Antonio Gandolfi
Gruppo di Storia della Fisica dell'A.I.F.

Vita AIF

Il radiometro di Crookes*

Abstract
The radiometer was introduced by Crookes in 1873. It was seen as an experimental demonstration of the pressure of light but Reynolds and Shuster showed that the effect was related in some way to the residual gas in it. So the attention was shifted toward kinetic theory of gases, but it proved inadequate, at least in the form so far known, and it was finally Maxwell to solve the problem, in 1879. The "radiometer case" is an example of how the explanation of a new experimental observation, at turn shifted between different theoretical frames, and at last it laid the foundation of new fields of research. The discussion of this case could be of great educational value as it can offer a good example of the relations between experimental observations and theoretic explanations, and of the role of "crucial experiments". All this with a very simple phenomenon and furthermore with the original literature easily available and readable, while on the other hand the physics needed for a complete explanation is rather involved.

Introduzione

Il radiometro di Crookes, o "mulinello luminoso", oggi è un giocattolo scientifico o un gadget che si trova esposto nelle vetrine degli ottici, ma anche nei laboratori delle scuole. Questo semplice strumento consiste in un'ampolla di vetro svuotata dall'aria, all'interno della quale sono poste quattro palette, ciascuna argentata da un lato e affumicata dall'altro, montate su un supporto che può ruotare su una punta [Fig. 1]. Quando lo strumento è esposto alla luce solare o è posto vicino a una sorgente di calore, le palette girano velocemente. A partire dalla sua prima presentazione, nel 1873, da parte di William Crookes, il radiometro è stato oggetto, per un breve ma intenso periodo fino al 1879, di numerose ricerche sperimentali e teoriche per capirne il funzionamento. Questo problema interessava due importanti argomenti della fisica del 19-esimo secolo: la natura della luce o del calore radiante e la teoria cinetica. Ciò che in un primo tempo sembrava una conferma della teoria elettromagnetica della luce si rivelò una sfida per la teoria cinetica dei gas – due tra i maggiori successi dei decenni precedenti – ponendo le basi per nuovi indirizzi di ricerca, quali la dinamica dei gas rarefatti e le interazioni dei gas con le superfici. Non è una sorpresa che in questa storia, fin dal principio, uno dei protagonisti sia stato James Clerk Maxwell, l'esperto più riconosciuto in quei tempi sia della teoria elettromagnetica che della teoria cinetica, colui che mise fine definitivamente alla questione giusto poco prima di morire.

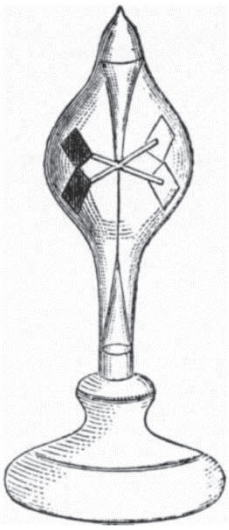

Figura 1. Radiometro o "mulinello luminoso" costruito da Geissler, così come figura nella memoria del 1876 di Reynolds e Schuster (nella forma che vediamo ancor oggi, con quattro palette rotanti con continuità dato che in ogni posizione vi sono sempre una faccia nera e una argentata esposte alla radiazione).

La "questione del radiometro" potrebbe rivestire interesse didattico, perché spesso lo strumento è presente fra le attrezzature di laboratorio delle

Nota

* Lavoro presentato alla Conferenza Internazionale su "History and Philosophy of Physics in Education (HPPE '96)", Bratislava (Slovacchia), Comenius University, 21-24 agosto 1996; vedi *Proceedings* (curatore Juraj Sebesta), p. 193. Traduzione dall'inglese a cura di S. Sgrignoli.

scuole e può facilmente attrarre la curiosità degli studenti. È un fenomeno semplice, la cui spiegazione consente di esaminare l'argomento della pressione di radiazione, che collega le prime teorie sulla natura della luce all'elettromagnetismo e alla trattazione statistica della radiazione, che ha contribuito all'origine della moderna fisica dei quanti. Si possono anche esplorare i problemi affrontati dalla teoria cinetica dei gas con i suoi successi e fallimenti. Inoltre, gli articoli originali sono facili da trovare, in tutte le lingue[1], dato che il problema ha suscitato un vasto interesse in tutta Europa, e sono anche di facile lettura. Perciò è possibile esaminare le caratteristiche e lo stile della ricerca sperimentale alla fine del 19-simo secolo, nonché le relazioni tra l'osservazione sperimentale di un nuovo fenomeno e la sua spiegazione teorica, il ruolo degli "esperimenti cruciali" e, per gli specialisti, l'importanza della figura di Maxwell tra i fisici del suo periodo.

