

## II. 2 Un po' di fisica.....

Si dice *effetto fotoelettrico* il fenomeno che si manifesta con l'emissione di elettroni da parte di una superficie esposta ad onde luminose o a radiazioni elettromagnetiche di varia frequenza.

Il termine "*fotoelettrico*" si riferisce a diversi tipi di interazioni; nell'effetto fotoelettrico *esterno* gli elettroni sono emessi dalla superficie di un conduttore metallico, o da un gas, in seguito all'assorbimento dell'energia luminosa incidente la superficie stessa.

Alla fine del XIX secolo la teoria ondulatoria della luce sembrava avere solide basi: James Clerk Maxwell<sup>1</sup> era riuscito a formulare un insieme di equazioni con le quali si descrivevano e si spiegavano le proprietà del campo elettromagnetico. Ma agli inizi del 1900 furono trovati alcuni risultati sperimentali che la sola teoria ondulatoria classica sulla natura della luce non riusciva a spiegare.

Le tappe fondamentali che portarono alla risoluzione della "crisi", e quindi ad una radicale rivoluzione nella descrizione dei fenomeni elettromagnetici, furono essenzialmente due:

- la soluzione di Planck<sup>2</sup> al problema del *corpo nero*<sup>3</sup>;

---

<sup>1</sup> James Clerk Maxwell – (13 giugno 1831 - 5 novembre 1879) - Fisico scozzese del XIX secolo elaborò la prima teoria moderna dell'elettromagnetismo compendiando in poche equazioni tutte le nozioni di questa scienza; tuttavia rimase legato ad una concezione di campo elettromagnetico la cui propagazione avviene attraverso un mezzo etereo; dapprima egli identificò l'etere luminifero con quello elettromagnetico e poi unificò i due fenomeni, quelli ottici e quelli elettromagnetici, infatti dalle sue equazioni tali onde sono immediatamente deducibili.

<sup>2</sup> Max Planck – (23 aprile 1858 - 4 ottobre 1947) - fisico tedesco, fondatore della teoria dei *quanti* che, insieme con la teoria della relatività di Albert Einstein e con la teoria ondulatoria della materia, è uno dei pilastri della fisica contemporanea. La sua teoria gli valse il premio Nobel per la fisica del 1918.

<sup>3</sup> Corpo nero - Un corpo nero è un corpo la cui superficie è in grado di assorbire qualsiasi radiazione

➤ la descrizione di Einstein<sup>4</sup> dell' *effetto fotoelettrico*.

Per quanto riguarda il primo, in sintesi, nel 1900 Plank ipotizzò che gli scambi di energia tra gli atomi di un corpo qualsiasi e la radiazione elettromagnetica non avvengono in modo continuo, come previsto dalla teoria classica, ma attraverso quantità discrete, dette *quanti*<sup>5</sup>.

Secondo Planck, infatti, un'onda elettromagnetica può scambiare con la materia con cui interagisce solo multipli interi di una quantità finita di energia, proporzionale alla frequenza d'onda<sup>6</sup>.

Detta  $\Delta E$  l'energia scambiata si ha

$$\Delta E = n h \nu$$

con  $n$  numero intero,  $h$  costante di Planck che vale  $6.63 \cdot 10^{-34}$  Js e  $\nu$  frequenza dell'onda.

Nel 1905 Einstein, nel tentativo di spiegare il modo in cui interagiscono radiazione e materia, suppose che la radiazione stessa fosse composta da quanti, i *fotoni*, ovvero da “pacchetti” di energia del campo elettromagnetico.

---

elettromagnetica che incide su di essa. Questo significa anche che tale corpo è un emettitore perfetto, cioè, in altre parole, in grado di emettere radiazione elettromagnetica di qualsiasi frequenza.

<sup>4</sup> Albert Einstein – (Ulma, Germania, 14 marzo 1879 - Princeton, USA, 18 aprile 1955) - Importante e notissimo fisico e matematico, nonché un grande pensatore ed attivista in molti altri ambiti, dalla filosofia alla politica. Per il suo complesso apporto alla scienza, e alla fisica in particolare, è indicato come uno dei più importanti studiosi del XX secolo. Conosciuto soprattutto per le sue teorie sulla relatività ristretta e sulla relatività generale, diede anche importanti contributi alla nascita della meccanica quantistica e alla critica dei suoi fondamenti, alla meccanica statistica e alla cosmologia. Fu vincitore del Premio Nobel per la Fisica nel 1921.

