

**ESAME DI STATO  
DI LICEO SCIENTIFICO  
2004**

**Indirizzo Scientifico  
Progetto Brocca**

## La prova

Il candidato svolga una relazione su uno solo dei seguenti due temi, a sua scelta, motivando i passaggi intermedi e prestando attenzione al corretto uso della terminologia scientifica.

### Secondo tema

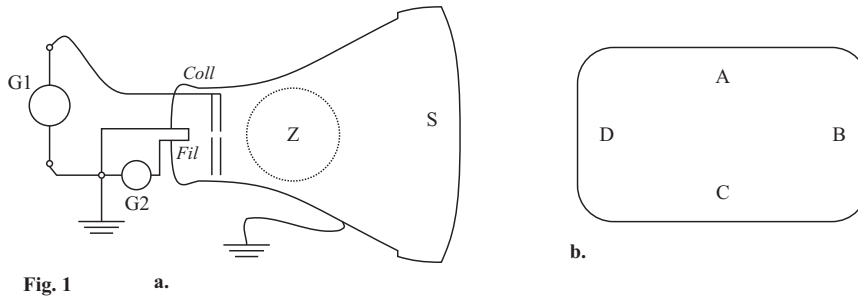
Le immagini che si formano sullo schermo di un apparecchio televisivo sono generate dall'interazione tra un fascio di elettroni veloci e i fosfori depositati sulla superficie interna dello schermo stesso. Gli elettroni provengono dalla sezione posteriore del tubo catodico dove un filamento metallico è portato all'incandescenza.

Il candidato risponda alle seguenti domande.

1. Spieghi perché l'alta temperatura del filamento favorisce l'emissione di elettroni.
2. Spieghi perché i fosfori depositati sulla superficie dello schermo emettono luce quando interagiscono con gli elettroni veloci del tubo catodico.
3. Nella figura 1a. è schematicamente rappresentato un tubo catodico nel quale sono visibili: due generatori di tensione continua (G1 per l'alta tensione e G2 per la bassa tensione), il filamento riscaldato (*Fil*), il collimatore del fascio elettronico (*Coll*) formato da due piastrine metalliche forate e parallele, lo schermo S, la zona Z dove gli elettroni sono deviati da un campo magnetico. Il candidato descriva e commenti:
  - (a) le funzioni e le polarità dei generatori G1 e G2;
  - (b) in quale zona del tubo catodico l'intensità del campo elettrico è elevata e dove, invece, è trascurabile.

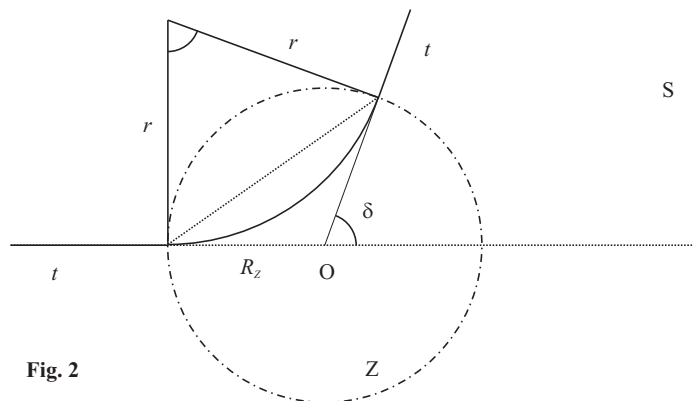
4. Nell'ipotesi che la differenza di potenziale tra il filamento e il collimatore sia  $\Delta V = 30 \text{ kV}$ , il candidato calcoli:

- l'energia cinetica acquistata dagli elettroni nel loro percorso tra *Fil* e *Coll*, espressa in elettronvolt e in joule;
- la velocità degli elettroni al loro passaggio attraverso il collimatore (ipotesi classica), commentando il risultato per quanto riguarda gli eventuali effetti relativistici.



- Con riferimento alla figura 1b., che rappresenta la vista anteriore dello schermo, e nell'ipotesi che il campo magnetico nella zona *Z* sia uniforme, il candidato disegni il vettore  $\vec{B}$  necessario, ogni volta, per far raggiungere al fascio di elettroni i punti A, B, C, D sullo schermo.
- Il candidato si riferisca ora alla figura 2 dove *tt* è la traiettoria del fascio elettronico, *r* è il raggio dell'arco di traiettoria compiuto all'interno di *Z*,  $\delta$  è l'angolo di deviazione del fascio elettronico. Si supponga che l'angolo di deviazione sia  $\delta = 30^\circ$  e che il campo magnetico sia uniforme all'interno della zona sferica *Z*, di raggio  $R_Z = 4 \text{ cm}$ , e nullo altrove. Il candidato calcoli l'intensità del vettore  $\vec{B}$  che porta a tale angolo di deviazione e ne indichi la direzione e il verso, osservando che lo schermo è perpendicolare al piano del foglio.

