

LO SCRIGNO DI PROMETEO

COLLANA DI DIDATTICA, DIVULGAZIONE E STORIA DELLA FISICA

Direttore

Ettore GADIOLI
Università degli Studi di Milano

Comitato scientifico

Sigfrido BOFFI
Università degli Studi di Pavia

Giovanni FIORENTINI
Università degli Studi di Ferrara

Marco Alessandro Luigi GILIBERTI
Università degli Studi di Milano

LO SCRIGNO DI PROMETEO

COLLANA DI DIDATTICA, DIVULGAZIONE E STORIA DELLA FISICA



La conoscenza completa delle leggi fisiche è la meta più alta a cui possa aspirare un fisico, sia che essa abbia uno scopo puramente utilitario. . . sia che egli vi cerchi la soddisfazione di un profondo bisogno di sapere e la solida base per la sua intuizione della natura.

Max PLANCK

La Fisica ha come scopo capire il rapporto tra l'uomo e la natura, non solo da un punto di vista scientifico, ma anche filosofico, e ha cambiato in modo irreversibile la nostra vita tramite le sue ricadute tecnologiche.

La spiegazione e la divulgazione dei concetti che stanno alla sua base, dati quasi per scontati, ma lungi dall'essere noti o compresi da molti, e l'evoluzione delle tecniche sperimentali, che hanno permesso di scoprire le leggi che regolano i fenomeni naturali e delle teorie via via elaborate, sono perciò argomenti di studio e riflessione di rilevanza primaria.

Questa collana si rivolge a chi abbia desiderio di approfondire o discutere questi temi ed è aperta a chi voglia collaborarvi con contributi originali.

Classificazione Decimale Dewey:

530.092 (23.) FISICA. Persone

ETTORE GADIOLI

**COME È CAMBIATA
LA NOSTRA VISIONE DEL MONDO**

**I CONTRIBUTI DI PLANCK,
DE BROGLIE E EDDINGTON**





©

ISBN
979-12-218-0780-6

PRIMA EDIZIONE
ROMA 21 GIUGNO 2023

*Dedicato alla mia famiglia
che ha reso bella la mia vita*

INDICE

- 11 *Introduzione*
- 13 Max Planck
La nascita della meccanica quantistica
- 45 Louis Duc de Broglie
L'unificazione tra radiazione e materia
- 77 Arthur Stanley Eddington
La prima teoria del tutto
- 95 *Indice dei nomi*

INTRODUZIONE

In questo breve testo parlo di tre giganti della fisica del 1900: Max Planck, Louis de Broglie ed Arthur Stanley Eddington.

Nel 1888 H. Hertz osservava le onde elettromagnetiche previste da Maxwell. Era l'apogeo della Fisica Classica le cui leggi sembravano aver spiegato ogni possibile fenomeno. Agli scienziati non sarebbe restato altro che migliorare di qualche decimale i valori di qualche costante. Invece... In soli quattro anni, dal 1896 al 1900, quattro scoperte mostrarono che vi era tutto un nuovo mondo da scoprire, il mondo microscopico che si scoprirà retto da leggi ben diverse da quelle del mondo macroscopico fino ad allora osservato: la scoperta dei raggi X, della radioattività naturale, dell'elettrone e della quantizzazione dell'energia.

Scoperte che avrebbero cambiato il mondo, il nostro modo di vivere e avrebbero originato una serie di straordinari futuri sviluppi; tuttavia volendo stabilire una scala di valori, la scoperta della quantizzazione dell'energia con la introduzione da parte di Planck del quanto di azione h è indubbiamente quella di maggior valore che lo colloca di diritto a fianco di Galileo, Newton, Maxwell e Einstein.

Ventitré anni dopo, de Broglie unificò la descrizione della Radiazione e della Materia dimostrando che entrambe hanno un duplice aspetto corpuscolare e ondulatorio dando così origine alla Meccanica Ondulatoria che è una delle due formulazioni equivalenti delle leggi della Meccanica Quantistica.

