Grecia si era notato che alcuni materiali come l'ambra (*élektron*), una resina fossile proveniente dalle coste meridionali del mar Baltico e assai utilizzata come pietra ornamentale, se sfregata con un panno di lana, assumeva la proprietà di attirare corpuscoli leggeri come granelli di polvere, pagliuzze o piume. Questa elettricità con cui giocavano i Greci si chiama elettricità statica, ma loro si resero conto, inoltre, che esisteva un altro tipo di tale elettricità: strofinando un pezzo di resina si ottiene elettricità resinosa, strofinando un pezzo di vetro si ottiene elettricità vetrosa. I Greci osservarono che gli oggetti con lo stesso tipo di elettricità si respingevano mentre gli oggetti con due tipi opposti di elettricità si attraevano facendo esperimenti che testimoniavano l'importanza di questa nuova forza. **Aristotele** sosteneva che il fulmine era il risultato di un'esalazione secca che si liberava dalle nubi a seguito della condensazione dell'aria in acqua; tale esalazione era "espulsa dalla parte più densa della nube verso il basso così come i semi che schizzano dalle dita [quando cerchiamo di schiacciarli]"; l'urto dell'esalazione secca contro le nubi circostanti era invece la causa del tuono. "Se prima vediamo il fulmine", scrisse, "è perché la vista è più veloce dell'udito". Il filosofo greco era ancora distante dalla realtà fisica di ciò che produce il fulmine, ma la strada verso l'osservazione scientifica di ciò che per millenni era stato attribuito alla religione inizia a venire tracciata.

È facile intuire come l'uomo sia stato sempre affascinato dai fulmini, fin dalla preistoria. Nei tempi più remoti il fulmine era considerato come il massimo simbolo della potenza e, per altro verso, della collera divina. Era ben noto il pericolo mortale che correavano uomini, animali e cose, quando erano colpiti da un fulmine: era tuttavia noto che alla folgorazione si poteva sopravvivere così come un albero poteva non bruciare del tutto se colpito, contribuendo ad alimentare l'idea di un "tocco degli dei" che rendeva affascinante il fenomeno spingendone l'indagine e lo studio.

Gli Etruschi furono tra i primi ad indagare l'uso che le divinità facevano dei fulmini, lasciandoci speciali libri sacri portatori di una scienza occulta che comprendeva oscuri rituali. Grazie a Seneca (*Nat. Quaest. II 32 ss.*) e a Plinio il Vecchio (*Nat. Hist. II 135 ss.*) ci sono pervenuti degli estratti dai *libri fulgares* etruschi che ci hanno consentito di conoscere qualche traccia di quella che doveva

essere la loro minuziosa casistica. L'*ars fulminum* reinterpretata in chiave pragmatica dai romani aveva essenzialmente tre scopi: *exploratio* (esame accurato del fulmine), *interpretatio* (spiegazione e definizione del fulmine), *expiatio/procuratio* (scelta ed esecuzione dei più adeguati rituali di espiazione *ad propitiandos deos* ossia "per rendere propizi gli dei").

I fulmini erano classificati in diverse tipologie e non solo in base alla divinità che gli aveva scagliati. La dottrina fulgurale etrusca fu ereditata dai Romani che la fecero propria, almeno per quel che riguardava l'interpretazione del fulmine quale *signum* o *prodigium*, ovvero quale messaggio divino agli uomini, che a questi era dato di interpretare, a patto di fare le giuste osservazioni.

Gli antichi avevano paura dei fulmini e dei tuoni e cercavano pertanto di difendersene onorando le divinità ad essi preposte, in modo del tutto particolare Giove. Sappiamo da Svetonio (*Augustus*, 90) che persino l'imperatore Augusto era terrorizzato da tuoni e fulmini e spiegava tale terrore legandolo ad un episodio capitatogli in Spagna tra il 27 e il 25 a.C. quando, durante una marcia notturna, un fulmine aveva colpito, uccidendolo, uno schiavo che, reggendo una fiaccola, precedeva di pochi passi la sua lettiga. Augusto poco tempo dopo fece costruire a Roma, sul Campidoglio, un grande tempio dedicato a *Iuppiter Tonans* (Giove Tonante).

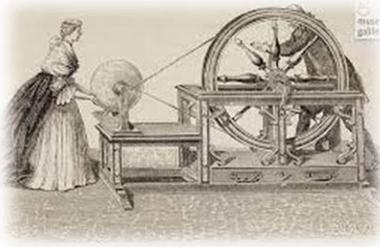
Secondo la letteratura fu **William Gilbert** (1544-1603), medico personale della regina Elisabetta I, il primo ad osservare i fenomeni elettrici in maniera "scientifica" proseguendo gli esperimenti dei Greci e mettendo in luce le somiglianze e le differenze tra elettricità e magnetismo: le somiglianze consistevano nell'esistenza di due tipi di elettricità (vetrosa e resinosa), e due tipi di magnetismo (polo Nord e polo Sud); le differenze consistono invece nella possibilità di poter separare un tipo di elettricità dall'altro: così come un oggetto può avere una carica di un tipo o di un altro, un magnete ha sempre un polo Nord e un polo Sud. Gilbert capì che solo certe classi di materiali potevano effettivamente interagire con i campi elettrici, segnando così la distinzione tra materiali isolanti e conduttori. Nel trattato *De magnetibus magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* Gilbert elencò una serie di corpi come il diamante, il vetro, lo zolfo, ecc. che se strofinati si comportavano come l'ambra, cioè si elettrizzavano, e chiamò "forza elettrica" l'azione che essi esercitavano, evidenziandone la differenza con quella magnetica prodotta dalle sostanze ferromagnetiche; su quest'ultime fece importantissime osservazioni suggerendo, tra l'altro, come la deviazione dell'ago della bussola potesse spiegarsi con il fatto che la terra si comportasse come un gigantesco magnete, con i poli magnetici posti in corrispondenza dei poli geografici.

Nel 1700 gli studiosi avevano ormai acquisito la capacità di realizzare esperimenti elettrici interessanti, riuscendo a generare elettricità, cioè effetti elettrici, in modi ingegnosi con congegni che sfruttavano l'attrito.

- ✓ Il fisico e borgomastro di Magdeburgo, **Otto von Guericke**, realizzò nel 1660 quella che si può considerare la prima “macchina elettrostatica” (a strofinio): essa era costituita da una semplice sfera di zolfo, *magnitudine ut caput infantis*, che veniva fatta girare con una manovella di legno intorno a un’asta di ferro passante per il suo centro ed elettrizzata dal semplice strofinio di una *palma satis sicca*. Mediante tale macchina Guericke osserva il crepitio e la luminescenza che accompagnano l’elettrizzazione del globo (*fuoco elettrico*).



