

A. Lombardi, *Le curve in energia. Un nuovo standard per una fisica nuova*, Atti del XXV Congresso Nazionale di Storia della Fisica e dell'Astronomia, Milano, 10-12 novembre 2005, (Milano: SISFA, 2008): C26.1-C26.6.

LE CURVE IN ENERGIA. UN NUOVO STANDARD PER UNA FISICA NUOVA

ANNA MARIA LOMBARDI
Università degli Studi di Milano

Abstract. Nell'ultimo decennio del XIX secolo si assiste in letteratura all'affermarsi delle curve in energia come rappresentazioni affidabili dei fenomeni di radiazione. Per la comunità scientifica, il diffondersi di questo nuovo standard è il punto di partenza per affrontare con decisione lo studio del cosiddetto spettro di corpo nero, e degli apparenti paradossi che tale analisi lascia emergere. Può allora risultare interessante documentare questo nuovo atteggiamento verso le curve in energia, diffusosi in quegli anni critici, per esempio tra i maggiori fisici sperimentali tedeschi.

1. INTRODUZIONE.

È nota l'importanza dell'analisi delle curve in energie, e in particolare delle "curve di corpo nero", per la nascita della meccanica quantistica alla fine del XIX secolo. In letteratura non è stato tuttavia studiato in maniera approfondita lo sviluppo e la diffusione di questo tipo di grafici, che in realtà solo nel corso dell'ultimo decennio dell'Ottocento vennero accettati come rappresentazioni scientifiche della distribuzione di radiazione alle diverse lunghezze d'onda. In un lavoro precedente sono già state analizzate le tappe fondamentali della storia del bolometro, il primo strumento in grado di produrre un unico spettro comprendente un largo range della radiazione elettromagnetica (dall'infrarosso all'ultravioletto)¹; in un successivo lavoro è stato inoltre evidenziato come, nel decennio successivo alla costruzione del bolometro, la comunità scientifica accettasse come standard per rappresentare la radiazione emessa da una sorgente – celeste o di laboratorio – soltanto gli spettri a righe, costringendo così l'inventore del bolometro, Samuel Pierpont Langley, a costruire una complessa apparecchiatura automatica, in grado di trasformare meccanicamente i bolografi (ovvero le curve di distribuzione dell'energia in funzione della lunghezza d'onda) appunto in spettri a righe.²

¹ Lombardi, Anna Maria (2003). "The Bolometer and the Spectro-Bolometer, as Steps towards the Black-Body Spectrum", *Nuncius*, 2003, XVIII, n.2: 825-840.

² Lombardi, Anna Maria (2002). "Lo spettrobolometro di Langley e il suo contributo all'individuazione della curva di corpo nero", *Atti SISFA*, 2002: 279-294. Vedi anche Lottgers, Andrea (2000). *Representation and transformation of Langley's map of the infrared solar spectrum*, in: Hentschel, Klaus; Wittmann, Axel (eds.) (2000). *The role of visual representations in astronomy: history and research practice*, (Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2000): 118-135.

In queste pagine si cerca di individuare il momento in cui lo spettro in energia riesce ad affermarsi nella comunità scientifica, sottolineando così l'importante ruolo giocato dalla realizzazione di bolometri tedeschi presso il Physikalisch-Technischen Reichsanstalt di Berlino.

2. UNO STRUMENTO, IL SUO COSTRUTTORE

Nel 1881, con lo scopo di dimostrare la propria tesi su una generale sottostima del valore della costante solare³, Langley mette a punto un nuovo strumento, che chiama *bolometro*, dal greco "misuratore di raggio"; in sostanza si tratta dell'evoluzione del termometro differenziale, dove la variazione di temperatura dovuta all'intensità di energia incidente su un braccio di un ponte di Wheatstone causava una variazione proporzionale di resistenza. Il nuovo strumento, per la sua eccezionale sensibilità, si rivelò presto straordinariamente interessante: esso permetteva di indagare zone completamente inesplorate nell'infrarosso, e consentiva di ottenere spettri "normali", in contrapposizione ai classici spettri prismatici, che era difficile confrontare tra loro. Inoltre, per la prima volta proprio con il bolometro, Langley fu in grado di raccogliere informazioni con un unico apparato strumentale su un range dello spettro elettromagnetico che si estende dall'ultravioletto al visibile, abolendo perciò il notevole grado di incertezza legato ai differenti metodi con cui si "incollavano" diverse parti dello spettro, misurate con l'ausilio di fenomeni fisici differenti.