Nella figura 2 l'angolo  $\delta$  è stato disegnato più grande di  $30^\circ$  con lo scopo di rendere l'immagine più compatta per facilitarne lo studio.



Si ricordano i seguenti dati approssimati:

- carica dell'elettrone  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- massa dell'elettrone  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
- velocità della luce  $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

## La soluzione

### Secondo tema

#### L'effetto termoionico

Il filamento metallico contiene elettroni in moto con energie casuali. L'energia di ciascun elettrone è però insufficiente a permettergli di sottrarsi al campo elettrico generato dagli ioni positivi che formano il reticolo cristallino. L'energia necessaria ad estrarre un elettrone dal reticolo è detta *lavoro di estrazione*  $W_e$ .

Quando la temperatura del reticolo viene innalzata, l'energia fornita si distribuisce casualmente agli elettroni. Alcuni di essi acquistano così un'energia almeno pari a  $W_e$  e possono uscire dal filamento. All'esterno del filamento il campo elettrico del reticolo, che tenderebbe a farli tornare indietro, è superato dal campo elettrico esterno, imposto da G1, che li accelera verso il collimatore.

#### L'emissione di luce da parte dello schermo

Quando gli elettroni accelerati dal campo elettrico fra il filamento e il collimatore urtano contro i fosfori depositati sullo schermo, cedono a questi parte della propria energia cinetica. L'energia assorbita dagli atomi o dalle molecole dei fosfori è sufficiente a portarli dallo stato fondamentale a uno stato eccitato, corrispondente a uno dei livelli energetici quantizzati disponibili. Successivamente il sistema ritorna nello stato fondamentale, emettendo un fotone di energia pari alla differenza di energia fra il livello eccitato e il livello più basso.

#### Il tubo catodico

Nello schema della figura 1a. il filamento *Fil* deve essere percorso da corrente, in modo da scaldarsi per effetto Joule; il generatore G2 è presente a questo scopo. Questo generatore può essere inserito nel circuito con entrambe le polarità possibili.

Il circuito costituito dal generatore G2, dal filamento e dai contatti che li uniscono presenta una resistenza piuttosto bassa, in modo da essere percorso da una corrente abbastanza elevata da portare la temperatura del filamento al valore opportuno.

Il generatore G1 non deve invece alimentare una corrente, come si vede anche dal fatto che il circuito di cui fa parte è aperto.

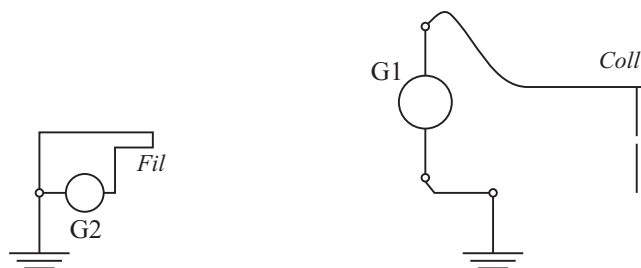


Figura 1: Dettagli da Fig. 1a.

Lo scopo di G1 è di polarizzare il “condensatore” avente il filamento *Fil* come armatura negativa e il collimatore *Coll* come armatura positiva. Perché questo avvenga, in modo da accelerare verso lo schermo gli elettroni emessi dal filamento, il polo positivo di G1 deve essere collegato al collimatore.

Gli elettroni emessi dal filamento si vengono a trovare in una zona (quella fra il filamento e il collimatore) dove il campo elettrico è molto intenso e diretto dal collimatore al filamento. Ciò produce una notevole forza elettrica sugli elettroni, che accelerano in verso opposto al campo, dirigendosi contro il collimatore.

Una volta raggiunto il collimatore, però, molti elettroni passano attraverso il foro nel collimatore e si trovano in una zona dove il campo elettrico è trascurabile. Questi elettroni si muovono allora di moto rettilineo uniforme (se si trascura la gravità, dato il brevissimo tempo di volo fino allo schermo).

### L'energia e la velocità finali degli elettroni

Il sistema di cariche di cui fa parte ogni elettrone, sottoposto alla differenza di potenziale  $\Delta V$  di 30 kV fra filamento e collimatore, ha un'energia potenziale elettrostatica:

$$U_e = q_e \cdot \Delta V = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 30 \text{ kV} = 4,81 \cdot 10^{-15} \text{ J.} \quad (1)$$

(Per la definizione di elettronvolt, ricordata nella discussione del primo tema, questa energia vale semplicemente 30 keV.)

Quando gli elettroni attraversano la differenza di potenziale, l'energia potenziale elettrostatica si trasforma in energia cinetica degli elettroni stessi. Dopo l'uscita dal collimatore, la velocità e dunque l'energia cinetica degli elettroni non varia più (grazie anche all'alto vuoto realizzato nel tubo catodico).