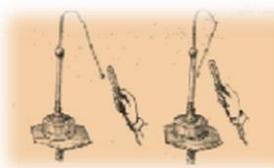
- ✓ Nel 1706 **Francis Hauksbee**, fisico sperimentatore presso la Royal Society, sostituisce nella macchina di Guericke il globo di zolfo con un cilindro di vetro (macchina di Hauksbee) posto in rapida rotazione da una puleggia e strofinato dalla mano raggiungendo stati di elettrizzazione più intensi e osservando che, avvicinando al viso il cilindro o altro corpo da questo elettrizzato, si avverte come un soffio (*vento o soffio elettrico*).



- ✓ Le macchine elettrostatiche vanno sempre più perfezionandosi negli anni successivi; alla mano viene sostituito un cuscinetto strofinatore e si comincia a raccogliere l’elettricità in un grosso cilindro metallico (*primo conduttore o catena*) mediante una catena metallica che sfiora o addirittura tocca il cilindro di vetro elettrizzato. Nel 1766 il costruttore **Jesse Ramsden** realizza un modello molto più efficiente (macchina di Ramsden): un disco di vetro girevole intorno ad un asse e stretto fra due coppie di cuscinetti di crine, rivestiti di cuoio e spalmati di bisolfuro di stagno, passa tra due conduttori, detti *pettini*.



- ✓ Il fisico inglese **Stephen Gray** facendo esperimenti con le macchine elettrostatiche si accorse che c’erano corpi in grado di trasportare la virtù elettrica (*conduttori*) e altri che invece mantenevano localizzato il fluido elettrico là dove era stato generato (*isolanti*).
- ✓ Nel 1733 il chimico francese **Charles Dufay** ripetendo gli esperimenti di Gray ipotizzò, a torto, l’esistenza di due diversi tipi di elettricità, *vetrosa (+)* e *resinosa (-)*, e per realizzare le misure che



gli erano necessarie realizzò alcuni strumenti: elettrometri a palline di sambuco o a foglie d’oro pendenti.

✓ Nel 1745, indipendentemente, il dilettante tedesco Ewald Georg von Kleist ed il fisico olandese di Leida, **Pieter van Musschenbroek**¹, inventarono il primo *condensatore elettrico*, la cosiddetta “bottiglia di Leida” capace di contenere una quantità di carica elettrica notevolmente superiore a quanto precedentemente ottenibile con la macchina di Ramsden e di ottenere le prime scintille elettriche. Nel 1746 il fisico tedesco J.H. Winkler scriveva *“Pare dunque che la scintilla elettrica, destata artificialmente, secondo materia, l’essenza e le apparenze, sia della stessa natura del baleno e dei lampi e del tuono, la differenza sta solo nella potenza o nella debolezza delle loro azioni”*.

Per verificare tale ipotesi, di cui era fermamente convinto, **Benjamin Franklin**, scienziato e politico americano, che già nel 1746-47 contrariamente a Dufay aveva ipotizzato l’esistenza di un solo fluido elettrico ossia l’elettricità di un tipo è generata da un eccesso di questo fluido (elettricità positiva) e quella dell’altro tipo dalla sua scarsità (elettricità negativa), e che aveva scoperto il potere



delle punte, nel 1749 ne propose un controllo sperimentale consistente nell’elevare dal suolo o meglio da alte torri o campanili, delle aste metalliche aventi superiormente una punta aguzza e appoggiate inferiormente a dei sostegni isolanti. Avvicinando ad esse una mano o per più sicurezza, un filo metallico tenuto con un sostegno

isolante e collegato al suolo, si sarebbero dovute trarre delle scintille. Nel 1752 realizzò l’*experimentum crucis*: durante un temporale lanciò in aria un aquilone munito di una punta metallica alla quale era attaccata una funicella di canapa (conduttrice) a sua volta legata ad un nastro di seta (isolante) da tenere in mano. Dove la funicella ed il nastro si congiungevano mise una chiave metallica. Quando avvicinò la sua mano alla chiave fu investito da una forte scarica elettrica. Attese che la chiave si ricaricasse e la collegò quindi ad una bottiglia di Leida e notò che essa poteva essere caricata di elettricità come se fosse collegata ad una macchina elettrostatica.

Aveva così dimostrato inequivocabilmente che le nubi erano portatrici di cariche elettriche e che il fulmine non era che la manifestazione del loro scaricarsi verso terra. Era un esperimento molto pericoloso, a un collega russo di Franklin, George Richmann, che lo realizzò nello stesso periodo, la scoperta che il fulmine è un fenomeno elettrico costò la vita: lo scienziato russo morì proprio

¹ mentre studiava, con i suoi assistenti, l’elettrizzazione dell’acqua tenendo in mano una bottiglia parzialmente riempita nella quale era immersa un’asticciola d’ottone collegata ad una macchina elettrostatica in funzione, egli prese in mano l’asticciola e ricevette una scossa elettrica molto violenta (“il braccio e tutto il corpo furono così atrocemente percossi che non riuscivo affatto a muovermi” - raccontò in seguito - “insomma, pensavo proprio che fosse giunta la mia ora”).

durante l'esecuzione dell'esperienza. Successivamente indagò sul segno delle cariche elettriche e trovò che normalmente le cariche delle nuvole sono negative, conformemente alle conoscenze attuali. Allo stesso scienziato è da attribuirsi l'invenzione del parafulmine il cui principio discende direttamente dalle sue idee².

Dopo le scoperte di Franklin numerosi scienziati si cimentarono nel determinare meglio la natura dell'elettricità atmosferica. A seguito di lunghe ricerche compiute tra il 1753 ed il 1781 il fisico torinese Giovanni Battista Beccaria trovò che in condizioni di calma atmosferica e di cielo sereno (*fair-weather*) l'atmosfera è elettrizzata positivamente, con cielo temporalesco si possono avere elettrizzazioni positive o negative.

Charles Augustin Coulomb nel 1785 notò che la carica di un oggetto viene dissipata a contatto con l'aria tanto più rapidamente quanto più è umida l'aria stessa. Così, seppur come corollario alla legge di repulsione elettrostatica alla quale stava lavorando, Coulomb scoprì la conduttività dell'aria, anche se la spiegazione relativa a questa proprietà arrivò solo un secolo più tardi con la scoperta dell'elettrone.

