

La velocità degli elettroni nelle correnti elettriche sui conduttori.

A cura di Gianfranco Verbana

Nei corsi di fisica del secondo biennio delle medie superiori, quando si studia l'elettrodinamica, impariamo che la corrente elettrica circola sempre in un percorso chiuso che inizia da un polo del generatore, per convenzione positivo, e si richiude all'altro polo negativo. È nel senso comune di molti percepirla come un flusso di elettroni che scorre nel conduttore di metallo, rafforzata anche dall'analogia meccanica (non realistica) con un flusso d'acqua in una tubazione spinto da una pompa idraulica. Questa falsa semplificazione della corrente elettrica, funziona per il proseguo degli studi sulla teoria dei circuiti elettrici ma, è assolutamente fuorviante per chi ha interesse e passione a capire le onde radio.

Iniziamo subito, eliminando la locuzione "Flusso di corrente" che sebbene sia usata è sbagliata poiché:

La corrente elettrica è un movimento, di cariche sia positive che negative.

Per convenzione, si sceglie come verso positivo della corrente quello in cui fluisce la carica positiva, indipendentemente dal segno delle particelle cariche in moto¹.

Abbiamo:

- 1) Nei conduttori metallici e nei tubi termoionici la corrente è sempre dovuta a portatori di carica negativi (elettroni).
- 2) Nei semiconduttori puri appena si forma una carica negativa (elettroni) si crea una carica positiva (lacune), sempre in ugual numero ($N=P$) in funzione della temperatura assoluta. Nei semiconduttori drogati di tipo P, i portatori maggioritari di corrente, sono lacune e elettroni per quelli drogati tipo N.
- 3) In alcuni casi – gas e elettrolitici la corrente è portata da cariche sia positive (anioni) che negative (cationi).
- 4) La corrente è sempre portata da sole cariche positive, nel caso di un flusso di protoni in un tubo acceleratore di particelle.

Normalmente si passa dall'elettrostatica all'elettrodinamica inserendo un conduttore ai capi di un campo elettrico sostenuto da una differenza di potenziale. Le cariche immerse nel campo elettrico sono sottoposte a una forza con conseguente accelerazione proporzionale alla tensione. Le cariche però si muovono in un reticolo cristallino del metallo e, dopo un certo percorso urtano, disperdono energia (riscaldamento del filo), diminuiscono di velocità, ma poi

sono nuovamente accelerate dal campo elettrico esterno. Si muovono a Zig- Zag come fossero in un fluido sempre più denso con quanto meno è conduttore il metallo. Il risultato è che, invece dell'accelerazione, è la velocità media delle cariche a essere proporzionale alla tensione. Un elettrone per ogni atomo presente nel conduttore di rame. La rapidità del più alto numero di cariche elettriche che attraversa la superficie di un conduttore è definita come corrente elettrica.

La corrente che attraversa la sezione di un conduttore è la velocità media della la densità delle cariche elettriche (vedi dimostrazione, Eq-4, in appendice).

Il rapporto tra la forza che attrae (tensione= volt) e il moto di cariche nell'unità di tempo (corrente=ampere), V/I , rappresenta chi rallenta, chi frena la velocità media delle cariche data una forza elettrica ed è nota come Resistenza elettrica². Mentre il prodotto tra la forza V e la corrente I è la potenza fornita (watt) per compiere il lavoro di muovere le cariche, nell'unità di tempo. Siamo esattamente allo stesso principio fisico di un corpo in caduta libera da un aereo dove la velocità, contrastata dall'atmosfera, rimane costante ³. L'azione frenante è la resistenza dell'aria da qui il nome resistenza elettrica per le cariche elettriche nei metalli. Questa è in soldoni la cosiddetta legge di Ohm che ci hanno insegnato e usiamo. Mentre abbiamo come senso comune il valore degli ampere poco o nulla è noto a che velocità di cariche corrispondono. Ebbene questa velocità è lentissima peggio delle lumache: poche decine di centimetri in un'ora per correnti di unità di ampere.

In una sezione di filo cilindrico di un mm^2 **con una corrente continua di un ampere la velocità media di spostamento è di 26,5 cm/h = 6,36 metri in 24 ore** (Vedi appendice). Decuplicando la corrente a 10 ampere e usando un filo di rame di 4 mm^2 , si arriva a una velocità di 66 cm/h.

Quando accendiamo i fari della nostra auto, gli elettroni liberi presenti sui poli della batteria arrivano dopo ore alla lampadina del fanale.