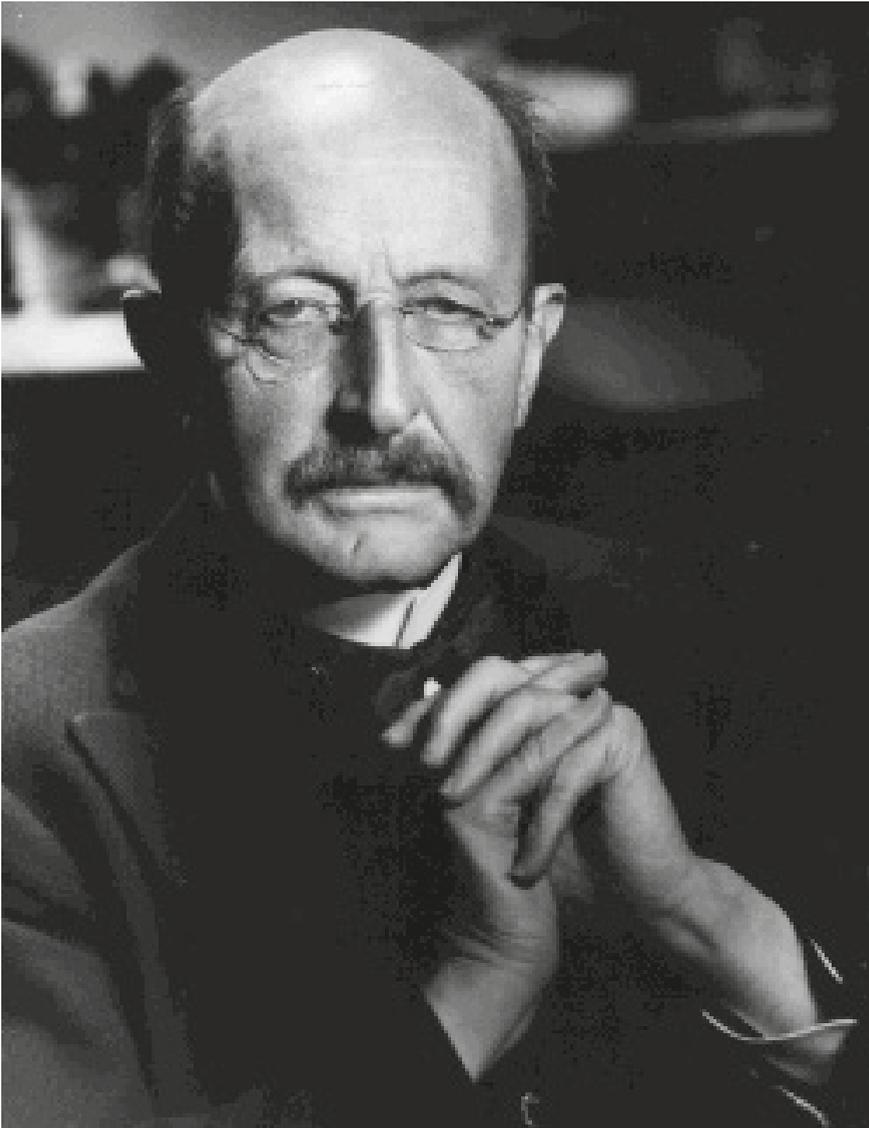
In questi due brevi ritratti mi soffermo sulla genesi e lo sviluppo di queste loro scoperte, inaspettate e perfette, conclusesi con l'enunciazione di leggi il cui contenuto rimane inalterato a tutt'oggi e nessuno ha potuto migliorare in successivi lavori.

Eddington ha dato fondamentali contributi all'Astronomia, ha fondato l'Astrofisica, contribuito alla affermazione della Relatività Generale di Einstein con la prima accurata misura della deflessione della luce dal campo gravitazionale del sole, suggerito che l'energia del sole e di tutte le stelle, almeno all'inizio della loro vita, derivi dalla fusione di quattro protoni in un nucleo di elio. Alla fine della sua vita cercò di formulare una teoria che fosse capace di spiegare, partendo da pochi principi, ogni possibile fenomeno naturale. Tentativo troppo prematuro per le conoscenze che si avevano al tempo della sua formulazione, ma affascinante e gravido di grandi implicazioni non solo in ambito Fisico, ma anche Filosofico e Metafisico che oggi molti sperano possa concretizzarsi e proprio per questo merita di essere ricordato.

Ringrazio mia moglie Enrica e i miei amici e colleghi Mauro Giannini e Ignazio Licata per una attenta lettura del testo, utili suggerimenti e la correzione di alcuni errori.