Nel 1836 il fisico Jean Peltier rilevò che la Terra può essere considerata come un conduttore avente carica negativa. Finalmente nel 1899 i fisici Julius Elster e Hans Friedrich Geitel formularono la teoria della ionizzazione dei gas con la quale si poté completare nel XX secolo la comprensione delle caratteristiche elettriche dell'atmosfera. Si dovette perciò attendere la fine del diciannovesimo secolo perché lo studio dell'elettricità atmosferica divenisse più sistematico, grazie alle scoperte e alle intuizioni in campo elettromagnetico da parte di Faraday e Maxwell, e all'avvento di nuovi apparati sperimentali. Il successivo avvento dei palloni sonda, accompagnato dalle scoperte di Thomson e Rutherford, circa elettroni e ionizzazione, diede un nuovo input alla ricerca.

Con l'avvento della fisica moderna, lo studio dell'elettricità atmosferica entrò in una nuova fase. Nei primi anni del ventesimo secolo fu formulata la teoria del circuito elettrico globale che servì da collante a tutte le precedenti misurazioni atmosferiche.

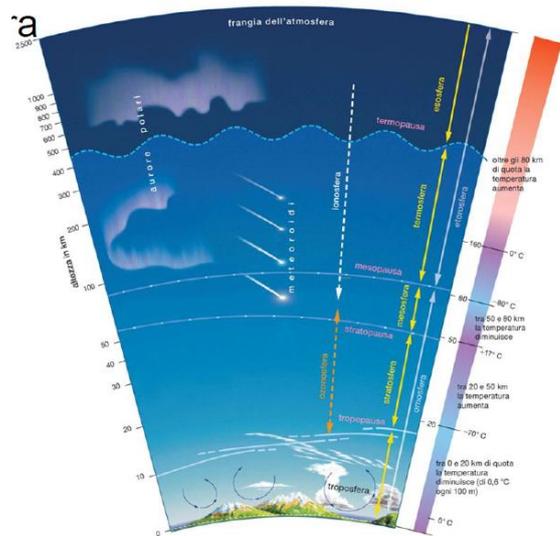
² "Pensai allora che, stando così le cose, la conoscenza di questo potere delle punte poteva essere utilizzata dal genere umano per difendere le case, le chiese, le navi, eccetera, dal fulmine, insegnandoci a porre sulle parti più elevate di queste edifici barre di ferro verticali, appuntite come aghi e dorate per evitare la ruggine, e conducendo, dalla base di tali barre, un filo che lungo l'esterno dell'edificio arrivasse sino a terra [...]. Non potrebbero allora queste barre appuntite estrarre silenziosamente il fuoco elettrico da una nube prima che esso sia così vicino da colpirci, e in tal modo difenderci da questo terribile e improvviso flagello?"

L'ELETTRICITÀ NELL'ATMOSFERA

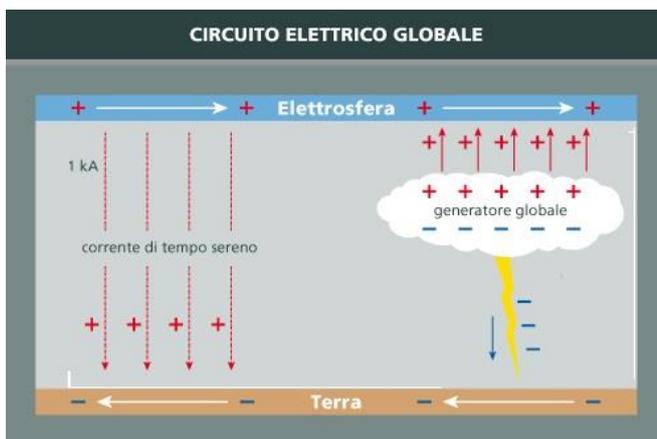
L'atmosfera ha caratteristiche diverse a mano a mano che ci si allontana dalla superficie della Terra.

In base alle variazioni di temperatura, di densità e di composizione si possono individuare cinque zone concentriche separate da intervalli di discontinuità detti pause:

- ❖ la troposfera
- ❖ la stratosfera
- ❖ la mesosfera
- ❖ la termosfera
- ❖ l'esosfera



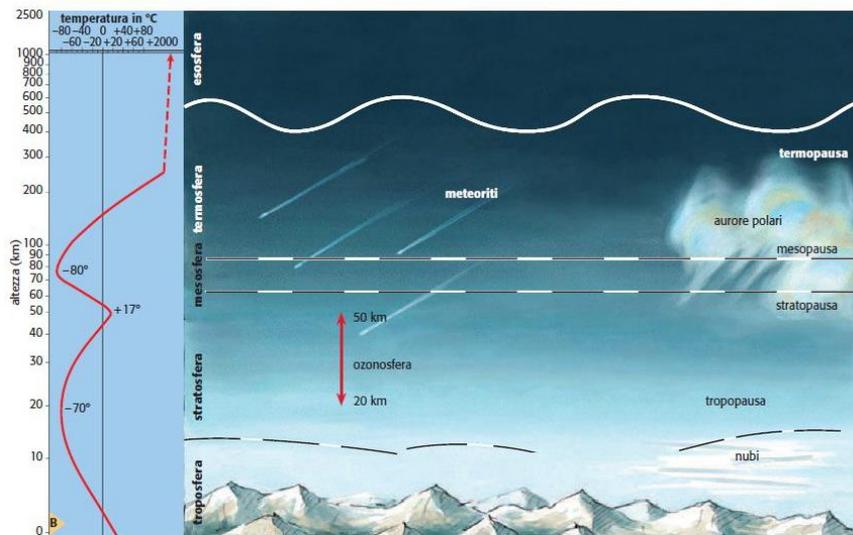
L'atmosfera terrestre è dotata di un campo elettrico, massimo in prossimità del suolo, minimo in alta quota, a livello della termosfera o ionosfera (80 km). Il terreno risulta carico negativamente



mentre l'alta quota positivamente. Come se fossimo in un condensatore, si genera un flusso di cariche elettriche, in questo caso di ioni, rivolto dall'alto verso il basso, per cui le cariche positive tendono ad annullare le cariche negative: si parla della corrente di bel tempo (a sinistra nell'immagine). La corrente di bel tempo tenderebbe dunque a rendere il terreno

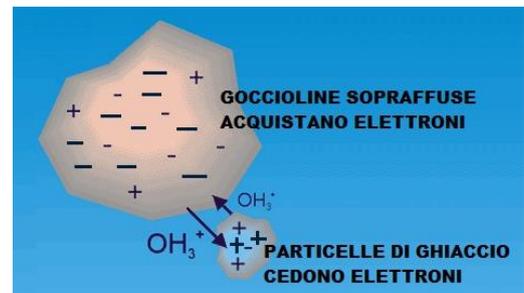
neutro, annullando il campo elettrico stesso, entro poche decine di minuti. In realtà, la differenza di potenziale che si misura fra la superficie della Terra e la ionosfera è compresa tra i 200.000 e i 500.000 volt, valori che comportano una densità di corrente estremamente bassa, di circa 2 pA/m² e il campo elettrico viene mantenuto. Ciò che riporta la differenza di potenziale ad un valore standard è l'effetto dei fulmini (a destra nell'immagine), che è come se restituissero le cariche negative al suolo.

