

IL PROBLEMA DEL CORPO NERO

Trattazione elementare

di Ezio Fornero

Definizione di “corpo nero”

Per “corpo nero” in Fisica si intende un sistema fisico in grado di assorbire totalmente ed emettere radiazioni di qualsiasi lunghezza d'onda. Questa definizione presuppone un concetto generale di *radiazione*. In generale, per radiazione si intende una forma di energia che si propaga anche nel vuoto in linea retta, finché non incontra qualche ostacolo. Le indagini teoriche e sperimentali condotte nel XIX secolo dimostrarono che la luce, l'infrarosso, l'ultravioletto, le onde radio ecc. sono componenti di diversa lunghezza d'onda della stessa entità, definita come *radiazione elettromagnetica* (in realtà, queste forme di radiazione non si propagano sempre in linea retta; p.es. se passano attraverso una fenditura paragonabile alla lunghezza d'onda o più piccola subiscono diffrazione).

Anche il calore può propagarsi nel vuoto (*irraggiamento termico*) sotto forma di *radiazione infrarossa*, secondo modalità affini a quelle della luce visibile, ma con lunghezza d'onda compresa tra quella della luce visibile e quella delle onde radio. I forni a microonde funzionano secondo questo principio.

Quando si parla di “corpo nero”, non si deve pensare necessariamente a un campione di colore nero, anche se oggetti neri sono, in generale, “corpi neri” nel senso fisico del termine: infatti un oggetto appare nero proprio perché assorbe al 100% tutte le lunghezze d'onda della radiazione visibile che lo colpisce, si riscalda e irradia energia su tutte le lunghezze d'onda, in modo che la componente visibile, cioè con lunghezza d'onda compresa tra c.ca $4 \cdot 10^{-7}$ m (violetto estremo) e $8 \cdot 10^{-7}$ m (rosso estremo), risulti una frazione trascurabile di tutta l'energia irradiata. Infatti, *a temperature ordinarie il massimo dell'emissione si colloca nell'infrarosso*, che non è percepito dall'occhio, ma si manifesta come calore (irraggiamento termico).

Per esempio, una cavità le cui pareti siano perfettamente riflettenti e dotata di una piccola apertura può rappresentare un corpo nero. Una caverna, o l'interno di un grande edificio nel quale entri la luce attraverso una porta, può essere un esempio. Supponiamo infatti che la luce entri nella cavità attraverso una piccola apertura; se viene riflessa dalle pareti interne, l'energia da essa catturata rimane all'interno della cavità, che quindi assorbe tutta la radiazione entrante trattenendola nel suo interno, qualunque sia la lunghezza d'onda. Tuttavia, se una certa quantità di energia entra nella cavità in un certo intervallo di tempo, la stessa quantità deve uscirne nello stesso intervallo di tempo (in caso contrario l'energia trattenuta all'interno della cavità aumenta, quindi aumenta la temperatura all'interno della cavità, e aumenta la quantità di energia che viene riemessa verso l'esterno), e quindi vi è equilibrio tra la quantità di energia entrante e quella uscente nello stesso tempo. Perciò il corpo nero, oltre ad essere un *assorbente perfetto*, nel senso che assorbe la totalità della radiazione incidente, è anche un *emettitore di radiazione*. La quantità di energia assorbita è uguale a quella emessa, ma con diverse lunghezze d'onda.

