

Appunti laboratorio di elettromagnetismo

Mirolò Emanuele / Alessio Brusini

a.a. 2025/26

Contents

1	Lezione 22/09/2025	2
1.1	Richiami di elettromagnetismo	2
2	Lezione 25/09/2025	3
3	Lezione 29/09/2025	4
3.1	Resistenze in serie e parallelo	4
3.2	Strumenti per misurare corrente e tensione	5
4	Lezione 02/10/2025	6
4.1	Come misurare una resistenza	6
4.2	La qualità di una pila	6
5	Lezione 09/10/2025	7
5.1	Misura della resistenza	7
5.2	Condensatori	8
5.3	1° Esperienza di laboratorio	8

1 Lezione 22/09/2025

1.1 Richiami di elettromagnetismo

- La carica elettrica è quantizzata, ovvero esiste una carica elementare $1e = 1.6 \cdot 10^{-19}C$
- Legge di Coulomb, che descrive la forza repulsiva/attrattiva tra due cariche puntiformi:

$$\vec{F}_{1,2} = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

dove $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$ è la costante dielettrica del vuoto.

Possiamo notare che il campo elettrico è conservativo, per cui esiste un *potenziale elettrico* V :

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad \vec{F} = -\vec{\nabla}V$$

- Definiamo **corrente elettrica** attraverso una superficie delimitante 2 regioni di spazio, la cui unità di misura è l'Ampere (A), tramite:

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Vale la legge sperimentale detta *1° legge di Ohm*:

$$V = RI$$

dove R è la resistenza del conduttore, che dipende dalla sua natura e dalla sua geometria, da cui la *2° legge di Ohm*:

$$R = \int_0^l \frac{\rho(l')}{\Sigma(l')} dl'$$

dove ρ è la resistività del materiale e Σ è la sezione del conduttore.

La sua unità di misura è l'Ohm (Ω):

$$1\Omega = 1 \frac{V}{A}$$

- La resistività dipende dalla temperatura secondo la legge:

$$\rho(T) = \rho_{20}[1 + \alpha(T - 20^\circ C)]$$

- Definiamo **potenza elettrica**, effettuando un lavoro L per spostare una carica fra due punti, come:

$$W = \frac{dL}{dt} = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}$$

- In un atomo unico il potenziale atomico tende a 0 all'avvicinarsi del nucleo, mentre in un solido la funzione potenziale è periodica a causa della sovrapposizione dei potenziali atomici.

- Definiamo **circuito elettrico** un campo elettrostatico \vec{F} conservativo, il lavoro lungo un percorso chiuso è nullo, introduciamo allora un potenziale U , con dU differenziale esatto.

Se la forza elettrica è originata da una distribuzione di carica \mathbf{Q} , definiamo il **campo elettrico** $\vec{E}(\vec{r})$ in ogni punto dello spazio. Tale \mathbf{Q} permette di spostare una carica di prova \mathbf{q} in \vec{r} con una forza $\vec{F}_e(\vec{r}) = q\vec{E}(\vec{r})$

Si definisce una *funzione differenza di potenziale* $\Delta U = q\Delta$ e $\vec{E} = -\vec{\nabla}V$

- In un sistema fisico isolato (es. *maglia conduttrice*), la carica totale si conserva, ovvero $\Delta V_{tot} = 0$, da cui la **legge di Kirchhoff**:

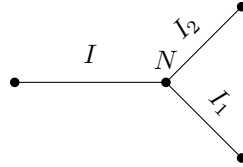
Teorema 1. *La somma delle tensioni ai capi di una maglia è nulla.*

$$\sum_{k=1}^n V_k = 0$$

2 Lezione 25/09/2025

A causa di Benjamin Franklin la corrente va dal polo positivo a quello negativo, in quanto si pensava che fossero cariche positive a spostarsi, non quelle **negative** come avviene nella realtà. La corrente all'interno di un circuito rimane costante, per la legge della conservazione della carica.

Nel momento in cui la corrente incontra un *nodo*, una biforcazione, trova due vie possibili da percorrere, per la conservazione avremo: $I_{tot} = I_1 + I_2$



Finché il circuito è un sistema isolato, le correnti prese con i loro segni seguono la seguente legge:

$$I_{tot} = \sum_{k=1}^n I_k \rightarrow \sum_{k=1}^n I_k - I_{tot} = \sum_{j=1}^{n+1} I_j = 0$$

Da cui la **2° legge di Kirchhoff**:

se un circuito costituisce un sistema isolato, la somma delle correnti entranti in un suo nodo è uguale alla somma delle correnti uscenti dallo stesso nodo

Queste leggi valgono in *corrente continua*, ovvero quando la corrente non varia nel tempo.