I cumulonembi sono i principali protagonisti dei temporali. Come qualsiasi altra nube, il cumulonembo inizia a formarsi dall'ascesa di aria calda e umida, ma in questo caso i moti d'aria sono così intensi che il cumulo continua a crescere verticalmente, tanto che la sua sommità può raggiungere la tropopausa. A queste quote la temperatura è di alcune decine di gradi sotto lo zero, quindi la nube sarà formata da particelle di ghiaccio e goccioline sopraffuse (goccioline liquide che pur con temperature negative non ghiacciano).

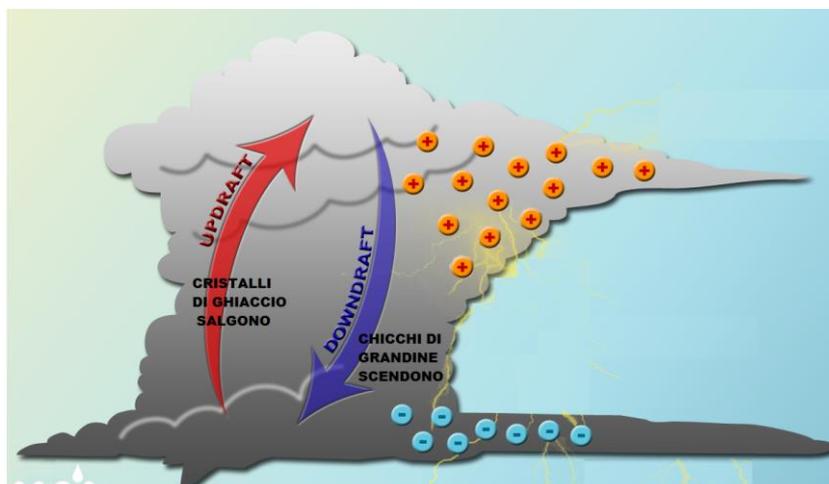


Le particelle di ghiaccio e le goccioline sopraffuse sono particelle diverse ma entrambe elettricamente neutre, ciascuna possiede cioè ugual numero di elettroni e protoni.

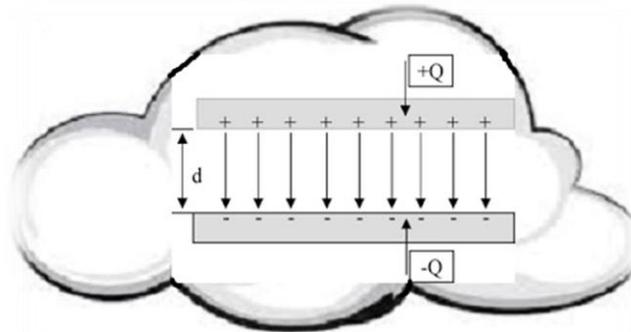
Correnti ascensionali di aria molto probabilmente causano una turbolenza che provoca una collisione reciproca tra i due tipi di particelle. Gli urti forniscono una quantità di energia cinetica sufficiente ad estrarre degli elettroni alle particelle di ghiaccio; gli elettroni liberi vengono poi acquistati dalle goccioline sopraffuse. Si viene quindi a creare un'alterazione nella distribuzione delle cariche man mano che le particelle vengono messe in movimento:



- le particelle di ghiaccio cedendo un elettrone si caricano positivamente (OH_3^+), assumendo la forma di cristalli di ghiaccio con dimensioni più piccole e che, più leggeri, tenderanno a spostarsi verso la sommità della nube;
- le goccioline sopraffuse acquistando un elettrone si caricheranno negativamente (OH^-) e si trasformeranno in grandine che, più pesante, scenderà verso la base della nube.



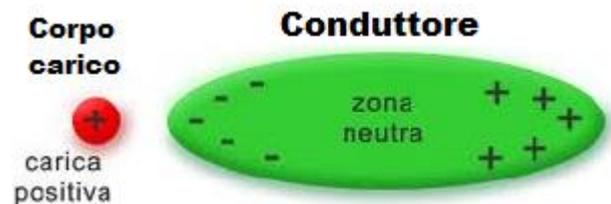
La nube risulta così formata da due poli di carica opposta, con una zona centrale di particelle ancora neutre; essa svilupperà perciò un comportamento analogo a quello di un condensatore:



Siccome il processo di carica risulta graduale, la d.d.p. tra le armature, direttamente proporzionale alla carica posta su di esse in base alla relazione $C = Q/\Delta V$, crescerà anch'essa gradualmente; quando si raggiungerà infine un valore limite di differenza di potenziale, in media $3 \cdot 10^6 \text{ V/m}^3$, sarà in grado di fluire una corrente di cariche tra le due armature e dunque all'interno della nube. Questo flusso di corrente per poter proseguire il suo percorso ha però bisogno di un materiale conduttore.

La Terra è un enorme conduttore in grado di immagazzinare una grande quantità di carica elettrica. In condizioni normali, il suolo risulta carico negativamente; questo avviene per effetto dell'induzione elettrostatica.