Al momento dell'impatto con lo schermo, ogni elettrone ha pertanto un'energia cinetica  $K = 4,81 \cdot 10^{-15} \text{ J} = 30 \text{ keV}$ .

Per la fisica classica, l'energia cinetica di ogni elettrone si può scrivere come:

$$K = \frac{1}{2} m v^2 \quad (2)$$

il che porterebbe a concludere che la velocità con la quale gli elettroni colpiscono lo schermo sia pari a:

$$v_{cl} = \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 4,81 \cdot 10^{-15} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 1,03 \cdot 10^8 \text{ m/s.} \quad (3)$$

Come si può vedere, questo valore della velocità è pari a più di un terzo della velocità della luce nel vuoto. L'ipotesi che sia possibile applicare la fisica classica al moto degli elettroni nel tubo catodico è perciò discutibile.

In relatività ristretta, l'energia di una particella in moto è data dall'espressione

$$E = \gamma m c^2 \quad (4)$$

dove compare il fattore di dilatazione

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (5)$$

L'energia totale di una particella in moto è anche uguale alla somma della sua energia di riposo e della sua energia cinetica:

$$E = m c^2 + K \quad (6)$$

che per i nostri elettroni vale:

$$\begin{aligned} 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 + 4,81 \cdot 10^{-15} \text{ J} &= 82,0 \cdot 10^{-15} \text{ J} + 4,8 \cdot 10^{-15} \text{ J} = \\ &= 86,8 \cdot 10^{-15} \text{ J.} \end{aligned} \quad (7)$$

Il rapporto fra  $E$  e l'energia a riposo ci fornisce il valore di  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{E}{mc^2} = \frac{86,8 \cdot 10^{-15} \text{ J}}{82,0 \cdot 10^{-15} \text{ J}} = 1,06. \quad (8)$$

Questo valore, anche se ancora abbastanza vicino a 1, è abbastanza grande da dover essere tenuto in conto dai progettisti in vista di un funzionamento ottimale del televisore.

### La direzione e il verso del campo magnetico

Guardando la figura 1b., gli elettroni si muovono perpendicolarmente al foglio e uscenti da esso. Per applicare al fenomeno la regola della mano destra relativa al prodotto vettoriale che compare nella forza di Lorentz  $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$ , orientiamo il pollice in verso *entrante* al foglio, per tenere conto della carica negativa degli elettroni. Perché gli elettroni siano soggetti a una forza deviante diretta verso A, il campo magnetico  $\vec{B}$  deve essere orizzontale e orientato da destra a sinistra.

In modo analogo otteniamo i vettori riassunti nella figura seguente.

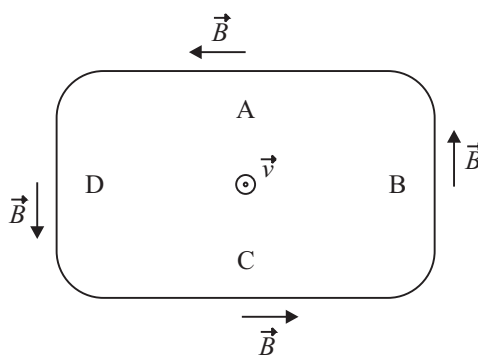


Figura 2: Fig. 1b. modificata

### L'intensità del campo magnetico

Il teorema dei seni, applicato due volte ai triangoli isosceli tracciati nella figura 2, permette di calcolare il raggio di curvatura richiesto:

$$r = \frac{\frac{R_Z}{\sin(\delta/2)} \sin(180^\circ - \delta)}{\sin(\delta)} \sin\left(\frac{180^\circ - \delta}{2}\right) = 14,9 \text{ cm}. \quad (9)$$

Poiché  $\vec{v}$  e  $\vec{B}$  sono perpendicolari per gli elettroni nel tubo catodico, la forza di Lorentz che agisce su di essi vale:

$$F = q_e v B \quad (10)$$

mentre la forza centripeta necessaria a far muovere un elettrone su una traiettoria circolare di raggio  $r$  con velocità  $v$  è:

$$F = m \frac{v^2}{r}. \quad (11)$$

Uguagliando i secondi membri della (10) e della (11), ricaviamo  $B$ :

$$q_e v B = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow B = \frac{mv}{q_e r} = \frac{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 1,03 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 0,149 \text{ m}} = 3,93 \text{ mT}. \quad (12)$$

In questo calcolo abbiamo usato il valore di  $v$  ottenuto in precedenza con un calcolo classico. Se dovessimo progettare accuratamente il televisore, dovremmo ripetere il calcolo in forma relativistica, per evitare che l'intensità del campo magnetico desiderato risulti sbagliata.