- Definiamo la **forza elettromotrice** (f.e.m.) come la differenza di potenziale tra i due poli di un generatore, generata da fenomeni chimici quali le reazioni di ossido-riduzione. In realtà non si tratta di una forza, ma il potenziale elettrico:

$$V_{1i} = -k \frac{q_1 q_i}{r_{1i}} \rightarrow F_{1i} = -\nabla V_{1i}$$

Una d.d.p. può non essere in grado di mantenere una corrente costante, in quanto la resistenza del circuito può variare nel tempo (bastoncino caricato). Ma queste correnti non oscillanti lo possono diventare applicando lavoro.

N.B : non sempre un voltaggio di corrente è equivalente alla sua forza elettromotrice.

- La f.e.m. garantisce che la corrente scorra nel circuito, in quanto fornisce energia al sistema (che viene persa dagli elettroni che viaggiano nel circuito e vengono deviati dagli urti). Per quest'ultimo motivo introduciamo la **resistenza** (R). Poiché l'elettrone fa "più fatica" se ci sono meno vie e possibile e se le "porte d'ingresso" sono più strette, si deve avere:

$$R \propto \frac{l}{\Sigma}$$

dove Σ è l'area della sezione retta del conduttore.

Tramite prove sperimentali si introduce la **legge di Ohm** (nell'ipotesi di materiale omogeneo e di sezione costante):

$$R = \rho \frac{l}{\Sigma}$$

dove $\rho(\theta)$ è la resistività del materiale, che dipende molto da T ; inoltre $L \propto T$ e $\Sigma \propto T^2$, ma tali effetti si compensano. Da cui:

$$\rho(\theta) \simeq \rho_{\theta^*} (1 + \alpha(\theta - \theta^*))$$

dove θ^* è la temperatura di riferimento, che cambia per ingegneri e fisici (solitamente in rete è $\theta = 20^\circ$).

Da ciò deriva il fatto che $R \propto T$.

- Per l'intensità invece avremo

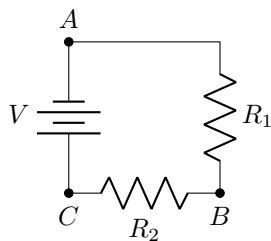
$$I = \frac{V}{R} \rightarrow V = RI$$

Tutte le leggi sono *fenomenologiche*, non derivano da principi primi.

La formula più realistica che rappresenta la resistenza di un tratto di circuito è la seguente:

$$R = \int_{l_1}^{l_2} \frac{\rho(l')}{\Sigma(l')} dl'$$

ovvero un integrale curvilineo



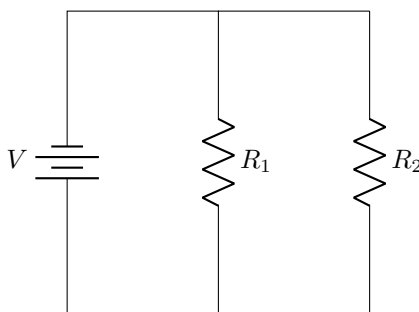
Siccome supponiamo che il circuito sia un sistema isolato, valgono

$$V_{tot} = V_{AB} + V_{BC} \quad I = V R_{eq} \rightarrow R_{eq} = R_1 + R_2$$

3 Lezione 29/09/2025

3.1 Resistenze in serie e parallelo

Vediamo un altro tipo di circuito, che rappresenta un **partitore di correnti**



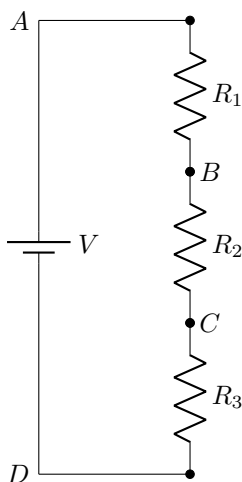
deve valere la legge di Kirchhoff (sistema isolato) e quella di Ohm:

$$I = I_1 + I_2$$

Poichè supponiamo che non ci siano altre resistenze (sistema ideale), la differenza di potenziale ai capi delle due resistenze deve essere la stessa (dalla legge di Ohm):

$$\frac{V}{R_{eq}} = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} \rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

Supponiamo di avere un solo alimentatore e dover far funzionare tre dispositivi, utilizziamo un **partitore di tensione**



ovvero un oggetto che permette di dividere la tensione in più parti, stabili nel tempo.