MAX PLANCK

LA NASCITA DELLA MECCANICA QUANTISTICA



Oggi nell'immaginario collettivo si pensa sia molto importante stabilire chi sia il migliore in ogni possibile ambito: sportivo, scientifico, politico e, quando questo non sia sufficiente, chi siano i migliori o come spesso si dice *i top dieci* in una determinata disciplina. È ovvio che stilare una ragionevole classifica di merito che coinvolga soggetti che sono vissuti e hanno operato in periodi, ambiti o società spesso totalmente diverse e hanno anche avuto vicende personali diverse è impossibile, tuttavia penso che leggere queste "classifiche" sia utile per capire la società o i gruppi di persone che le hanno espresse e le ragioni che li hanno portati a queste specifiche convinzioni e, in certi casi, certezze. Le conclusioni che se ne possono trarre sono importanti in ambito psicologico e sociologico e aiutano anche a capire le forme di "manipolazione" a cui tutti siamo esposti.

Questo avviene anche in ambito scientifico in cui dovrebbero prevalere la competenza basata su una conoscenza obiettiva in cui la razionalità dovrebbe avere il ruolo principale soprattutto nell'ambito di Istituzioni o Enti che godono di un'aurea di rispettabilità ampiamente condivisa. Così the Institute of Physics e l'Observer in ambito britannico hanno stilato classifiche di questo tipo per indicare quali siano stati i fisici più importanti. Ce ne sono molte altre e chi avesse la pazienza e il desiderio di farlo potrebbe trovarle girando sul Web. Leggendole sono rimasto allibito dato che oltre ai nomi che tutti si aspettano tipo Galileo, Newton, Einstein appaiono scienziati, sì di grande valore, ma che, almeno io, non mi aspetterei di trovare⁽¹⁾.

Quello che sorprende di più in classifiche di questo tipo non è tanto chi vi compare, ma piuttosto chi non vi compare. Tuttavia anche quando si dissenta è abbastanza spontaneo, e io in questo non mi sottraggo,

(1) Chi sia interessato può ad esempio leggere *I dieci geni che hanno cambiato la fisica e il mondo intero*, di R. Evans e B. Clegg nella collana "I volti della Storia" della Newton Compton Editori. Secondo gli autori i dieci sono in ordine cronologico: Galileo, Newton, Faraday, Maxwell, Maria Curie, Rutherford, Einstein, Bohr, Dirac e Feynman. Quello che trovo molto discutibile è l'I nel titolo. Il titolo del testo inglese è in effetti diverso: *Ten physicists who transformed our understanding of reality* e meno criticabile in apparenza. Tuttavia gli autori non sono certo esenti da critiche. Nell'Introduzione nel domandarsi se questa lista sia ragionevole discutono se in essa non si dovesse ad esempio includere Nikola Tesla cadendo, a mio parere nel ridicolo. Si badi bene, tutti gli scienziati che sono elencati, incluso Tesla, sono stati geni che hanno dato fondamentali contributi alla conoscenza, ma affermare che tutti siano in assoluto da classificare tra i più grandi...!

domandarsi, quando si consideri un particolare scienziato, quanto sia stato grande il suo contributo. Credo che questo sia ragionevole. Quello che è più difficile, per le ragioni che ho esposto più sopra, è spesso il paragone tra i diversi scienziati.

Mentre è difficile e, secondo me, impossibile proporre una classifica tra scienziati esente da ogni critica trovo sia molto più ragionevole domandarsi quali siano i lavori, o per meglio dire le *Scoperte* che sono stati fondamentali per lo sviluppo delle conoscenze, perché in questo caso si possono stabilire dei criteri obiettivi che ci possono aiutare nella nostra scelta.

Dopo averci pensato a lungo io credo che i più importanti siano questi:

- che la scoperta sia nuova e inaspettata. In altre parole il fatto che nessuno avesse previsto o anche ipotizzato ciò che è stato scoperto;
- le conseguenze della scoperta;
- i risultati del lavoro che malgrado tutti i successivi sviluppi, sono rimasti perfettamente validi e non migliorabili.

Fatte queste premesse, io penso, e nel seguito presenterò le ragioni che mi spingono ad affermarlo, che il lavoro, o meglio i lavori a cavallo della fine dell'ottocento, con cui Max Planck ha dato origine alla Meccanica Quantistica, scoprendo la quantizzazione dell'energia, soddisfino al più alto grado possibile i tre criteri che ho elencato facendo sì che siano da stimare a buon titolo tra i contributi più importanti che siano mai apparsi nell'ambito della fisica.