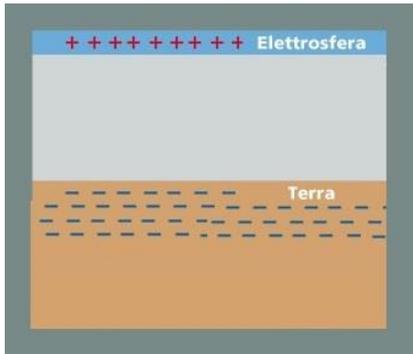
Supponiamo di avere un oggetto carico positivamente, a cui avviciniamo un conduttore neutro. Per la legge di Coulomb, gli elettroni del conduttore vengono attratti dalle cariche positive; essendo liberi di muoversi, si spostano nella zona più vicina all'oggetto carico. Il conduttore risulterà



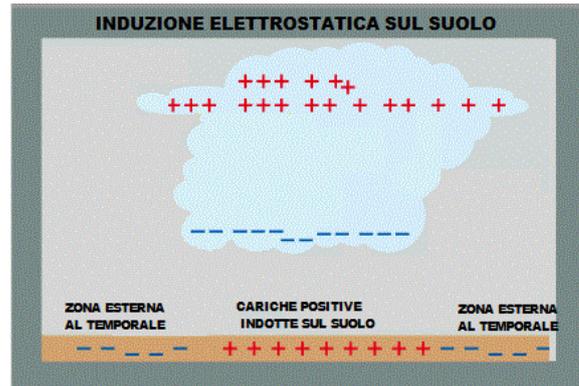
nel complesso neutro, ma la carica non sarà più distribuita in modo uniforme: troviamo carica negativa nella zona di concentrazione degli elettroni e carica positiva nella zona opposta. Per definizione, il fenomeno di induzione elettrostatica è proprio questa redistribuzione di cariche in un conduttore neutro, per effetto della vicinanza di un corpo carico.

³ il valore della rigidità dielettrica scende notevolmente, a valori inferiori a 0.3-0.4 MV/m, in presenza di umidità, di pulviscolo atmosferico o di altre impurità

Nel nostro caso, il suolo terrestre rappresenta una zona di concentrazione di elettroni attratti dagli ioni positivi presenti in alta quota, a livello di elettrosfera. La formazione di un cumulonembo può tuttavia scombinare ulteriormente la distribuzione di cariche. In modo analogo, la presenza di cariche negative alla base del cumulonembo, induce un allontanamento degli elettroni concentrati sul suolo terrestre, respinti da cariche dello stesso segno. Si verifica perciò per tutta la



superficie terrestre immediatamente sotto il cumulonembo la concentrazione di carica positiva, dovuta all'attrazione di cariche di segno opposto. Questa zona di cariche positive si sposta insieme alla nube mentre la zona esterna alla superficie coperta dal cumulonembo resta carica negativamente.

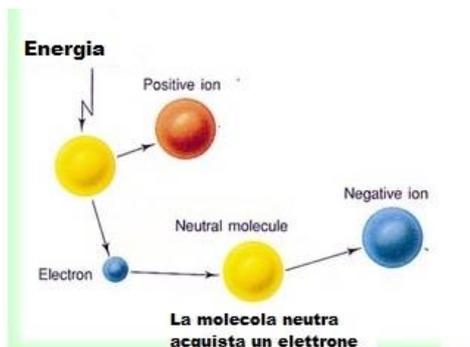


Lo sviluppo di un fulmine da un cumulonembo è un processo di scarica elettrica che si compone di vari passaggi consecutivi, tra cui come noto l'esplosione del tuono e lo scatto del lampo.

Dal tempo che intercorre tra la visione del lampo e il momento in cui si sente il tuono si può capire a che distanza si trova il temporale. Infatti, mentre il lampo si vede immediatamente (la luce percorre 1 km in circa 0,000003 s), il rombo del tuono impiega circa tre secondi per percorrere un chilometro. Per avere un'idea della distanza (in km) dal punto in cui si è avuto il fulmine è sufficiente dividere per 3 l'intervallo di tempo (espresso in s) tra la visione del fulmine e la percezione del suono. Se dopo il lampo non si sente il tuono significa che il temporale si trova quasi certamente a più di 25 km di distanza.

LA NASCITA DI UN FULMINE

L'aria normalmente è un materiale isolante, perché le molecole che la formano si trovano allo stato



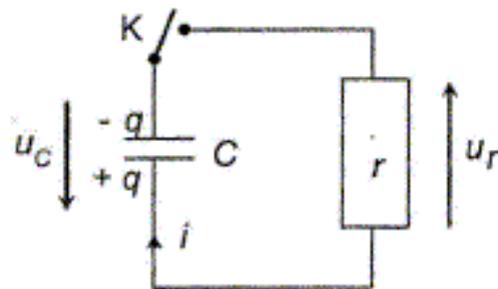
neutro. L'energia prodotta dalla nube è però in grado di ionizzare l'aria (rottura del dielettrico): l'energia è sufficiente a strappare degli elettroni ad alcune molecole d'aria che diventano ioni positivi; questi elettroni vengono catturati da altre molecole ancora, che formano invece ioni negativi. Il campo elettrico proveniente dalla nube accelera poi gli ioni,

fornendo loro un'energia cinetica superiore all'energia di estrazione degli elettroni, e di

conseguenza con gli urti sono gli elettroni stessi che producono un'ulteriore ionizzazione delle particelle d'aria.

Una prima fonte di energia è la nube che funziona come batteria carica, ma poi da una prima scarica di energia ionizzante si ha un processo di scarica a valanga, con le particelle d'aria che vengono ionizzate una dopo l'altra, seguendo un percorso a zig-zag.

Questa scarica "pilota" va a creare un canale di aria ionizzata che funge da canale conduttore. Il canale conduttore permette un passaggio di corrente elettrica tra zone di accumulo di carica opposta. Il circuito elettrico che si viene a creare è equivalente a quello nella figura sottostante:



La corrente elettrica di scarica è dovuta sia a cariche negative, sia a cariche positive: per questo vengono distinti vari tipi di fulmine in base al segno della carica di partenza e a quello della carica di arrivo, per cui si avranno fulmini ascendenti positivi o negativi e fulmini discendenti positivi o negativi.

Ci sarà inoltre una distinzione dipendentemente dai corpi coinvolti: se la scarica parte dalla nube in

direzione del suolo, i fulmini saranno "fulmini nube-suolo", se procede in direzione di un'altra nube saranno "nube-nube" (o "internube"), verso l'aria circostante fulmini di tipo "nube-aria".



In generale i fulmini più studiati sono i fulmini nube-suolo, che partono dalla base del cumulonembo caricata negativamente per giungere al suolo caricato positivamente, tramite un canale di aria ionizzata esterno alla nube; in realtà pur essendo i più pericolosi non sono questi i più comuni.

I più frequenti sono infatti i fulmini che si esauriscono all'interno della nube stessa: partono dalla base negativa per giungere alla sommità positiva tramite un canale conduttore interno alla nube.