William Crookes e il radiometro

Il radiometro fu presentato per la prima volta dal chimico e fisico inglese William Crookes a una soirée della Royal Society, nel dicembre del 1873. In precedenza, mentre cercava di determinare il peso atomico dell'elemento Tallio (che aveva scoperto qualche anno prima) con una sorta di bilancia di torsione in un bulbo a vuoto, egli aveva osservato che il calore sembrava far diminuire il peso del corpo o, meglio, che sembrava esercitare su di esso una forza repulsiva. Per studiare questa forza, costruì il suo strumento [Fig. 2] ed effettuò alcuni raffinati esperimenti che diedero luogo a una serie di sei articoli dal titolo *On attraction and repulsion resulting from radiation* (Crookes, 1874)[2]. Il suo scopo era quello di rivelare e studiare l'azione meccanica derivante dalla radiazione incidente sui corpi solidi. I suoi risultati principali sono stati [in primo luogo] il fatto che questa azione dipendesse dalla pressione del gas all'interno del bulbo, dato che c'era attrazione delle palette quando il gas lo riempiva e repulsione quando nel bulbo era fatto il vuoto fino al miglior livello ottenibile (0,1 mmHg). Rispetto alla "rifrangibilità" della radiazione, cioè alla sua lunghezza d'onda, egli ottenne l'effetto massimo con la radiazione infrarossa. Osservò anche che la forza sulla faccia annerita di una paletta era pari a cinque volte quella sulla faccia bianca. Infine, con una sorta di bilancia di torsione estremamente sensibile, misurò questa pressione, che risultò essere dell'ordine di 10^{-5} g/cm^2 con la luce di una candela posta a sei pollici di distanza dalle palette.

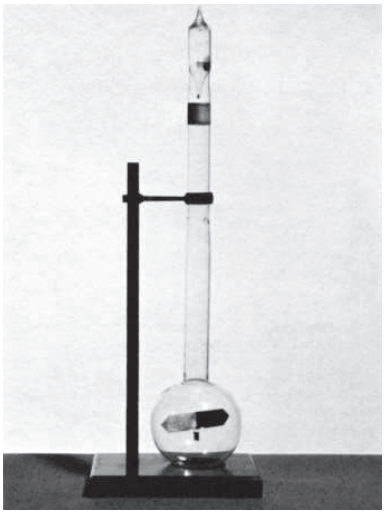

Figura 2. Radiometro di Crookes (Londra, Science Museum).

Sin dalla prima presentazione pubblica, l'esperienza del radiometro sollevò un sacco di scalpore, principalmente perché sembrava una prova dell'azione meccanica della luce, e diede origine a un lavoro molto intenso al proposito. Dal lato sperimentale fu realizzata ogni possibile variazione: dal cambiare la tempe-

Note

1 In italiano si può vedere Rossetti 1876, 1877.
2 Per una rassegna dei lavori di Crookes sul radiometro, si veda Woodruff, 1966.

ratura esterna e la sorgente di radiazione – dal ghiaccio alle fiamme alle scariche elettriche, al cambiare i materiali delle palette e il tipo di riempimento gassoso, o porre il bulbo in un campo magnetico o sottoporlo a correnti elettriche indotte, ecc. Si trovò che la frequenza di rotazione seguiva una legge dell'inverso del quadrato al variare della distanza della sorgente e, perciò, lo strumento poteva essere usato per misurare l'intensità della radiazione e acquistò il nome comunemente noto di "radiometro" (può essere usato come fotometro se si fa incidere sulle palette soltanto luce visibile).

La sfida era quella di spiegare l'origine della forza osservata e di calcolarne l'intensità usando una teoria riconosciuta, ma questo si dimostrò essere una cosa difficile, come vedremo.