L'inventore del bolometro ricevette un giusto spazio sulle pagine della letteratura internazionale, come documenta in Tav. 1 uno schematico elenco dei maggiori articoli da lui pubblicati sull'argomento.

Il costante lavoro di Langley, consistente da un lato nel migliorare la propria invenzione, nell'altro nell'espandere i campi di indagine a cui esso poteva essere applicato, venne quindi ampiamente diffuso nell'ambito della comunità scientifica internazionale, suscitando ammirazione per l'incredibile sensibilità a cui era giunto nella misura della intensità della radiazione emessa da una sorgente di laboratorio o celeste. Si trattava però sempre di strumenti costruiti sotto la supervisione di Langley, e di ricerche effettuate dallo staff di Langley, mentre i tentativi fatti altrove di riprodurre le misure bolometriche avevano portato, come vedremo in seguito, a degli insuccessi, motivati dall'estrema delicatezza dello strumento.

Una peculiarità delle misure effettuate con il bolometro era il fornire in output una curva in energia, ovvero il valore della deviazione del galvanometro (l'intensità d'energia) in funzione della lunghezza d'onda; si trattava di una presentazione inusuale dello spettro energetico di una sorgente, il quale veniva invece comunemente raccolto con uno spettro a righe.

Gli spettroscopisti si erano abituati a leggere l'intensità delle varie zone dello spettro semplicemente dall'intensità della colorazione della striscia spettrale, e la possibilità di avere un valore preciso per questo dato sembrava di secondaria importanza. Più rilevante sembrava invece il fatto che i risultati di Langley richiedessero un attento contributo del personale che rilevava i dati, mentre gli altri spettri restavano impressionati in maniera pressoché automatica.

Langley fu quindi motivato ad automatizzare le procedure con cui si ottenevano i bolografi, riuscendo nel suo intento con il nuovo spettrobolometro dello *Smithsonian Observatory*⁴. Questo successo mise però in evidenza come l'oggettività della misura, in precedenza messa in discussione nelle curve bolometriche, non fosse

³ Vedi per esempio: Hufbauer, Karl (1991). *Exploring the Sun*, (London: Taylor & Francis, 1991): 68 e segg.

⁴ "The most important and novel feature is, however, the mechanical connection of the large azimuthal circle with a distant photographic plate". Langley (1894), cit. p.131.

la causa principale della scarsa accoglienza che esse avevano ricevuto da parte della comunità scientifica. Questa sembrava piuttosto da imputarsi all'unicità di quella forma di rappresentazione dei dati, tanto che Langley si decise a mettere a punto un apparato che, in maniera automatica, era in grado di trasformare i bolografi in comuni spettri a righe⁵.

TAV.1. I PRINCIPALI ARTICOLI DI S.P. LANGLEY SUL BOLOMETRO

(Tutti gli articoli sono a nome unico, pertanto il nome dell'autore in questa lista viene omissso)

"The Bolometer and Radiant Energy", *Proceedings of the American Academy of Arts & Science*, 1881, 16: 343.

"The Mount Whitney Expedition", *Nature*, 1882: 314-317.

Professor Langley's account of his bolometric observations, and certain conclusions derivable from them, in: Young, Charles (1882). *The sun*, (London: Kegan Paul, Trench & Co., 1882): 298-308.

"Observations du spectre solaire", *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, 1882, 95: 482-488.

"The selective Absorption of Solar Energy", *American Journal of Science*, 1883, 25: 169.

"The selective Absorption of Solar Energy", *Philosophical Magazine*, 1883, 15: 153-185.

Researches on solar heat and its absorption by the Earth's atmosphere: a report of the Mount Whitney Expedition, Professional papers of the signal service, n. 15, 1884.

"Experimental Determination of Wavelengths in the Invisible Prismatic Spectrum", *American Journal of Science*, 1884, 27: 169-188.

"Bolometer", *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1884, 4: 28-29.

"Experimental Determination of Wavelengths...", *Philosophical Magazine*, 1884, 5's., 17: 194- 214.