Più raramente succede che un fulmine parta dalla zona carica di una nube alla zona di carica opposta della nube adiacente. Infine esistono altri tipi di fulmini rari o molto particolari:

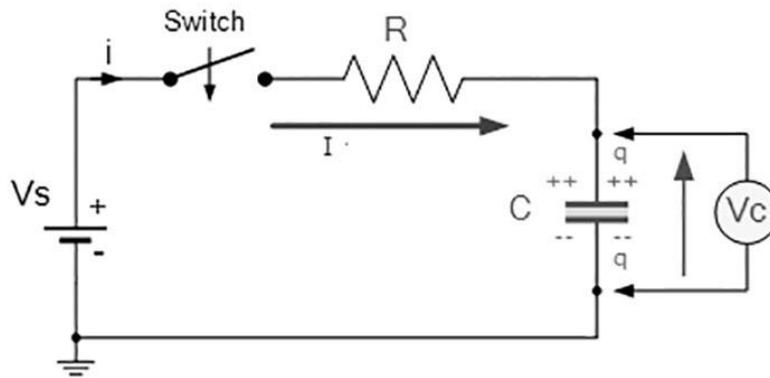
1. fulmine “nube-aria” (*red sprites*) che transita da una zona carica della nube alla zona di carica opposta presente nell’atmosfera circostante
2. fulmine globulare (*ball lightning*) che ha luogo quando parte della carica elettrica di un fulmine nube-suolo prende la forma di una “palla” di plasma molto luminosa (con un diametro di 20-30 cm) che scende dalle nubi temporalesche contemporaneamente alla scarica del fulmine e sembra che “fluttui” lentamente attraverso l’aria
3. fuoco di S. Elmo ossia scintille azzurrognole che si formano, sulle estremità di oggetti appuntiti vicini al temporale (alberi di nave, cime di piante d’alto fusto, guglie, ecc.), quando l’accumulo di cariche opposte non è sufficiente a far scoccare un fulmine; prende il nome dal santo patrono dei naviganti.

DATI CARATTERISTICI MEDI DI UN FULMINE NUBE-SUOLO	
Lunghezza	anche decine di km
Larghezza	poco più di una matita
Differenza di potenziale	diverse centinaia di milioni di volt
Carica totale depositata da un fulmine	5-10 coulomb
Corrente	il valore medio è di 20.000 A, ma si può avere un range di valori da 2kA fino a 200kA, per i fulmini negativi (quelli positivi, più rari e meno conosciuti, sono ancora più potenti)
Temperatura	33.000°C
Velocità	anche un terzo della velocità della luce
Tempo	la scarica leader raggiunge il punto di congiunzione in 20 millisecondi, la scarica di ritorno in 70 millisecondi raggiunge la nube
Rumore del tuono	può essere sentito fino a 20-25 km di distanza

CARICA-SCARICA DI UN CONDENSATORE

Richiami teorici

Il circuito RC consiste in un generatore di corrente continua (V_s) collegato in serie ad un resistore di resistenza R e un condensatore di capacità C ; inoltre è necessario un interruttore per aprire e chiudere il circuito e misurare la carica e la scarica del condensatore, in funzione del tempo, attraverso la misura della d.d.p. ai suoi capi V_c .



A interruttore aperto, la d.d.p. ai capi del condensatore è nulla. Appena viene chiuso il circuito, essa inizia ad aumentare secondo una legge esponenziale crescente.

Durante la carica, nel circuito circola una corrente che diminuisce nel tempo, perché il campo elettrico interno del condensatore si oppone al passaggio di cariche. Più il condensatore si carica, cioè più aumenta la d.d.p. tra le sue armature, e più il campo elettrico è intenso. Quando la differenza di potenziale fra le armature del condensatore uguaglia il valore della differenza di potenziale erogata dal generatore, la corrente si annulla del tutto. A questo punto, anche se il circuito è chiuso, al suo interno non circola alcuna corrente elettrica.

$$V_c(t) = V_s \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

Una volta caricato, un condensatore si comporta come una sorta di “serbatoio” di energia, che può essere restituita durante il processo di scarica. Se si apre il circuito ed è presente una messa a terra, la carica del condensatore passerà verso il punto a potenziale inferiore, di conseguenza la d.d.p. diminuirà secondo una legge esponenziale decrescente:

$$V_c(t) = V_s \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$$

La scala di tempo sulla quale si svolge questo processo è data dalla costante di tempo:

$$\tau = RC$$

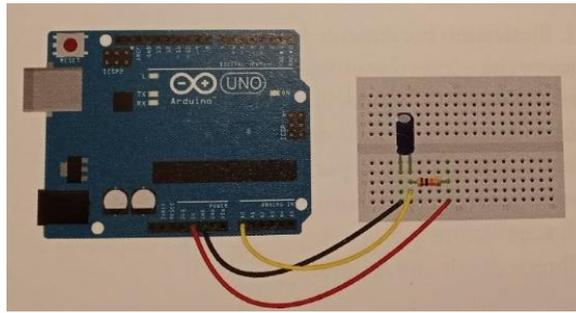
Dopo un tempo pari a circa 5τ la carica o la scarica del condensatore si può ritenere conclusa!

Il nostro circuito

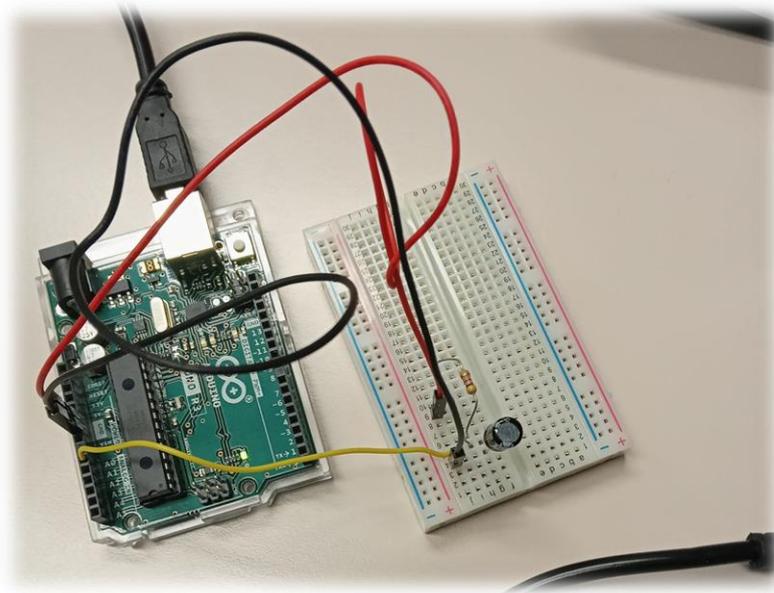
Per simulare il processo di carica e scarica di un condensatore abbiamo deciso, a causa dell’inutilizzabilità di diverse attrezzature nel Laboratorio di Fisica, di impiegare una scheda Arduino UNO con i seguenti componenti:

- una *breadboard*;
- un resistore da 10 k Ω ;
- un condensatore elettrolitico da 100 μ F;
- *jumper* di colori diversi per i collegamenti;

- un notebook per la scrittura del programma (*sketch*) e la visualizzazione (*Serial plotter*) dell'andamento temporale della tensione.