<sup>5</sup> Dal latino “*quantum*”

<sup>6</sup> Vedi Allegato 3 - “Qualche definizione utile”

L'effetto fotoelettrico era noto sin dal 1880; infatti si sapeva che la luce era in grado di far emettere elettroni ad una superficie metallica da essa colpita, producendo una debole corrente.

La teoria ondulatoria classica prevedeva che, all'aumentare dell'intensità delle luce incidente, aumentasse l'energia degli elettroni emessi. Nel 1902 il fisico tedesco Lenard<sup>7</sup> dimostrò che *l'energia posseduta dai fotoelettroni non dipendeva dall'intensità di illuminazione, ma solo dalla frequenza, cioè dalla lunghezza d'onda*<sup>8</sup>, della radiazione incidente.

L'intensità della radiazione, al contrario, influiva sull'intensità di corrente, cioè sul numero di elettroni strappati alla superficie metallica.

Il risultato era inspiegabile.

Nel 1905 Einstein, riprendendo l'ipotesi di Planck, riuscì a spiegare in modo semplice e brillante le caratteristiche dell'effetto fotoelettrico.

Egli suppose non solo che gli scambi di energia tra la radiazione elettromagnetica e la materia avvenissero quantisticamente, ma che la radiazione stessa fosse composta da "quanti", la cui energia è direttamente proporzionale alla frequenza dell'onda corrispondente secondo la relazione

$$E = h \nu \quad (1)$$

con  $h$  costante di Planck e  $\nu$  frequenza.

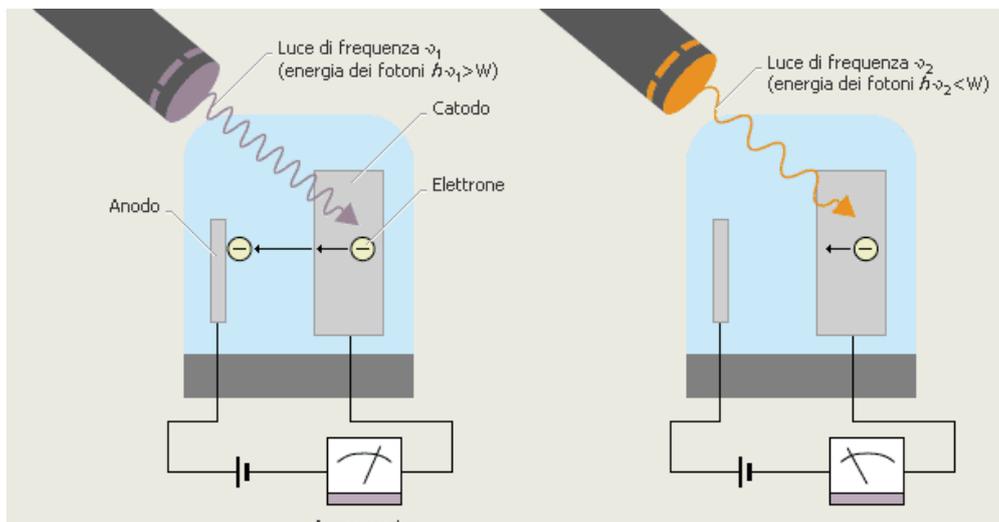
---

<sup>7</sup> Philipp Eduard Anton von Lenard – (7 giugno 1862 - 20 maggio 1947) è stato un fisico tedesco, vincitore del Premio Nobel per la fisica nel 1905 per sue ricerche sui raggi catodici e le scoperte sulla maggior parte delle loro proprietà. Durante il nazismo fu convinto sostenitore dell'idea che il suo paese dovesse appoggiarsi solo sul lavoro dei fisici tedeschi, ignorando le fallaci ed ingannevoli idee proposte dai fisici ebrei, con riferimento principale ad Albert Einstein.