Anche se la radiazione entrante avesse una lunghezza d'onda definita o compresa in un certo intervallo (come nel caso della luce che dall'esterno entra in una grande stanza attraverso una fessura), quella trattenuta all'interno della cavità non ha la stessa lunghezza d'onda. Ciò giustifica il fatto, apparentemente paradossale, che l'interno di una chiesa è molto più scuro dell'esterno. Ciò non significa che all'interno della cavità vi sia un minore rapporto tra energia e volume, cioè una minore *densità di energia*. L'energia radiante può infatti essere considerata come un fluido, che tende a diffondersi in modo uniforme nello spazio disponibile. Quindi l'energia su unità di volume all'esterno, caldo e luminoso, è uguale a quella all'interno, freddo e oscuro. Questa contraddizione viene spiegata considerando che l'interno di una cavità contiene *onde stazionarie*, che vengono

riflesse dalle pareti della cavità, e la cui massima lunghezza d'onda è determinata dalle dimensioni della cavità (generalmente, alcuni metri): ora, le pareti sono dei *nodi* di vibrazione, proprio come gli estremi fissi di una corda vibrante. In questo caso, la lunghezza della corda è multiplo intero della semilunghezza d'onda $\frac{\lambda}{2}$: si pensi alle distanze tra pareti opposte come lunghezza di una corda, e si conclude che le onde di maggiore lunghezza sono paragonabili alle dimensioni della cavità. Non solo, ma una cavità può essere sorgente autonoma di energia radiante. Un forno è un esempio di radiatore e fisicamente è una cavità piena di radiazione.

Perciò si parla di *radiazione di corpo nero* sia nel caso dell'assorbimento di una radiazione esterna, sia nel caso di una sorgente di radiazione come un forno. Le pareti di un forno possono essere incandescenti e in questo caso non sembra appropriato parlare di "corpo nero", e allo stesso modo anche un corpo "scuro" a temperatura ambiente può diventare incandescente se portato a temperature elevate; non solo, ma la stessa radiazione solare manifesta le caratteristiche di una emissione di corpo nero alla temperatura di c.ca 6000 K. Questo termine sta a indicare un insieme di sistemi fisici che possono essere definiti come assorbenti o emettitori perfetti, cioè su tutte le lunghezze d'onda; il fatto che irradiano o no luce visibile dipende solo dalla lunghezza d'onda nella quale si concentra il massimo dell'energia irradiata: se questo cade nel visibile, o se nel visibile cade una frazione sufficientemente elevata dell'energia totale, il corpo "nero" appare incandescente.

La radiazione di corpo nero – detta anche *radiazione termica* soprattutto a temperature non troppo elevate – è una forma di energia in *equilibrio* con le pareti della cavità. Ciò significa che la quantità di energia che in un certo tempo passa dalla radiazione alle pareti è uguale a quella che le pareti trasferiscono alla radiazione. La radiazione va cioè considerata un deposito di energia. Quindi alla radiazione del corpo nero in equilibrio si può attribuire una *temperatura*, che è quella della cavità.

Caratteristiche della radiazione di corpo nero

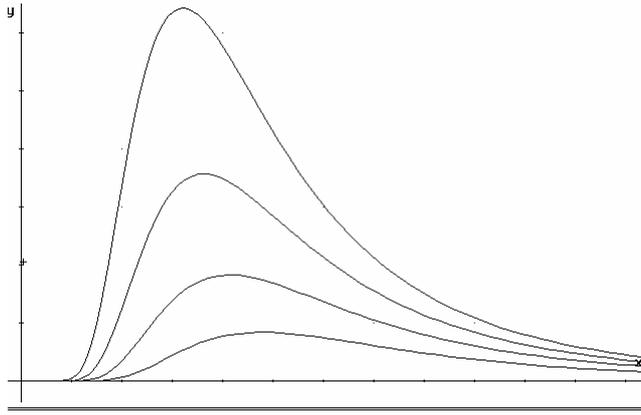
Questa osservazione ha indotto i fisici del XIX ad indagare la lunghezza d'onda della radiazione di corpo nero. I modelli teorici che venivano applicati fino alla fine del XIX secolo erano basati sul *principio di equipartizione dell'energia*, in base al quale la radiazione del corpo nero sarebbe costituita da un insieme di componenti con diversa frequenza di oscillazione, e *ad ogni componente spetta la stessa frazione dell'energia totale*. Tuttavia, benché perfettamente coerente con la termodinamica classica, questo "modello" della radiazione di corpo nero non funziona, perché proprio nella termodinamica classica si dimostra che il numero delle componenti della radiazione, distinti per lunghezza d'onda o frequenza (ricordare che la lunghezza d'onda λ e la frequenza f