Il circuito è stato implementato sotto la guida (N.B. il piedino più corto della capacità di tipo elettrolitico deve essere collegato al pin GND mentre l'altro va connesso a uno dei terminali della resistenza e al pin A0) del nostro docente di Informatica nel modo seguente



La nostra V_s è la tensione di 5 V fornita dalla scheda Arduino mentre V_c viene misurata dal pin analogico A0 (jumper giallo). Il jumper rosso funge da interruttore poiché prima lo colleghiamo al pin 5V (carica) e poi in uno dei pin GND (scarica).

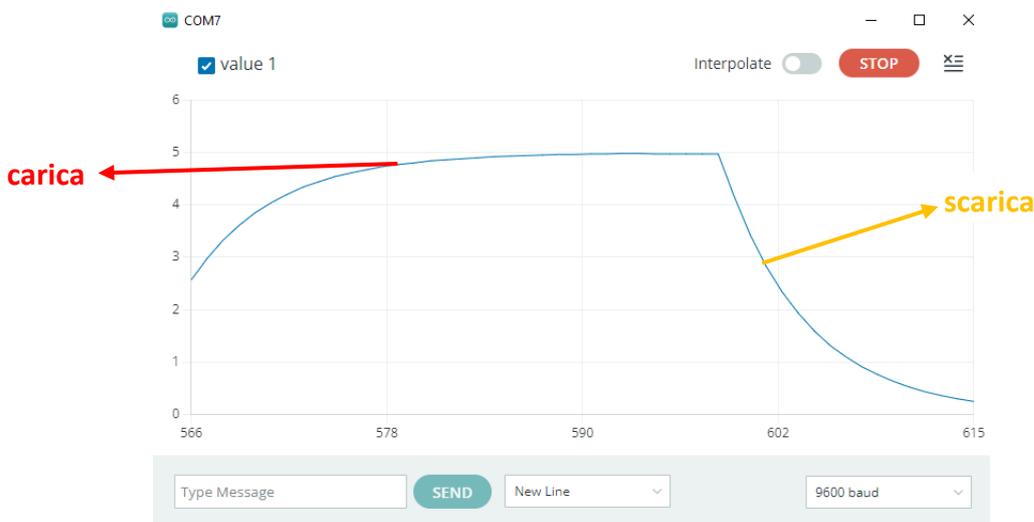
Per far misurare correttamente ($\tau = 1$ s) la ddp ai capi del condensatore abbiamo scritto il seguente sketch:

```

RC | Arduino IDE 2.0.3
File Edit Sketch Tools Help
Arduino Uno
RC.ino
1 void setup() { // Ogni sketch contiene questa riga
2 Serial.begin(9600); // Attiva la comunicazione col computer con tipica velocità di 9600 baud
3 }
4 void loop() { // Anche questa riga è presente in ogni sketch e ha la funzione di fornire
5 // alla scheda istruzioni da ripetere ciclicamente
6 Serial.println(analogRead(A0)*5./1023); // analogRead è una "funzione" che dà istruzione alla scheda
7 // di leggere la tensione presente nel pin analogico A0 e la "trasforma" in volt
8 // Serial.println comanda di trasferire al computer il dato tra
9 // parentesi, visualizzandolo con lo Strumento "Monitor seriale"
10 // (In sta per "line" - cioè "ogni dato in una riga diversa")
11 delay(100); // Comanda ad Arduino di attendere il tempo (in ms) specificato
12 }

```

ottenendo il seguente grafico:



APPLICAZIONI DEL LAVORO IN AMBITO SCIENTIFICO E CULTURALE

Il nostro pianeta ha sempre una carica negativa, mentre l'intensità del campo elettrico vicino alla superficie terrestre è di circa 100 V/m, è dovuto alle cariche della Terra e poco dipende dal periodo dell'anno e del giorno, ed è quasi lo stesso per ogni punto sulla superficie terrestre. L'aria che circonda la Terra ha cariche libere che si muovono nella direzione del campo elettrico terrestre. Ogni centimetro cubo d'aria vicino alla superficie terrestre contiene circa 600 paia di particelle cariche positivamente ed elettricamente. Con la distanza dalla superficie terrestre, la densità delle particelle cariche nell'aria aumenta. In prossimità del suolo, la conducibilità dell'aria è bassa, ma a una distanza di 80 km dalla superficie terrestre aumenta di 3 miliardi di volte e raggiunge la conducibilità dell'acqua dolce.

Pertanto, in termini di proprietà elettriche, la Terra con l'atmosfera circostante può essere rappresentata come un condensatore sferico di dimensioni colossali, le cui piastre sono la Terra e uno strato conduttore d'aria situato ad una distanza di 80 km dalla superficie terrestre. Tra le piastre

di tale condensatore, la tensione è di circa 200 kV e la corrente che passa sotto l'influenza di questa tensione è di 1,4 kA. La potenza del condensatore è di circa 300 MW. Nel campo elettrico di tale condensatore, nell'intervallo da 1km a 8km dalla superficie terrestre, si formano nuvole temporalesche e si verificano fenomeni temporaleschi.

È possibile pertanto convertire l'energia elettrica del fulmine in energia prontamente immettabile nella rete elettrica: non si tratta di una vera e propria conversione quanto di adattamento dato che i parametri "standard" di un fulmine sono molto elevati ed esaurirebbero in pochi secondi tutte le apparecchiature tecnologiche. Pertanto, nel sistema vengono introdotti potenti condensatori (come quello da noi costruito ma più potente), trasformatori e vari tipi di convertitori al fine di adattare questa energia alle condizioni di utilizzo richieste nelle reti e dalle apparecchiature elettriche.