<sup>8</sup> Vedi Allegato 3 – "Qualche definizione utile"

Quindi, secondo la teoria elaborata da Einstein, incidendo sulla superficie di un corpo metallico, i fotoni cedono parte della loro energia agli elettroni liberi del conduttore, provocandone l'emissione; in tali ipotesi l'energia dell'elettrone liberato dipende solo dall'energia del fotone, mentre l'intensità della radiazione è direttamente correlata al numero dei fotoni trasportati dall'onda, e quindi può influire sul numero degli elettroni estratti dal metallo, ma non sulla loro energia.

Nella foto si può osservare proprio quanto appena detto.



La radiazione luminosa di frequenza  $\nu$  è composta da fotoni di energia data dalla (1); per riuscire a strappare un elettrone ad una superficie metallica, l'energia del fotone deve essere maggiore dell'energia di legame<sup>9</sup> dell'elettrone del metallo,  $W$ . In questo caso, inserendo un amperometro fra catodo ed anodo si registra un passaggio di corrente – a sinistra nella figura. Se l'energia del fotone è inferiore a  $W$  – a destra – non si ha effetto

<sup>9</sup> Energia di legame - E' l'energia che bisogna fornire per rompere un legame; questa quantità è uguale a quella che si libera quando lo stesso legame viene costituito.

fotoelettrico, e dunque l'amperometro non registra passaggio di corrente. Caratteristica dell'effetto fotoelettrico è che l'emissione di elettroni dipende dalla frequenza della radiazione, che determina l'energia del fotone, e non dall'intensità della luce.

Un elettrone, allora, per liberarsi dal metallo, deve assorbire un fotone; se un fotone è sufficientemente energetico, quando viene assorbito, parte dell'energia è utilizzata dall'elettrone per liberarsi dal metallo, parte si trasforma in energia cinetica.

È possibile inoltre osservare che:

- esiste una soglia al di sotto della quale non vengono emessi elettroni ed essa dipende dal materiale;
- diminuendo la lunghezza d'onda, oppure aumentando la frequenza, aumenta l'energia cinetica degli elettroni emessi;
- aumentando l'intensità, quando si è sopra la soglia di emissione, aumenta il numero dei fotoni incidenti e quindi il numero degli elettroni emessi; ciò si traduce in un aumento dell'intensità di corrente che passa nel circuito.

### **Osservazioni sulle cellule fotoelettriche**

L'effetto fotoelettrico esterno è sfruttato nella *cellula fotoelettrica*, o *fotocellula*; essa è un dispositivo elettronico per la rilevazione della luce e della sua intensità, basato sull'effetto fotoelettrico (fig. 1): gli elettroni emessi da uno dei due poli della cellula migrano verso l'altro polo per effetto di un campo elettrico applicato.

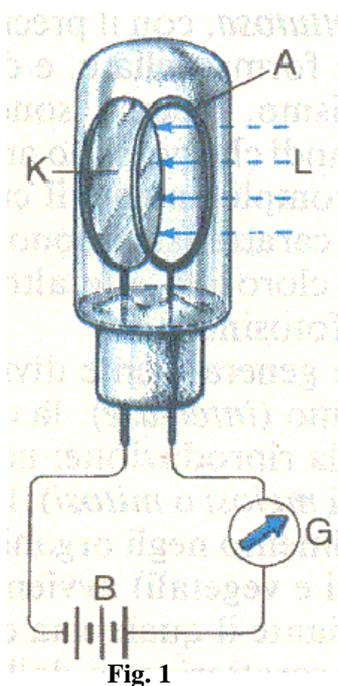


Fig. 1

È costituita da un involucro sottovuoto o contenente un gas inerte, sul quale incide la radiazione luminosa *L*; all'interno di questo involucro sono disposti due elettrodi: uno, l'*anodo A*, collegato al polo positivo di un generatore di corrente continua, per esempio una *batteria B*, e l'altro il *catodo K*, o fotocatodo, collegato con il polo negativo.

Il catodo è costituito o rivestito da combinazioni di sostanze fotosensibili<sup>10</sup>.

*Quando il catodo, disposto in modo da ricevere radiazioni luminose dall'esterno, viene illuminato emette elettroni* che sono attratti dall'anodo, carico positivamente. In questo modo *si crea all'interno del circuito* in cui è inserita la fotocellula *una corrente elettrica, la cui intensità è proporzionale all'intensità dell'illuminazione.*

La fotocellula è utilizzata per *convertire una radiazione luminosa in segnale elettrico*; se poi viene *tarata* può essere utilizzata come *fotometro, strumento che misura le intensità luminose*, di cui si parla dettagliatamente più avanti.