sono collegate dalla relazione $\lambda = \frac{c}{f}$ dove c è la velocità della luce nel vuoto) aumenterebbe

all'aumentare della frequenza: ne conseguirebbe che il corpo nero dovrebbe contenere soprattutto piccole lunghezze d'onda, come ultravioletti e X , mentre l'osservazione contraddice questo risultato (p.es. in una cavità male illuminata prevale l'infrarosso di grande lunghezza d'onda).

Gli studi condotti nel XIX e all'inizio del XX secolo condussero ad alcuni risultati sperimentali, che si possono riassumere in quanto segue:

1. La radiazione di corpo nero si distribuisce su diverse lunghezze d'onda in un modo caratteristico, dipendente dalla temperatura, secondo il cosiddetto *spettro del corpo nero* e si può definire una grandezza, che esprime la frazione di energia associata ad ogni lunghezza d'onda, il cui grafico è il seguente (sull'asse X la λ , sull'asse Y la potenza irradiata per unità di superficie corrispondente a quella λ).



Questo grafico evidenzia la dipendenza della radiazione dalla temperatura assoluta. Ad ogni temperatura del corpo nero (cioè della sua radiazione) corrisponde una curva diversa, e ogni curva presenta un massimo la cui posizione dipende dalla T . A temperature crescenti aumenta l'energia totale della radiazione, e quindi aumenta anche l'ordinata del massimo. L'ascissa del massimo corrisponde a una particolare lunghezza d'onda, che indichiamo con λ_{MAX} , anch'essa funzione della temperatura; infatti, se T aumenta, il massimo si "sposta" verso le lunghezze d'onda minori. Come si vede, a qualsiasi temperatura l'energia associata ai valori estremi delle lunghezze d'onda tende a zero.

2. La lunghezza d'onda del massimo è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta (**legge dello spostamento o di Wien**), secondo l'equazione

$$\lambda_{MAX} \cdot T = \text{costante}$$

Il valore della costante è $\approx 0,29 \text{ cm}\cdot\text{K}$

Questa legge ha un valore fondamentale, in quanto spiega il colore di un corpo incandescente in funzione della temperatura, ed è il fondamento della *misura ottica della temperatura*. Quando un corpo (idealmente "nero" nel senso fisico del termine) viene riscaldato, in base alla legge di Wien la radiazione si "sposta" verso lunghezze d'onda più piccole. A temperature di poche decine di $^{\circ}\text{C}$, cioè relativamente "basse", la lunghezza d'onda nella quale si concentra il massimo dell'energia irradiata è relativamente "grande", cioè siamo nelle microonde e nell'infrarosso, non visibile, e pochissima energia viene emessa nel campo del visibile. L'oggetto appare scuro. Quando la T aumenta, la radiazione si "sposta" verso le lunghezze d'onda più piccole, cioè verso il visibile, finché una parte apprezzabile dell'energia emessa viene a trovarsi nel rosso. Al crescere della T il massimo si sposta sempre di più verso il violetto e oltre. Ciò corrisponde al fatto che se riscaldiamo un corpo, questo passa dal rosso scuro al rosso vivo, poi all'arancione, poi al giallo e infine al bianco (*temperatura del calor bianco*) quando tutte le componenti del visibile fanno parte della radiazione in misura consistente. Alla temperatura di circa $6\,000 \text{ K}$ la lunghezza λ_{MAX} si trova in corrispondenza del giallo. La radiazione di corpo nero che corrisponde a un massimo di 6000 gradi corrisponde alla luce naturale, che è "bianca"; questo paradosso illustra come il corpo "nero" non sia affatto nero, ma deve essere inteso come un emettitore su tutte le frequenze d'onda, secondo la curva caratteristica del corpo nero ad una data temperatura.