Chiamiamo *corrente continua*, quella che rimane costante per un periodo abbastanza lungo di tempo.

3.2 Strumenti per misurare corrente e tensione

Uno strumento per misurare delle variabili fisiche dovrebbe sempre dare una risposta *lineare*. Indichiamo con:

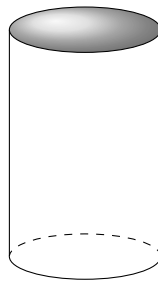
- \vec{E} il campo elettrico,
- \vec{B} il campo magnetico,
- \vec{F}_L la forza di Lorentz:

$$\vec{F}_L = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

La forza di Lorentz subita da una carica in un campo elettromagnetico è la somma della forza elettrica e della forza magnetica, l'una moltiplicata per la carica e l'altra per la velocità della carica.

Sono tutte quantità relativisticamente invarianti dunque la formula vale sia per la fisica classica che per quella relativistica.

Consideriamo ora il caso di una calamita con i poli avvicinati e presente uno spazio cilindrico tra di loro. Se inseriamo lì un segmento cilindrico di ferro dolce (materiale che reagisce velocemente al campo magnetico in cui si trova), allora posso trovare dei segmentini di linee di campo (che ricordiamo essere ortogonali alla superficie equipotenziale della calamita)



Cilindro di ferro dolce

Se supponiamo di avvolgere tale cilindro con una spira e facciamo passare corrente elettrica, chiamati a e b i lati corto e lungo della spira e osservando il più classico degli *elettroni di conduzione* con velocità v , il tratto di spira a sarà ortogonale al campo magnetico

$$e^-v \times B = e^-vB$$

L'elettrone viene "spinto fuori dalla spira"

Contrariamente nel tratto b, l'elettrone non viene deviato, in quanto la velocità è parallela a B . Tornato nel tratto A, se I rimane costante avremo nuovamente \vec{F}_L , sempre diretta verso l'esterno.

Questa coppia di forze genera un *momento torcente* pari a: $\tau = e^-vBb$

Il flusso invece è dato dalla *densità dei portatori di carica* λ , dunque scrivendo la corrente come $v\lambda e = I = \frac{dq}{dt}$, da cui

$$\tau = nBIab$$

dove n è il numero di spire attorno al magnete. Bilanciamo questo momento con una forza elastica grazie a delle molle elicoidali controrotanti (in modo da bilanciare le imperfezioni), ricordando che (nell'approssimazione di $\theta < 4^\circ$):

$$\tau_{el} \approx k\theta = \tau_{mag} = BIb \rightarrow \theta = \frac{Bnab}{k}I$$

Dobbiamo dunque risaltare il nostro segnale, per questo la molla ha più spire (non più di 10 per evitare deformazioni), in tal modo inoltre, l'approssimazione angolare vale fino a $\theta < 40^\circ$ ($\max \theta = 3600^\circ$).

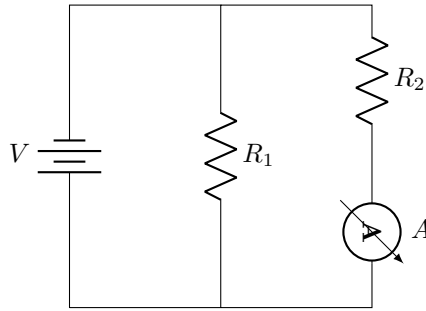
Nel caso della realtà abbiamo il cosiddetto *effetto Joule*, ovvero il riscaldamento del conduttore, quindi posso usare solo piccole correnti. Lo strumento appena descritto è detto **Amperometro**, costruendo un circuito con una resistenza e un amperometro in parallelo, possiamo misurare la corrente che passa nel circuito. avremmo

$$I = I_A + I_S = \frac{V}{R_A} + \frac{V}{R_S}$$

costruiamo la resistenza in modo che $R_A \ll R_S$ (per esempio $\frac{R_A}{R_S} = \frac{1}{10}$), tali R_S sono dette **resistenze di shunt**. La precisione, dunque, diminuisce in modo direttamente proporzionale all'aumento del numero di resistenze