Forse non tutti sanno **che questo flusso di cariche sul percorso elettrico conduttivo è presente solo in corrente continua.**

È noto a tutti che la direzione delle cariche negative è sempre verso la forza elettrica di attrazione (tensione) positiva. In tensione alternata dove i poli positivo e negativo si alternano in un periodo cosa succede?

Gli elettroni si spostano verso una direzione di una quantità durante la semionda positiva e della stessa quantità nella direzione opposta durante la semionda negativa: in un periodo **la loro posizione rimane mediamente la stessa come fossero stati fermi.**

La velocità media su un periodo è uguale a zero, infatti noi diciamo che la corrente media ottenuta da una tensione sinusoidale a valore medio nullo, è uguale a zero.

Gli elettroni si muovono di un moto armonico di frequenza pari a quella del generatore ⁴. La velocità media e lo spostamento su un periodo è uguale a zero **come lo è quella di un corpo fatto oscillare attaccato ad una molla, anche in presenza di attrito viscoso.**

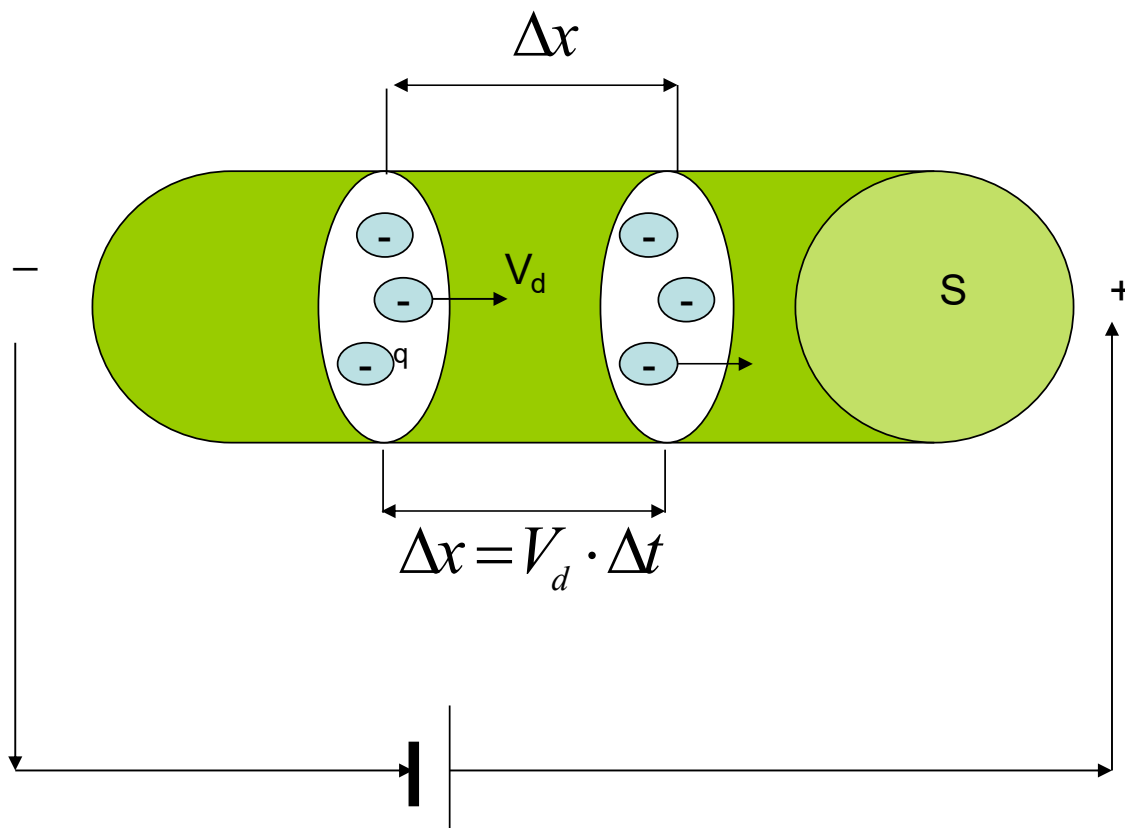
In corrente alternata gli elettroni non vanno da nessuna parte: rimangono mediamente nella stessa posizione.

In un conduttore attraversato da corrente alternata a valore medio nullo, non esiste nessuna circolazione di cariche elettriche.

Una lampadina si illumina immediatamente perché gli elettroni liberi sono già presenti nel filamento, essi si agitano, vanno in turbolenza, entrano in fibrillazione a zig, zag, urtando con tutti gli altri elettroni appiccicati all'atomo, per l'arrivo di una forza di campo elettrico che si propaga come uno tsunami, dal generatore al carico, con una velocità di quasi un **miliardo di chilometri all'ora**. Il tempo più lungo di attesa è l'inerzia del filamento a raggiungere la temperatura di incandescenza.