3. L'energia totale irradiata per unità di tempo (potenza) e di superficie è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta (**legge di Stefan – Boltzmann**), secondo la formula

$$W = \sigma T^4$$

dove S è la superficie del corpo radiante e σ una costante universale nota come *costante di Stefan*. $[\sigma \approx 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}]$

Quanti di radiazione

Agli inizi del XX secolo, il fisico tedesco **Max Planck**, nel tentativo di risolvere il problema del corpo nero, introdusse il nuovo concetto di *quanto di radiazione*. Secondo la Fisica classica, l'energia può essere indefinitamente divisibile, come lo spazio il tempo e come tutte o quasi le grandezze fisiche, per le quali non è definito un valore minimo. Secondo Planck, invece, l'energia E associata ad un'onda elettromagnetica di frequenza ν è un multiplo intero di una quantità minima detta *quanto*, il cui valore è proporzionale alla frequenza. In base alla **legge di Planck**

$$E = h \nu$$

dove “ h ” è una costante (detta “**costante di Planck**”) che vale $6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Ne segue che la radiazione ha una struttura discreta (cioè è composta da unità energetiche minime, come la materia è costituita da atomi).

Da questo punto di vista la radiazione ha un carattere “corpuscolare”, e non solo ondulatorio, il che appare contraddire l'idea intuitiva di onda e di corpuscolo. Infatti si pensa all'onda come un'entità estesa nello spazio, mentre le particelle sono localizzate. Fenomeni come la diffrazione e l'interferenza si spiegano solo in base al modello ondulatorio. Va detto però che il “quanto” di radiazione non è una particella nel senso classico del termine, cioè un punto materiale, ma l'energia minima associata ad una data frequenza. Tuttavia, in certi casi la radiazione manifesta un carattere chiaramente corpuscolare, e ciò accade specialmente alle piccolissime lunghezze d'onda, cioè a grandi frequenze, come raggi X e γ . Perciò il “quanto” elettromagnetico è stato identificato come una particella di massa e carica elettrica nulle che si muove sempre alla velocità della luce, detta **fotone**.

E' evidente che i quanti più energetici sono quelli X e γ , perché hanno lunghezza d'onda minore, mentre quelli delle onde radio microonde ecc. trasportano meno energia. Da questo punto di vista la luce visibile si colloca a metà tra i due estremi.

Ciò spiega molto bene il diverso comportamento della radiazione elettromagnetica rispetto alla lunghezza d'onda. Le onde radio manifestano tutti i comportamenti caratteristici delle onde, in particolare la diffrazione (che permette loro di superare catene montuose), e non sembrano influenzare la materia (i loro quanti hanno energie troppo piccole per agire sugli elettroni negli atomi), e quindi sono costituite da un numero enorme di fotoni ciascuno dei quali ha pochissima energia. Invece, i raggi X (e ancora di più i γ) sono in grado di interagire con la materia anche in modo distruttivo. Per es. gli X sono in grado di *ionizzare* i gas, e una esposizione a una intensa radiazione γ può essere letale. Infatti X e γ sono costituiti da quanti assai energetici; un quanto X che colpisca un atomo trasmette abbastanza energia da strapparne almeno un elettrone (e quindi ionizzare l' atomo bersaglio), mentre i γ sono in grado di attraversare pareti di piombo dello spessore di decine di centimetri. Nel complesso X e γ manifestano uno spiccato carattere *corpuscolare*, mentre le loro proprietà ondulatorie sono meno evidenti (però è possibile ottenere diffrazione dei raggi X facendoli passare attraverso un cristallo: questo perché gli spazi vuoti tra gli atomi di un cristallo sono paragonabili alle lunghezze d'onda piccolissime degli X).