4 Lezione 02/10/2025

Chiediamoci quale sia la ΔV ai capi di una resistenza e consideriamo la resistenza Ohmica $V_{AB} = IR$



Per farlo utilizziamo un amperometro, ma in tal modo lo perturbiamo, avremo $R < R^*$, per rendere la situazione accettabile aggiungiamo una resistenza prima dell'amperometro, tale che $R_2 \gg R$, potendo trascurare la corrente che passa nell'amperometro.

Dunque misuro la d.d.p. teorica rispetto a quella reale (con lo strumento di misura):

$$V_{AB} = IR \quad V_{AB}^* = I \frac{RR_A}{R + R_A}$$

$$\frac{V_{AB} - V_{AB}^*}{V_{AB}} = \text{errore dovuto all'amperometro}$$

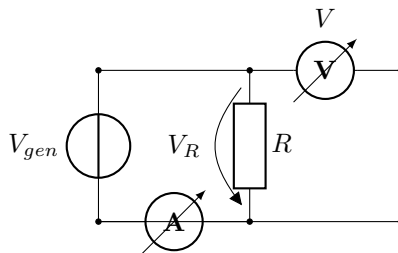
Ponendo R_A come somma di R_2 e quella dovuta all'amperometro.

Posso anche utilizzare un voltmetro, che lavora fra due materiali conduttori di resistenza trascurabile; uno strumento è il voltmetro a fogli conduttori, che in base all'angolo di inclinazione delle mie piastre mi indichi la ΔV .

4.1 Come misurare una resistenza

Nell'ipotesi che tale resistenza sia ohmica, dunque $R = \frac{V}{I}$ (caso ideale, non reale), ottenendo così una scala iperbolica (essendo V costante e I variabile). A causa della degradazione della batteria dello strumento erogatore della forza elettromotrice, ottengo un errore di sottostima su R .

Un altro modo per misurare la resistenza è utilizzare un generatore regolabile, mettere in parallelo la resistenza con un voltmetro e in serie ai due un amperometro.



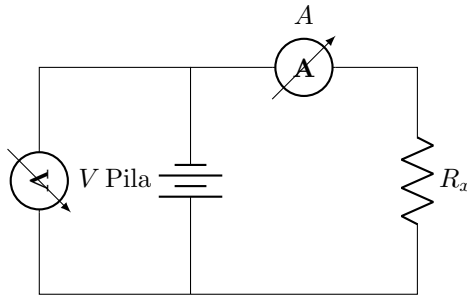
Posso disegnare un grafico V su I , successivamente cerco di ricavare la legge fisica, ciò che mi aspetto è un andamento lineare, dove $\frac{1}{m} = R$. Inoltre, a causa dell'effetto Joule si comincia a perdere la linearità, sostituita da un andamento logaritmico.

4.2 La qualità di una pila

La bontà di una pila è data dal fatto che anch'essa ha una resistenza interna, tanto più è bassa, migliore è la pila. Quando la pila inizia a consumarsi, la resistenza interna della pila aumenta a causa di fenomeni di ossidazione o sbalzi termici.

Per misurare lo stato della pila creo un circuito con essa e:

- un amperometro in serie alla pila (prima)
- una resistenza incognita, devo creare la più grande resistenza con quelle a disposizione (le metto in serie) ($R_x = \sum_{i=1}^n R_i$)
- un voltmetro in parallelo alla pila



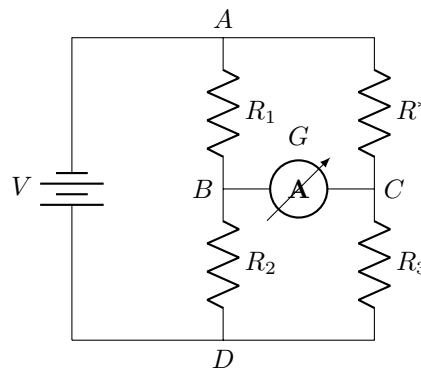
Creo un grafico V su I , aumentando la resistenza, ottengo un andamento iperbolico sul primo quadrante (grazie al cazzo). Nel momento in cui incontro un andamento lineare ("inversamente lineare") ho un comportamento ohmico, che facendo il fit lineare (sul sottoinsieme di dati ideale) posso ottenere il valore della resistenza interna della pila.