Mentre libri su scienziati come Galileo, Newton, Einstein e Bohr sono innumerevoli, biografie e studi critici sull'opera di Max Planck sono pochi portando a una generale ignoranza della sua opera e sul suo significato anche se recentemente il suo nome che fino a non molti anni fa era confinato alla citazione della sua importantissima costante naturale h , compare sempre più spesso in molti lavori anche di tipo divulgativo in cui si parla di lunghezza di Planck, tempo di Planck, massa di Planck. Anche una delle più importanti missioni spaziali dell'ESA, per la misura del Cosmic Microwave Background, essenziale per

studiare la struttura e l'evoluzione dell'universo primigenio è stata giustamente, e vedremo il perché, intitolata al suo nome. Altri suoi fondamentali contributi, soprattutto nell'ambito della termodinamica sono invece ampiamente ignorati. A un lettore interessato a un approfondimento di concetti a cui farò riferimento in seguito segnalo un testo di Paolo Campogalliani⁽²⁾ e la raccolta di alcuni saggi di Planck pubblicata da Bollati Boringhieri⁽³⁾. Desidero anche citare il libro dedicato a Planck edito da Champs-Flammarion che ho molto apprezzato per la Introduzione di André George⁽⁴⁾ e il Necrologio scritto da Max Born per la Royal Society⁽⁵⁾. Un altro lavoro, da cui ho tratto molte informazioni è dovuto a J. C Boudenot e G. Cohen-Tannoudji⁽⁶⁾.

Poco prima della sua morte, Planck reduce da una serie infinita di dolorose esperienze, le ultime delle quali erano state la morte del figlio Erwin, barbaramente giustiziato dalle SS nella carneficina seguita al fallito attentato contro Hitler, la distruzione della sua casa e della sua immensa biblioteca, in particolare degli originali dei suoi scritti e del suo diario personale, dopo giorni in cui era sopravvissuto vagando nei boschi presso Magdeburgo, giunto sfinito insieme a sua moglie a Gottinga il 4 giugno del 1945 e nominato Presidente dell'Istituto Kaiser Wilhelm, che di lì a poco doveva diventare la Società Max Planck, la più prestigiosa Istituzione Scientifica Tedesca, scriveva la sua Autobiografia Scientifica, uno scritto breve, ma pieno di importanti informazioni, pervaso da una straordinaria autoironia, che nessuno potrebbe immaginare sia stato scritto con tale garbo, brio e, nello stesso tempo, profondità da un uomo stanco e amareggiato giunto ormai alla fine della sua vita⁽⁷⁾.

L'Autobiografia⁽³⁾ inizia con questa affermazione: «il mondo esteriore è qualcosa di indipendente dall'uomo, qualcosa di assoluto, e la ricerca delle leggi che si applicano a questo assoluto mi è apparsa come la

(2) P. Campogalliani, *Max Planck, la teoria della radiazione termica*, FrancoAngeli, 1999.

(3) M. Planck, *La conoscenza del mondo fisico*, Bollati Boringhieri, 1993.

(4) M. Planck, *Autobiographie Scientifique et derniers Écrits*, Flammarion, 1960.

(5) M. Born, *Max Karl Ernest Ludwig Planck, 1858-1947*, <https://royalsocietypublishing.org/>.

(6) J.C. Boudenot e G. Cohen-Tannoudji, *Max Planck et les quanta*, Ellipses Éditions Marketing S.A., 2001.

(7) Più di ogni parola lo testimonia la toccante fotografia di Planck che Max Born, uomo di grande sensibilità e umanità pone all'inizio del suo necrologio.

più sublime occupazione scientifica che si possa vivere». Per raggiungere questo obiettivo Planck aveva deciso di dedicarsi a un settore della fisica che riteneva fondamentale e adatto a una rigorosa indagine partendo da pochi assunti: La Termodinamica e in particolare il suo secondo principio.