"Determinazione sperimentale delle lunghezze d'onda nello spettro prismatico invisibile", *Nuovo Cimento*, 1884, 3's., 15: 184-186.*

"Sunlight and the Earth's Atmosphere. I", *Nature*, 1885: 17-20.

"Sunlight and the Earth's Atmosphere. II", *Nature*, 1885: 40-43.

"Observations on Invisible Heat-Spectra...", *American Journal of Science*, 1886, 31: 1-12.

"Observations on Invisible Heat-Spectra...", *Philosophical Magazine*, 1886, 5's., 21: 394-409.

"On Hitherto Unrecognized Wave-lengths", *Philosophical Magazine*, 1886, 5' s., 22: 149-173.

"On Hitherto Unrecognized Wavelengths" *American Journal of Science*, 1886, 32: 83-101.

"Sur les spectres invisibles", *Annals de chimie et de physique*, 1886, 6's., 9: 433-506.

"Sulle lunghezze d'onda fino ad ora riconosciute", *Nuovo Cimento*, 1886, 20: 43-44*.

"On the Emission-Spectra of Bodies at Low Temperatures", *Nature*, 1886: 426.

"Sulle lunghezze d'onda fino ad ora non misurate", *Nuovo Cimento*, 1888, 3' s., 23: 95.*

"On the recent solar spectrum work ath the Smithsonian...", *Memorie degli Spettroscopisti*, 1894, 23: 129-136.

Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution, 1 (Washington: Government Printing Office, 1900).

"The Solar Constant and Related Matters", *Astrophysical Journal*, 1903, 17: 89-99.

*N.B.: In questi casi si tratta di sintetici resoconti del lavoro di Langley presentati all'interno della "rivista" del *Nuovo Cimento*; essi sono riportati allo scopo di testimoniare una diffusione anche in Italia dei risultati ottenuti da Langley.

Langley fu quindi motivato ad automatizzare le procedure con cui si ottenevano i bolografi, riuscendo nel suo intento con il nuovo spettrobolometro dello *Smithsonian Observatory*⁶. Questo successo mise però in evidenza come l'oggettività della misura, in precedenza messa in discussione nelle curve bolometriche, non fosse la causa principale della scarsa accoglienza che esse avevano ricevuto da parte della comunità scientifica. Questa sembrava piuttosto da imputarsi all'unicità di quella

⁵ Vedi Lottgers, Andrea (2000). *Representation and transformation of Langley's map of the infrared solar spectrum*, in: Hentschel, Klaus; Wittmann, Axel (eds.) (2000). *The role of visual representations in astronomy: history and research practice*, (Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2000):118-135.

⁶ "The most important and novel feature is, however, the mechanical connection of the large azimuthal circle with a distant photographic plate". Langley (1894), cit. p.131.

forma di rappresentazione dei dati, tanto che Langley si decise a mettere a punto un apparato che, in maniera automatica, era in grado di trasformare i bolografi in comuni spettri a righe⁷.

Quando si iniziò a comprendere l'importanza delle curve in energia per lo studio della struttura della radiazione, furono approntati alcuni tentativi di riprodurre i bolografi da parte di altri laboratori, ma le difficoltà nell'utilizzo del bolometro erano talmente improbe, che il costruttore a cui Langley commissionava i propri strumenti, William Grunow, prima del 1900 vendette in tutto soltanto 6 bolometri.⁸

3. IL BOLOMETRO IN GERMANIA

Una prima testimonianza di un riconoscimento dell'importanza del bolometro di Langley è contenuta nel testo di una conferenza tenuta da C.W. von Siemens, fratello minore di Werner Siemens, nonché titolare della filiale inglese dell'omonima ditta. La conferenza, dedicata ad una rassegna della storia della produzione e trasmissione di elettricità, nel contesto dell'interesse per la telefonia, è riportata su un supplemento dell'*American Journal*, e in essa leggiamo come "A most useful application of the thermo-electric battery for measuring radiant heat, the thermo pile, was exhibited. By means of an ingenious modification of the electrical pyrometer, named the bolometer, valuable researches in measuring solar radiations had been made by Professor Langley."⁹