Estrapolando a $I = 0$ ottengo il valore della ΔV della pila. Con una pila nuova dovrei ottenere una linea orizzontale ad un certo valore di V .

5 Lezione 09/10/2025

5.1 Misura della resistenza

Una tecnica molto utilizzata è la *misura di zero*, che sono le più precise che si possono fare, in questo caso chiameremmo **misura a ponte di Wheatstone**



Le resistenze erano ottenute mettendo nelle loro posizioni dei *reostati*, per ottenere R^* si ottiene "giocando" con le resistenze fino ad azzerrare l'amperometro, infatti:

- se fra B e C non passa corrente vuol dire $\Delta V_{BC} = 0$
- quindi fra A-B e A-C avremo la stessa ΔV , $\Delta V_{AB} = \Delta V_{AC}$, ma avremmo anche $\Delta V_{BD} = \Delta V_{CD}$ (Kirchhoff)
- se la R^* obbedisce alla legge di Ohm (trascurando l'effetto Joule), avremmo

$$\Delta V_{AB} = IR \quad \Delta V_{AC} = I^* R^* \quad \Delta V_{BD} = I_2 R_2 \quad \Delta V_{CD} = I_3 R_3$$

ottenendo un sistema

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I^* R^* \\ I_2 R_2 = I_3 R_3 \end{cases} \quad (1)$$

- se considero la corrente $I_A = 0$ allora avrò che le correnti sul stesso ramo della maglia sono uguali ($I_1 = I_2$, $I^* = I_3$).
- facendo il rapporto membro a membro di (1) ottengo:

$$R^* = R^3 \frac{R_1}{R_2}$$

5.2 Condensatori

Lo assumiamo come un accumulatore di cariche elettriche che inseriamo nel circuito.

Supponiamo di avere un **segnale elettrico** ovvero una variazione di ΔV nel tempo t , se

1. la carica associata al segnale viene portata al condensatore (grazie ad uno *spinotto*), esso si carica in modo logaritmico;
2. si ferma il caricamento;
3. si fa partire un altro circuito, che fa scaricare il più linearmente possibile il condensatore (anche se l'andamento sarà comunque logaritmico).
4. se carico il condensatore con un diverso segnale allora avrò una retta con la stessa pendenza ma che incontra lo zero della carica del condensatore in un punto diverso.

5. iterando il procedimento posso contare il numero di volte in cui un *clock* ha segnato lo scaricamento parziale del condensatore

Il numero di segnali è direttamente proporzionale al t necessario per scaricare il condensatore

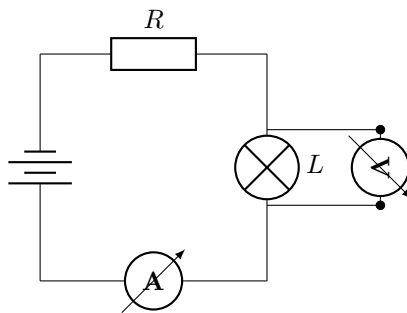
6. se inoltre il t di scarica è associato al segnale (a sua volta associata al tempo di carica), allora posso creare una relazione tra la carica e il tempo di carica ($\frac{C}{s} = A$)

Su questo procedimento si basa il funzionamento dell'amperometro

5.3 1° Esperienza di laboratorio

Utilizzeremo un circuito composto da

- una resistenza
- una lampadina a filamento, composta da:
 - un bulbo di vetro (da cui si può aspirare aria per sostituirla con qualche milli Bar di un gas nobile)
 - due filamenti collegati al circuito e ad un altro filamento (acciaio tungstenato), tramite l'effetto Joule viene prodotta illuminazione,
- in parallelo alla lampadina un voltmetro
- un amperometro



L'obiettivo è quello di costruire una curva voltamperometrica (I vs V), se la lampadina rispetta la legge di Ohm allora mi aspetto un andamento lineare.