Le prime ricerche di Planck su questo argomento vennero esposte nella sua Tesi di Dottorato all'Università di Monaco nel 1879. Riassumiamo velocemente il suo contenuto. Secondo le parole di Planck «Clausius dedusse la sua dimostrazione [della validità] del secondo principio della termodinamica dall'ipotesi secondo cui il calore non può passare spontaneamente da un corpo freddo a un corpo caldo... questo significa non soltanto che il calore non passa direttamente da un corpo freddo a uno caldo, ma che ugualmente sia impossibile trasferire in alcun modo calore da un corpo freddo a uno caldo senza che non resti in natura qualche cosa di cambiato che serva da compensazione», una *traccia*. Il tentativo di esprimere in modo completo questo concetto lo portò a concludere che «il processo di conduzione del calore [da un corpo caldo a uno freddo] non può essere invertito totalmente, in nessun modo». Planck chiamò questi processi che non possono essere completamente invertiti «processi naturali». Il termine che oggi si usa è irreversibile. Tuttavia, per certi aspetti io penso che la definizione di Planck sia più significativa. Sapere se un processo è reversibile o irreversibile dipende solo dallo stato iniziale e dallo stato finale che vengono coinvolti nella trasformazione e il fatto che un processo sia irreversibile mostra che in un certo qual senso la natura preferisce lo stato finale a quello iniziale e Planck per descrivere questo fatto fa ricorso al concetto di entropia, già introdotto da Clausius, che è un indice per così dire dello stato di disordine di un sistema fisico. Così Planck esprime la seconda legge della termodinamica con l'affermazione che «in ogni processo naturale la somma delle entropie di tutti i corpi che sono coinvolti in questo processo aumenta sempre». Oggi questa affermazione e le sue innumerevoli conseguenze sono parte integrante di ogni corso di Termodinamica.

Il lavoro di Planck secondo le sue stesse parole non ebbe alcun effetto. Secondo lui si pensò persino che non fosse sufficiente per approvare il suo Dottorato che gli venne assegnato per la sua attività complessiva

nell'ambito dell'Istituto in cui studiava e lavorava. Tra gli scienziati a cui faceva riferimento Helmholtz, che fu suo professore durante un anno trascorso a Berlino, dopo un triennio di studi a Monaco e di cui poi divenne collega e amico non lo lesse neppure, Kirchhoff, che insieme a Helmholtz fu suo professore a Berlino, non lo ritenne corretto affermando che l'entropia può essere definita solo in riferimento a processi reversibili! Clausius, a cui spedì il suo lavoro, non gli rispose.

Secondo molti importanti scienziati, l'aumento dell'entropia nei processi naturali è la legge più importante di tutta la fisica. Va tuttavia sottolineato che l'entropia fino ad allora rimaneva un concetto piuttosto vago e non si aveva una legge che permettesse di valutarla quantitativamente anche se se ne poteva calcolare la variazione. A questo come vedremo ovvierà proprio Planck nell'ambito degli studi che lo portarono a scoprire la quantizzazione dell'energia.

Ancor più grave del mancato apprezzamento del suo lavoro, fu il fatto che, come scoprì poi, alle stesse conclusioni era già giunto Josiah Willard Gibbs, che aveva pubblicato i suoi lavori su un giornale completamente sconosciuto in Europa⁽⁸⁾, e che per di più le aveva espresse nell'ambito di un contesto più generale. Alla stessa deprimente conclusione sarebbe giunto in seguito anche Einstein, quando scoprì che molti dei suoi risultati nell'ambito della Termodinamica, che anche lui considerava una delle discipline fondamentali della fisica, erano stati già raggiunti da Gibbs.

Nonostante questo, partendo dalla considerazione che uno stato di equilibrio di un sistema corrisponde al valore massimo della sua entropia Planck giunse a molti importanti risultati nello studio dei cambiamenti di stato e dei fenomeni che riguardano il mescolamento dei gas, le reazioni chimiche e le proprietà delle soluzioni diluite. Questi lavori portarono Planck a ottenere il posto di professore aggiunto alla cattedra di Fisica Teorica prima a Kiel poi a Berlino alla morte di Kirchhoff, dove nel 1882, tre anni dopo divenne titolare della cattedra di fisica teorica che ricoprì fino alla sua pensione nel 1926. Non mi soffermo su questa fase della carriera di Planck se non per dire che divenne intimo amico di Helmholtz di cui poté apprezzare sia le qualità umane che il valore scientifico che non aveva potuto intuire quando ne era

(8) *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences.*

stato studente, e menzionare il suo rapporto conflittuale⁽⁹⁾ con Ludwig Boltzmann che si può sintetizzare dicendo che Planck riteneva che le leggi che riguardavano l'entropia avessero un carattere fondamentale indipendente dai modelli particolari che si potevano adottare per descrivere un determinato fenomeno, mentre Boltzmann pensava che potessero essere dedotte riferendosi alla teoria cinetica dei gas che aveva sviluppato insieme a Maxwell.

Veniamo ora ai lavori che rendono Planck uno dei fisici più grandi e importanti nella storia della fisica. Come ho già ricordato Planck ambiva a capire e contribuire a spiegare le leggi fondamentali, quelle che possiamo definire assolute. Proprio a Berlino, Gustav Kirchhoff, lo scienziato di cui era divenuto successore, ne aveva scoperto una, che riguardava l'emissione e l'assorbimento della luce dai corpi.