La prima cellula fotoelettrica fu costruita da Elster<sup>11</sup> e Geitel<sup>12</sup> nel 1910.

<sup>10</sup> In particolare cesio – antimonio, cesio – antimonio – bismuto, cesio – argento – ossigeno, rame – iodio, cesio – iodio.

<sup>11</sup> *Julius Elster*, Germania 1854 – 1920. Insieme al fisico Geitel, continuò le ricerche di Stoletov sull'effetto fotoelettrico e collaborò alla produzione della prima cellula fotoelettrica; essi determinarono nel 1899 la carica delle goccioline di pioggia durante un temporale e stabilirono che le sostanze radioattive, producendo ionizzazione, causano la conduttività dell'atmosfera.

<sup>12</sup> *Hans Geitel*, Brunswick 1855 – Wolfenbützel 1923. Studiò ad Erlangen e fu assistente di Rutherford a Manchester tra il 1906 e il 1912. Con Elster costruì la prima cellula fotoelettrica; indagò sulla radioattività dei raggi  $\beta$  (beta) e, con Walther Müller, progettò un contatore per misurarla. Fu professore a Kiel nel 1925, a Tübingen nel 1929, e più tardi lavorò a Berlino.

Le cellule impiegate<sup>13</sup> a Collurania erano preparate da Kunz<sup>14</sup> (fig. 2), completamente in quarzo con un bulbo sferico di 50mm di diametro; l'anodo era costituito da un anello di fili in tungsteno intersecato da una croce di filo più sottile, mentre il catodo, costituito dallo strato sottile sensibile di metallo alcalino, ricopriva tutto il bulbo eccetto che per una finestra circolare di 2cm attraverso la quale passava la luce.



Fig. 2

In tutte le cellule usate dal Maggini l'emissione fotoelettrica era amplificata con la ionizzazione di un gas inerte e, per mezzo del cuneo campionato del Microfotometro applicato al fotometro fotoelettrico, era stata compilata una scala decrescente di illuminazioni traducibili in grandezze stellari.

Una particolare attenzione si dedicò alla determinazione delle curve di sensibilità in funzione della lunghezza d'onda.

In una cellula fotoelettrica, che viene usata in fotometria astronomica eterocromatica, *l'intensità della luce incidente deve essere direttamente proporzionale alla corrente fotoelettrica*, cioè al numero degli elettroni emessi; ciò costituisce una delle caratteristiche più preziose quando la cellula è usata per determinare il colore degli astri<sup>15</sup>.

---

<sup>13</sup> Mentore Maggini – *I due fotometri fotoelettrici*, estratto dalle *Memorie della Società Astronomica Italiana*, Vol. VI, Tipografia Legatoria Mario Ponso, Pavia, 1932 - X

<sup>14</sup> vedi Appendice 2 - “La strumentazione dell'Osservatorio”.

<sup>15</sup> Colore – insieme dei dati fisici dipendenti dalla distribuzione dell'energia nello spettro, quali lunghezza d'onda effettiva, indice di colore, tipo spettrale, temperatura effettiva.

Se con  $\sigma(\lambda)$  si indica l'*emissione fotoelettrica* per una luce omogenea di lunghezza d'onda  $\lambda$ , la relazione che fornisce come varia  $\sigma(\lambda)$  in funzione di  $\lambda$  è una curva eguale per tutti i metalli<sup>16</sup>.

Per i metalli alcalini ed alcalino – terrosi  $\sigma(\lambda)$  presenta un massimo che dipende unicamente dall'angolo di incidenza della luce sulla superficie metallica; il massimo è assente quando la superficie del catodo è otticamente piana e la luce è incidente secondo la normale oppure se la luce è incidente obliquamente ma polarizzata e il vettore campo elettrico è parallelo alla superficie.

Il massimo, pertanto, è presente solo se il vettore campo elettrico ha una componente perpendicolare alla superficie.