L'andamento reale è più esponenziale (sotto la linea retta ideale) ($I \propto V^2$), questo accade perchè il sistema fisico non è isolato (non tutta la f.e.m. crea la corrente), infatti nel metallo della lampadina si crea attrito (emissione nell'infrarosso), l'elettrone di conduzione si muove in modo erratico (a causa degli scontri con gli elettroni degli atomi del metallo). Si formano, incoerentemente dei fotoni che creano delle differenze nel campo elettrico. Difatti, gli elettroni dell'atomo possono eccitarsi e cambiare orbitale. L'atomo eccitato ritorna allo stato fondamentale dopo circa $10^{-8}s$, l'energia liberata forma i fotoni con frequenze nel visibile:

$$E_\gamma = h\nu$$

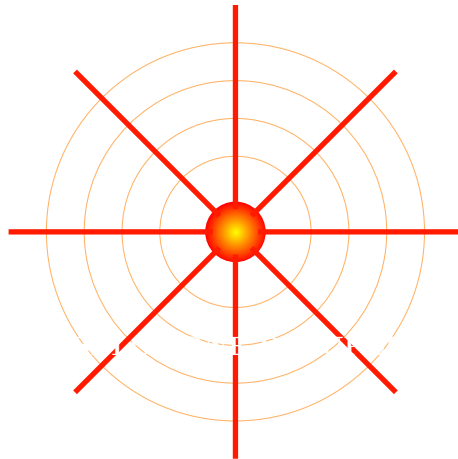
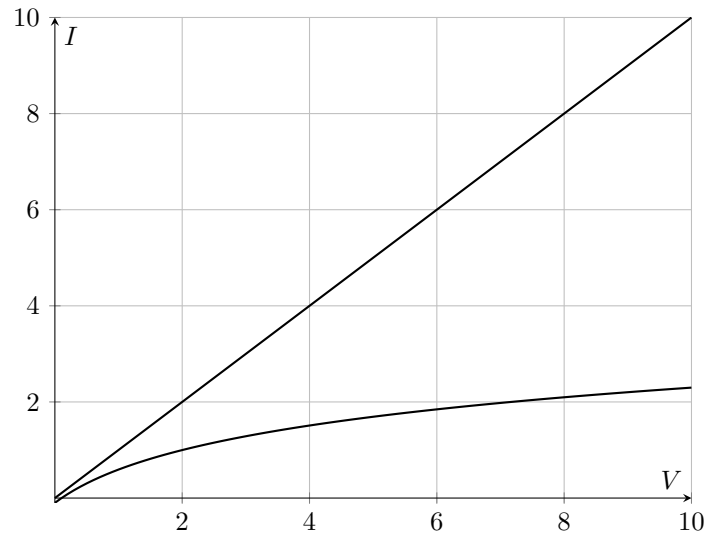
Se uno degli e^- di conduzione riesce ad eccitare gli elettroni di un atomo della mia resistenza interna alla lampadina, allora dopo riesco a produrre una luminescenza (transiente, transizione di fase). Abbiamo individuato un *fenomeno a soglia* (che si verifica solo quando un determinato parametro supera un valore critico preciso, in questo caso l'energia)

Supponiamo che a V^* inizia tale fenomeno, da qui in poi la conduzione nel circuito cambia (inizia il comportamento logaritmico), infatti l'energia che io fornisco sotto forma di f.e.m. verrà assorbita e poi dissipata sotto forma

La differenza fra la curva e la retta ideale continua ad aumentare fino al bruciare del filamento (il metallo bolle), ovvero un po' di metallo diventa gas dentro se stesso, il filamento si gonfia (aumenta la resistenza, sia perchè è più caldo, sia perchè è diminuita l'area della sezione retta in alcuni punti).

Al bruciare del filamento $I = 0$, ma la zona subito prima precedente da questa decaduta è di transione di fase (scioglimento e rottura). In realtà anche nella prima transizione di fase (inizio emissione fotoni), ci sono delle piccole oscillazioni che però non sono visibili.

N.B.: durante le transioni di fase ci sono delle fluttuazioni negli osservabili, nel nostro caso ciò è dovuto allo scambio energetico, che modifica la resistenza (osservabile) del filamento. In generale i fenomeni di transizione sono associati oscillazioni nelle osservabili. Sapendo che $R = \frac{1}{m} = \frac{\Delta V}{\Delta I}$, questi Δ sono dati dalle spezzate che collegano i nostri punti. Questa resistenza, detta *resistenza dinamica*, fluttua molto nel momento delle tranzioni di fase



[esplosione di supernova]

La polarizzazione risulta ininfluyente per il nostro sistema fisico