Appendice.

Calcoliamo la velocità delle cariche conoscendo il valore di: corrente, sezione e tipo di metallo conduttore. Rappresentiamo una sezione di conduttore cilindrico uniforme di sezione S.



I portatori di carica si muovono con velocità V_d (in m/s), lo spazio Δx (in metri) che essi percorrono nel tempo è:

$$\Delta x = V_d \cdot \Delta t \quad \text{m} \quad (1)$$

Se chiamiamo n , il numero di elettroni liberi che viaggiano attratti dalla forza elettrica (non per niente si chiama elettro motrice) verso il polo positivo, il numero di cariche nel volume, Δx per la sezione S (in m^2), sarà:

$$n \cdot S \cdot V_d \cdot \Delta t \quad (2)$$

Se definiamo l'intervallo di tempo, Δt , in un intervallo di distanza, Δx , la quantità di carica ΔQ è uguale:

$$\Delta Q = (n \cdot S \cdot V_d \cdot \Delta t)q \quad (3)$$

Dove q è la quantità di carica di un elettrone: $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb.

Se dividiamo ambedue membri dell'equazione (3) per l'intervallo Δt , durante il quale avviene il flusso di cariche si ottiene la corrente media⁵ nel conduttore che come abbiamo detto è **la velocità per la densità di cariche nel conduttore**:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = n \cdot q \cdot S \cdot V_d \quad \text{ampere (4)}$$

La velocità di deriva risulta:

$$V_d = \frac{I}{nqS} \quad \text{m/s} \quad (5)$$

Ricaviamo il numero di cariche libere, n , in un metro cubo di rame.

Dalla tavola periodica degli elementi conosciamo la massa molare (peso atomico) del rame: $M = 63,5$ g/mol.

Sappiamo che la sua densità $p = 8,95$ g/cm³ quindi possiamo calcolare il volume occupato dai 63,5 grammi di rame:

$$V_{\text{olume}} = \frac{M}{p} = \frac{63,5}{8,95} = 7,09 \text{ cm}^3 / \text{mol}$$

Ricordiamoci che una mole di qualsiasi sostanza dell'universo contiene un numero di atomi pari al numero di Avogadro: 6.02×10^{23} atomi.

Sapendo che nel rame il numero delle cariche libere è una per ogni atomo, il numero di cariche libere nel rame, n , per ogni centimetro cubo di rame sarà:

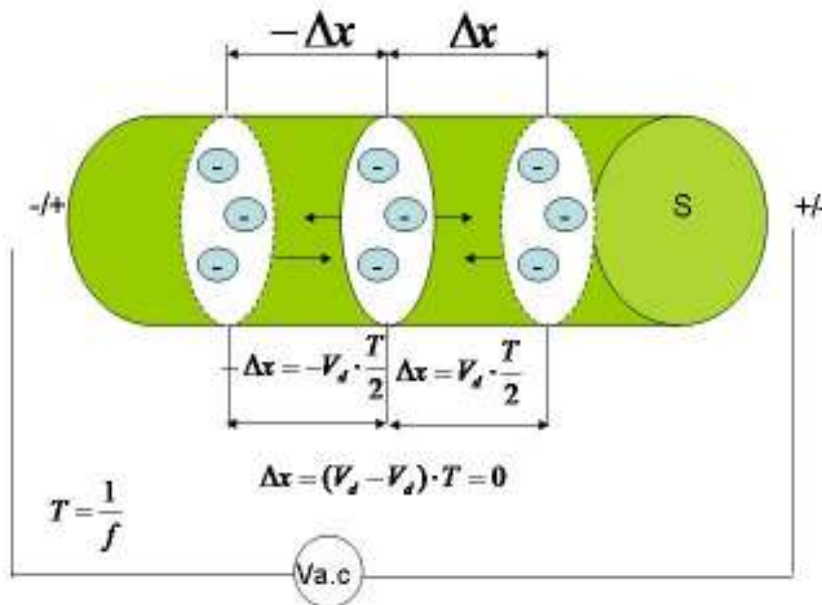
$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{7,09} = 8,49 \cdot 10^{22} \text{ elettroni / cm}^3$$

che corrispondono a $8,49 \cdot 10^{28}$ elettroni/m³. Se fissiamo la sezione del conduttore di rame a un mm² ($1 \cdot 10^{-6}$ m²) abbiamo tutti i dati per ricavare dalla equazione (5) la velocità degli elettroni di una corrente elettrica di un ampere, fissata una densità di cariche libere.

$$V_d = \frac{1}{8,5 \cdot 10^{28} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-6}} = 7,36 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$$

Che corrispondono a 26,5 cm all'ora, un ordine di grandezza in meno, rispetto alla lumaca che viaggia mediamente a oltre 300 cm all'ora.