Di un "bolometro di Siemens" parlava pochi anni dopo H. Helmholtz, in un articolo su *Nature* del 1888. Sappiamo anche, da una lettera inviata da Grunow a Langley, che Helmholtz aveva acquistato dal costruttore di Langley due bolometri nel febbraio 1886. Daniel Isaachsen, uno degli studenti di Helmholtz a Berlino, sei mesi più tardi inviava a Langley una relazione in cui descriveva il proprio lavoro con un bolometro. Vi venivano descritti dettagliatamente tutti i problemi incontrati, fino a concludere la propria incapacità di ottenere dati significativi con il bolometro.¹⁰

Un interesse verso le potenzialità delle curve in energie era stato inoltre mostrato a partire dal 1888 da Wilhelm Wien¹¹, e da Ferdinand Kurlbaum¹².

Si ebbe una svolta decisiva nel 1892, quando Otto Lummer e il suo collaboratore F. Kurlbaum misero a punto un proprio bolometro, presso il Physikalisch-Technischen Reichsanstalt di Berlino. Si trattava di uno strumento ancora più sensibile (si passava da una sensibilità per il bolometro di Langley del 1886 di 10^{-5} °C alla possibilità di registrare variazioni dell'ordine di 10^{-7} °C), le cui potenzialità vennero presto sfruttate sia dagli sperimentali, sia dai teorici tedeschi.¹³ A seguito

⁷ Vedi Lottgers, Andrea (2000). *Representation and transformation of Langley's map of the infrared solar spectrum*, in: Hentschel, Klaus; Wittmann, Axel (eds.) (2000). *The role of visual representations in astronomy: history and research practice*, (Thun und Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 2000): 118-135.

⁸ Loettgers, Andrea (2003). "Samuel Pierpont Langley and his Contributions to the Empirical Basis of Black-Body Radiation", *Physics in Perspective*, 2003, 5: 262-280.

⁹ Siemens, C. William (1883). "Electrical Transmission and Storage. A lecture in London before the Institute of Civil Engineers", *Scientific American Supplement*, 1883, n. 384.

¹⁰ Records di Samuel P. Langley e Charles Abbot, *Smithsonian Institution Archives*, Washington D.C., citati in (Loettgers, 2003).

¹¹ Wien, Wilhelm. "Durchsichtigkeit der Metalle", *Annalen der Physik*, 1888, 35: 48. Come è noto, nel 1893 W.Wien elaborò la propria "legge dello spostamento", che stabilisce come varia la lunghezza d'onda della radiazione emessa in funzione della temperatura, mentre nel 1896 propose una propria legge di distribuzione dell'energia di corpo nero, che troverà conferma sperimentale ad alte frequenze.

¹² Kurlbaum, Ferdinand. *Annalen der Physik*, 1888, 33: 159.

¹³ Hoffmann, Dieter (2000). "Schwarze Körper im Labor. Experimentelle Vorleistungen für Plancks Quantenhypothese", *Physikalische Blätter*, 2000, 56, n. 12: 43-47.

della pubblicazione dei due lavori fondamentali¹⁴, che presentavano le caratteristiche tecniche del nuovo strumento, vi fu infatti una vera e propria esplosione di lavori che documentavano il diffondersi sia del bolometro, sia delle curve bolometriche, le curve in energia. Tale affermazione si registrò dapprima nello stesso ambito del P.T.-Reichsanstalt, per poi generalizzarsi a tutta la comunità scientifica, così che è possibile osservare una diffusione di articoli che riportano le misure ottenute nel laboratorio tedesco anche nel mondo anglosassone. La Tav. 2 riporta un elenco dei maggiori lavori che documentano il successo del bolometro di Lummer & Kurlbaum.