I vantaggi derivanti da questo tipo di applicazione sono molti:

- ✚ il supercondensatore Terra-ionosfera viene costantemente ricaricato con l'aiuto di fonti di energia rinnovabile quali il Sole e gli elementi radioattivi della crosta terrestre;
- ✚ questo tipo di centrali non rilasciano alcun tipo di agente inquinante nell'ambiente;
- ✚ i palloncini usati per catturare i fulmini si trovano ad altezze elevate e pertanto non sono visibili ad occhio nudo (non deturpando il paesaggio)

Cenni sui supercondensatori

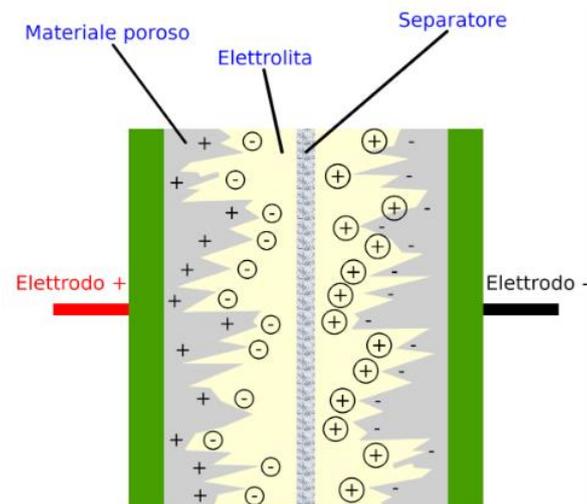
Il supercondensatore è una nuova tipologia di componente elettronico che ha lo scopo di accumulare un'enorme quantità di energia. Esso risulta decisamente diverso da un condensatore tradizionale e differisce anche da una batteria ricaricabile. La sua caratteristica principale è quella di essere a doppio strato, attributo che ne permette una impressionante capienza di carica elettrica. Esso è l'unico tipo di condensatore che utilizza un doppio strato elettrochimico (EDL) per fornire una capacità mille volte maggiore dei normali componenti.

Il condensatore elettrochimico a doppio strato, meglio conosciuto come supercondensatore o ultracondensatore, è prevalentemente utilizzato come accumulatore di energia.

Ha una densità di energia straordinariamente alta se confrontato con i condensatori convenzionali, tipicamente nell'ordine delle migliaia di volte superiore rispetto ad un elettrolitico ad alta capacità. Al fine d'immagazzinare tanta energia elettrica, il supercondensatore o *supercap* basa il suo funzionamento sul suo doppio strato elettrico (vedi figura in basso). Non c'è reazione chimica, pertanto la sua durata utile è, praticamente illimitata. Proprio per questo, il processo di accumulo di energia è reversibile, e può essere caricato e scaricato ripetutamente milioni di volte, senza alcuna conseguenza. Oltre che gestire un'enorme quantità di energia, essi sono caratterizzati da una grande

densità di quest'ultima, il che consente piccoli ingombri a parità di carica rispetto ad altri componenti. Un supercondensatore ha un'altissima capacità di accumulo per due motivi sostanziali:

- le sue armature hanno un'area molto grande;
- la distanza tra esse è molto ridotta, poiché il separatore funziona in modo alquanto diverso da un dielettrico convenzionale.



La capacità di un condensatore, lo ricordiamo, è direttamente proporzionale all'aumentare dell'area delle piastre e inversamente proporzionale alla distanza tra le piastre stesse secondo la seguente formula:

$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

Caricando in parallelo i due condensatori alla tensione di 2,7 V gli effetti della corrente in transito e della relativa scarica sarebbero devastanti e la potenza dissipata enorme tanto da sconvolgere anche la chimica dei materiali: il lavoro generato sarebbe di circa 13.466 J!

Questa tecnologia, che prende spunto dal ben più semplice modello da noi proposto in laboratorio, applicata all'interno di centrali che modulino la potenza del fulmine, è capace di trarre energia da quest'ultimo e di costituire un'arma in più nell'arsenale delle energie rinnovabili accanto alla fotovoltaica e all'eolica per combattere il cambiamento climatico.

CONCLUSIONI

Grazie a questa esperienza ci siamo posti, per la prima volta, di fronte alla Fisica come protagonisti, non limitandoci allo studio teorico della legge ma scoprendo anche tutto ciò che vi è dietro: la storia, il tempo e lo spazio dedicati allo svolgimento di un esperimento, il dover affrontare inaspettate

difficoltà e considerare i minimi dettagli, l'analisi e l'elaborazione dei dati ottenuti, per giungere infine alla conferma di una legge.

Con questo esperimento ci siamo posti l'obiettivo di ottenere sperimentalmente le relazioni che descrivono l'andamento della tensione e della corrente in un processo di carica/scarica di un condensatore attraverso la scheda Arduino. Poiché sprovvisti di conoscenze matematiche avanzate (derivate e integrali) che saranno oggetto di studio del prossimo anno scolastico, abbiamo sfruttato l'algoritmo risolutivo della scheda ARDUINO. Questo esperimento ci ha dunque portato ad affrontare numerose difficoltà, sia strumentali (la mancanza di alcune componenti nel Laboratorio di Fisica) sia teoriche (la discussione di un argomento complesso che necessita di calcoli tortuosi) facendoci giungere tuttavia al risultato agognato e comportandoci come dei veri fisici sperimentali. Il lavoro di uno scienziato consiste in gran parte nel superamento delle condizioni avverse, di varia natura, che si pongono sul suo cammino. Motto dello scienziato, nonché apoftegma che abbiamo fatto nostro durante le ore trascorse in laboratorio è stato "provando e riprovando" dello scienziato pisano che dà il nome al nostro Istituto e di cui abbiamo incarnato pienamente lo spirito grazie a questa "sensata esperienza". Abbiamo affinato le nostre doti creative, abbiamo rotto regole, fatto errori, ci siamo divertiti e siamo cresciuti, trasformando gli ostacoli in possibilità di progresso.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- ✓ Burroughs W.J., Crowder B., Robertson T., Vallier-Talbot E., Whitaker R., *Weather*, edizione italiana: I libri della Natura-Meteorologia, a cura di L. Mercalli, editore Istituto Geografico DeAgostini 1997
- ✓ Reynolds R., *Weather*, edizione originale Dorling Kindersley Ltd, London, edizione italiana Guide pratiche Mondadori- Meteorologia, in collaborazione con il Met Office, Asterisco srl Mondadori, Milano 2010
- ✓ Amaldi U., *Introduzione alla Fisica*, Zanichelli editore, Bologna 2004
- ✓ Mandolini S., *Le parole della fisica*, Zanichelli editore, Bologna 2012
- ✓ Organtini G., *Fisica con Arduino*, Zanichelli editore, Bologna 2020
- ✓ Bagatti F., Corradi E., Desco A., *Scopriamo la chimica*, Zanichelli editore, Bologna 2015
- ✓ Segrè E., *Personaggi e scoperte della Fisica classica*, Oscar Saggi Mondadori, Milano 2007
- ✓ <https://lospettacolodeifulmini.wordpress.com/>
- ✓ <http://www.centrometeo.com/articoli-reportage-approfondimenti/fisica-atmosferica/4298-tuoni-fulmini-atmosfera>