In corrente alternata abbiamo che gli elettroni si spostano verso una direzione di una quantità ΔX , durante il tempo di un semiperiodo e della stessa quantità $-\Delta X$, nella direzione opposta durante la semionda negativa. Come affermato e messo in evidenza, la loro posizione rimane mediamente la stessa.



La velocità media su un periodo e quindi la corrente media è uguale a zero.

Per la frequenza di rete 50 Hz lo spostamento nel semiperiodo, sempre per un filo di un mm² e una corrente efficace di un ampere, è esattamente:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20mS \quad \Delta x = V_d \cdot \frac{T}{2} = 7,4 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{0,02}{2} = 0,74 \cdot 10^{-6} m$$

La danza armonica, a 50 Hz, degli elettroni liberi è **± 0,74 micron**.

Per verificare e interiorizzare qualunque fondamentale elettrico occorre impraticarsi con esercizi individuali. Prendete un foglio di carta e matita, divertitevi a quantificare anche grossolanamente le velocità a diverse valori di corrente elettrica e conduttori diversi e scoprirete che una corrente continua dal valore di 1 mA, gli elettroni, su un filo di rame di 1 mm², impiegano **cinque mesi** a percorrere un metro di filo. Alle radio frequenze osserverete che aumentando la frequenza le cariche sono quasi immobili nella stessa posizione di assenza di corrente. Come vedete **flussi di corrente elettrica non esistono sui conduttori**.

Note

1) Si parla di verso della corrente ma ricordiamoci che non è un vettore con una direzione. È noto dal primo principio di Kirchhoff che le correnti nei nodi si sommano algebricamente e non vettorialmente.

2) L'analisi fisica e matematica fu fatta per la prima volta nel 1864 da James Clark Maxwell. Egli rimase sorpreso come George Simon Ohm poté arrivare ai suoi stessi risultati quarant'anni prima. Scopri da un suo articolo "Die Galvanische Kette Mathematisch Bearbeitet" pubblicato nel 1827 che, da un lavoro di Fourier sulla termodinamica di fine 700, associò la differenza di temperatura alla tensione elettrica e la quantità di calore alla corrente. Il filo aumentava la temperatura all'aumentare della forza e della corrente ma inversamente alla sua sezione e lunghezza. Ohm chiamò la costante di proporzionalità tra tensione e corrente "Lunghezza ridotta" diverrà poi *resilienza* e quando tutta verrà chiarito sarà dato in nome di resistenza per i motivi che ho spiegato. La legge di Ohm ricavata in modo empirico è forse l'unico caso della storia della fisica, dove un fenomeno molto complesso sia rigorosamente analizzato in modo preciso tramite una semplice equazione di primo grado dedotta da altri scenari fisici. Forse non tutti sanno che per il calcolo della temperatura di giunzione dei semiconduttori e ricavare la giusta aletta di raffreddamento, si utilizza la legge di Ohm.

3) Per la velocità costante e il valore di un uomo in caduta libera nell'atmosfera si legga: <https://www.vialattea.net/content/3404/>

4) Gli elettroni seguono la frequenza dell'onda di campo elettrico fino a un valore di circa 800- 1000 GHz a temperatura ambiente. Oltre queste frequenze rallenta fino a scomparire l'agitazione termica e quindi la potenza del rumore termico. Se non fosse così alle frequenze luce, centinaia di THz (Tera-hertz) vedremmo immagini con l'effetto sabbia, quando l'intensità luminosa è debole (basso rapporto segnale-rumore, SNR) come il vecchio televisore analogico.

5) Delta Q diviso delta t rappresenta il valore medio della corrente ed è la variazione di carica elettrica subita in un certo incremento di tempo. Invece ricavare il valore istantaneo della corrente non è più una banale divisione tra due numeri, ma un **limite** $I = dQ/dt$ (Calcolo infinitesimale: IV anno media superiore). Si tende a zero l'intervallo di tempo in modo che sia talmente piccolo da affermare che non ci sia nessuna variazione di carica elettrica: come fossero ferme, istantanee.

Lecture di complemento:

https://www.vialattea.net/novae/Breve_storia_elettrica.pdf

<https://www.vialattea.net/content/119/>

<https://www.vialattea.net/content/3455/>

Gianfranco Verbana