Kirchhoff fu uno scienziato di prima grandezza che diede importanti contributi all'elettricità, la termodinamica e l'ottica. Probabilmente il suo contributo più noto fu la scoperta (con Bunsen) che gli atomi di ogni sostanza, emettono e assorbono radiazioni caratteristiche, diverse da quelle emesse da ogni altro atomo. Fu una scoperta fondamentale che non solo permise in seguito di capire quale sia la struttura di ogni atomo, ma di identificare le componenti di ogni sostanza studiando le radiazioni che emettono gli atomi che la costituiscono. È una scoperta che sta alla base dell'astrofisica permettendo non solo di identificare le sostanze che costituiscono le stelle, ma anche il mezzo interstellare⁽¹⁰⁾.

Planck tuttavia, nella sua ricerca dell'assoluto, non fu interessato in modo particolare da queste scoperte, dato che sembravano indicare proprietà degli atomi diverse per ognuno di essi. Alla fine dell'ottocento le proprietà chimiche di ogni atomo noto erano già state studiate in modo empirico e Mendeleev le aveva sintetizzate in modo mirabile nella sua Tavola Periodica, ma nessuno aveva tentato di spiegarle. Lo stesso accadeva nell'ambito della teoria cinetica dei gas sviluppata da Maxwell

(9) Questo non influì sulla stima che ebbe sempre per Boltzmann. Planck infatti, più di una volta, propose al Comitato di Assegnazione dei premi Nobel il nome di Boltzmann. Per non menzionare come vedremo il più grande dono che possa farsi in ambito scientifico, associando il nome di Boltzmann alla costante k che venne da lui introdotta e misurata, e di cui Boltzmann ignorava il valore.

(10) Vale la pena ricordare che l'elio fu scoperto studiando lo spettro delle radiazioni emesse dal sole.

e Boltzmann. Solo la scoperta, di Rutherford, del nucleo atomico, dieci anni dopo la fondamentale scoperta di Planck che sto per discutere, permise, proprio con questa, di formulare le prime teorie della struttura atomica.

Kirchhoff però aveva anche scoperto nel 1862 una funzione universale che descrive le radiazioni emesse da un corpo nero, un corpo capace di assorbire tutta l'energia di tipo termico che incide su di esso, e che proprio per questa sua caratteristica suscitò il più vivo interesse di Planck.

Ogni corpo riscaldato emette radiazioni elettromagnetiche che cadono nello spettro visibile quando la temperatura del corpo supera 450 gradi K (circa 180 gradi centigradi). A questa temperatura, il corpo osservato con la coda dell'occhio (visione extrafoveale) appare grigiastro. All'aumentare della temperatura il colore del corpo cambia gradualmente fino a divenire bianco⁽¹¹⁾. Per fissare le idee si ricordi che la luce emessa dal sole corrisponde a una temperatura della sua superficie esterna di ≈ 5750 K.

Per descrivere il fenomeno si attribuisce ad ogni corpo un potere radiante che permette di calcolare l'energia che un'areola dS del corpo irradia nell'intervallo di frequenze tra ν e $\nu+d\nu$ nel tempuscolo dt . Il potere radiante però non dipende solo dal potere emissivo del corpo considerato, che indica il suo specifico contributo all'energia emessa, ma anche dai corpi che lo circondano e dalla loro disposizione poiché alla radiazione emessa dal corpo contribuiscono anche le radiazioni emesse dai corpi circostanti e da lui, in parte assorbite e in parte riflesse. Per fare un esempio la luna emette luce che riceve dal sole che in parte assorbe e in parte riflette.

Mentre l'energia irradiata da un corpo è descritta dal suo potere radiante, le frazioni di energia incidente che il corpo assorbe e riflette sotto forma di radiazioni sono descritte dai suoi fattori di assorbimento e di riflessione. Vedremo che, sotto opportune condizioni, potere radiante e fattore di assorbimento sono legati tra di loro.

La grande idea di Kirchhoff fu di studiare la radiazione emessa da un corpo quando siano soddisfatte queste due condizioni: (a) l'energia che

(11) Che le leggi riguardanti il riscaldamento dei corpi abbiano un valore universale indipendente dai corpi particolari osservati è indicato dall'osservazione fatta nel 1792 da Thomas Wedgwood che la maggior parte dei corpi diventano rossi a una temperatura di 760°C.