La funzione  $\sigma(\lambda)$  per i metalli alcalini ha un grafico simile alla curva di risonanza e poco si discosta dalla curva di visibilità dell'occhio; inoltre, se aumenta il peso atomico si verifica che:

- la lunghezza d'onda  $\lambda_m$  corrispondente al massimo di  $\sigma(\lambda)$  si sposta verso il rosso;
- le curve  $\sigma(\lambda)$  presentano un massimo sempre più appiattito;
- la sensibilità diminuisce.

Siano ora  $e(\lambda)$  la funzione che esprime la *distribuzione dell'energia* nello spettro di una stella e  $f(\lambda, z)$  la funzione che dipende dall'estinzione

---

<sup>16</sup> Mentore Maggini – *I due fotometri fotoelettrici di Collurania* – Estratto dalle *Memorie della società Astronomica*, Vol V – Pavia, 1932 – X.

atmosferica<sup>17</sup>, se  $\sigma(\lambda)$  e  $\sigma'(\lambda)$  rappresentano le funzioni della curva di sensibilità di due diverse fotocellule, l'intensità  $J$  della radiazione di una stella misurata alla distanza zenitale  $z$ <sup>18</sup> in funzione di  $\sigma(\lambda)$  è data da

$$J = \int_0^{\infty} e(\lambda)\sigma(\lambda)f(\lambda, z)d\lambda \quad (1)$$

e in funzione di  $\sigma'(\lambda)$  da

$$J' = \int_0^{\infty} e(\lambda)\sigma'(\lambda)f(\lambda, z)d\lambda \quad (2)$$

Dette  $m$  ed  $m'$  le grandezze stellari<sup>19</sup>, la (1) e la (2) diventano rispettivamente<sup>20</sup>

$$m = -2,5 \log J + \text{cost}$$

e

$$m' = -2,5 \log J' + \text{cost}$$

Pertanto se  $I$  indica l'indice di colore relativo a  $\sigma(\lambda)$  e  $\sigma'(\lambda)$  risulta

$$I_{\sigma\sigma'} = m - m'$$

Ponendo per convenzione per stelle di un determinato tipo spettrale<sup>21</sup>

$$I_{\sigma\sigma'} = 0 \Rightarrow m - m' = 0 \Rightarrow J = J'$$

si ottiene che l'indice di colore è dato da

---

<sup>17</sup> Estinzione atmosferica – E' l'indebolimento della luce proveniente dagli oggetti astronomici causato dall'atmosfera terrestre; le molecole (di gas, polvere,...) di cui è composta riflettono, assorbono e rifrangono la luce prima che questa arrivi al suolo.

<sup>18</sup> Distanza zenitale – E' la distanza angolare di un oggetto celeste dallo zenit; per *distanza angolare* si intende l'angolo formato da due visuali rispetto al punto di osservazione considerato come vertice; lo *zenit* si ottiene prolungando la direzione della verticale, cioè la direzione della forza peso, al di sopra della testa dell'osservatore, fino ad incontrare la sfera celeste.

<sup>19</sup> Grandezza stellare o magnitudine – vedi Cap. III par. 1

<sup>20</sup> Per il valore  $m$  si veda Cap. II par. 3

<sup>21</sup> Tipo spettrale - vedi Cap. III par. 1

$$I_{\sigma\sigma'} = -2,5 \log \frac{\int_0^{\infty} e(\lambda) \sigma(\lambda) f(\lambda, z) d\lambda}{\int_0^{\infty} e(\lambda) \sigma'(\lambda) f(\lambda, z) d\lambda}$$

Se si vuole poi la relazione tra l'indice di colore e la temperatura effettiva basta esprimere la funzione  $e(\lambda)$  sotto la forma di Plank.

Al posto di due cellule con diversa curva di sensibilità si può anche usare un'unica cellula ed eseguire le misure con filtri opportunamente scelti tali da far passare due gruppi di radiazioni disposti simmetricamente rispetto al massimo.

Si può anche parlare di *indice di colore fotoelettrico*: esso è dato dalla *differenza fra la grandezza stellare fotoelettrica e la grandezza stellare visuale*; quest'ultima però risulta molto più approssimativa rispetto all'indice di colore calcolato con la fotografia, perché tale indice dipende dal metallo del catodo e con catodi di uno stesso metallo varia da cellula a cellula.