Tav 2. GLI ARTICOLI SUCCESSIVI AL BOLOMETRO DI LUMMER & KURLBAUM

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Paschen, Friedrich. "Bolometrische Untersuchungen in Gitterspectrum", <i>Annalen der Physik</i>, 1893, 48: 272. • Paschen, Friedrich. "Ueber die Emission erhitzter Gase", <i>Annalen der Physik</i>, 1893, 50: 409. • Paschen, Friedrich. "Ueber die Emission der Gase", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 51: 1. • Rubens, Heinrich. "Zur Dispersion der ultraroten Strahlen im Fluorit", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 51: 381-391. • Rubens, Heinrich. <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 51: 392. • Wien, W. "Temperatur und Entropie der Strahlung", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 52: 132-173. • Rubens, Heinrich. "Pruefung der Ketteler-Helmholtzsche Dispersionsformel", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 53: 267-286. • Paschen, Friedrich. "Bolometrische Arbeiten", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 53: 287-300. • Paschen, Friedrich. "Ueber die Dispersion des Fluorits im Ultrarot", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 53: 301-336. • Paschen, Friedrich. "Ueber die Dispersion des Steinsalzes im Ultrarot", <i>Annalen der Physik</i>, 1894, 53: 337. • Rubens, Heinrich. "Die Ketteler-Helmholtzsche Dispersionsformel", <i>Annalen der Physik</i>, 1895, 54: 476. • Wien, Wilhelm; Lummer, Otto. "Methode zur Pruefung des Strahlungsgesetzes absolut schwarzer Koeper", <i>Annalen der Physik</i>, 1895, 56: 451-453. • Il "ritorno" nel mondo anglosassone: • Wien, Wilhelm; Lummer, Otto. "Method to test the radiation law for absolutely black body", <i>Nature</i>, 1895. • Lummer, Otto; Paschen, Friedrich. <i>Nature</i>, 1895. • Paschen, Friedrich. <i>Nature</i>, 1895. |
|--|

4. LA SCELTA "DELLA" CURVA DI CORPO NERO

Per motivi di spazio non è possibile riportare in queste pagine una analisi del contenuto di questi articoli; essi sono estremamente interessanti nel loro documentare come la definizione della "curva di corpo nero", come poi definitivamente accettata in seguito alle "storiche" vicende legate alle misure del 1900, fosse ancora in costruzione. Se in ambito teorico era stato da tempo manifestato un interesse per i bolografi¹⁵, vi era tuttavia indecisione su quale fosse la maniera più efficace per rappresentare la variazione di intensità di energia in funzione della lunghezza d'onda¹⁶. Gli articoli degli sperimentali tedeschi fanno "fiorire" le pagine

¹⁴ Lummer, Otto; Kurlbaum, Ferdinand (1892). "Bolometrische Untersuchungen", *Annalen der Physik*, 1892, 46: 204-224. Lummer, Otto; Kurlbaum, Ferdinand (1892), *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 1892, 12: 81-89.

¹⁵ Vedi ad esempio Rayleigh, Weber, Michelson, Wien, ripresi in Lombardi (2002), cit. e Loettger (2003), cit.

¹⁶ Lord Rayleigh. "The conventional character ... of showing energy distribution" in Lombardi (2002), p. 285.

degli *Annalen* di curve in energia già praticamente identiche alle curve di Planck, ma possiamo vedere ancora una certa incertezza nella scelta dei termini da apporre in ordinata ed in ascissa.

CONCLUSIONI

Tra il 1892 e il 1895 si diffusero enormemente in letteratura le curve in energia, che finalmente venivano accettate come portatrici di informazione scientifica.

Oltre all'enorme sforzo di Langley, nel migliorare la sensibilità del proprio strumento e nel meccanizzare le operazioni, risultò fondamentale per tale affermazione lo "sbarco in Germania" dei bolometri. Dopo un percorso non sempre lineare si arrivò ad una rappresentazione standard dello spettro, quella a cui oggi ci riferiamo come "curva di corpo nero". L'incredibile sensibilità ed affidabilità del bolometro sviluppato al P.T.- Reichsanstalt, unita ai nuovi "corpi neri" realizzati nello stesso laboratorio nel 1898 da Otto Lummer e Alfred Pringsheim, portarono alla realizzazione di curve che studiavano la radiazione di un corpo nero per temperature comprese tra -188°C e 1600°C . Furono queste curve a fornire ai teorici di fine secolo gli strumenti per selezionare come vincente la curva di distribuzione dell'energia di Planck¹⁷.

¹⁷ Kangro, Hans. *Early history of Planck's radiation law*, (London: Francis & Taylor, 1976). Kuhn, Thomas. *Black-body theory and the quantum discontinuity*, (New York: Oxford Univ. Press, 1978). Hoffmann (2000), cit.