L'interesse per il radiometro negli anni dal '74 al '77 diede origine a centinaia di articoli in tutte le riviste scientifiche europee, dal momento che chiunque avesse abilità sperimentali poteva compiere le sue osservazioni, ripetere gli esperimenti noti con qualche variazione e fornire le proprie opinioni sulle spiegazioni controverse senza essere vincolato dalle teorie esistenti.

Fino al 1879, la rivista "Bleiblätter zu der Annalen der Physik und Chemie" ha avuto una sezione speciale intitolata "Radiometer" e, all'inizio di un articolo di rassegna del 1877 di Francesco Rossetti su "Il Nuovo Cimento", si legge: «Questo curioso strumento diede origine a vivaci discussioni e queste provocarono nuove indagini che contribuirono a rendere meno difficile la spiegazione, tuttora controversa, dei fenomeni ch'esso presenta. Da due mesi a questa parte non v'è seduta alla Accademia delle Scienze di Parigi in cui non si parli del Radiometro: così grande l'interesse destato da esso».

La pressione di radiazione

All'inizio vi furono pochi dubbi, o forse molte attese, sul fatto che le palette fossero mosse da un'azione diretta della radiazione, luce o calore. Questo generò lo scalpore che fece seguito alla presentazione degli esperimenti di Crookes. Da molto tempo si era pensato all'esistenza di una pressione meccanica della luce sulla superficie di un corpo e la si era ricercata.[3] Sarebbe stata una prova a favore della teoria corpuscolare della luce e molti scienziati cercarono di rivelare una qualche forza dirigendo intensi fasci di luce su corpi sospesi, senza ottenere alcun risultato definitivo. Nel 1792, Arthur Bennet affermò che i risultati negativi dei suoi esperimenti avrebbero dovuto favorire una teoria ondulatoria per la natura della luce (Bennet, 1792). In una teoria ondulatoria della luce è meno certo che una simile pressione sia possibile, almeno con onde trasversali (Puschl, 1852, 1855) e gli esperimenti condotti da Fresnel ed altri non portarono a risultati (Fresnel, 1825). Il problema fu sollevato ripetutamente anche dagli astronomi, in connessione con le ipotesi sulla formazione della coda delle comete (Faye, 1860). Infine James Clerk Maxwell, nella sua teoria elettromagnetica della luce, non solo ammise l'esistenza della pressione di radiazione, ma fornì anche un calcolo della sua intensità e una stima della pressione esercitata dalla luce solare sulla superficie terrestre. Egli scrisse che una radiazione concentrata «*falling on a thin metallic dish, suspended in a vacuum, might perhaps produce an observable mechanical effect*» (Maxwell, 1873)[4].

Note

[3] Vedi Schagrin, 1974 o Worrall, 1982.

[4] «incidente su un sottile disco metallico sospeso nel vuoto potrebbe forse produrre un effetto meccanico osservabile».

Il suo interessamento, fin dall'inizio, per l'esperimento di Crookes non deve sorprendere.[5] Egli era stato presente alla prima dimostrazione alla Royal Society e ne aveva scritto a William Thomson (Lord Kelvin). Quando gli fu chiesto di fornire una valutazione come *referee* sul primo lavoro di Crookes, egli si disse d'accordo sul fatto che la repulsione fosse dovuta alla radiazione, benché l'effetto sembrasse molto più grande di quello che c'era da aspettarsi in base alla sua teoria elettromagnetica. In effetti, la forza misurata da Crookes era 10^5 volte più grande di quella calcolata entro la teoria di Maxwell!

Per giunta, la forza avrebbe dovuto essere più intensa sulla superficie argentata riflettente, mentre invece era almeno cinque volte più grande su quella annerita e assorbente. Le palette del radiometro ruotavano proprio nel verso contrario, ma nessuno sembrava preoccuparsene!

La velocità uniforme di rotazione era anche un indizio della probabile presenza di gas residuo all'interno del bulbo, gas che avrebbe dovuto fornire la necessaria resistenza. Crookes, tuttavia, era molto riluttante ad ammettere che il bulbo non fosse sufficientemente svuotato e la resistenza poteva essere dovuta all'etere. L'assenza nel bulbo di correnti elettriche di scarica era per lui prova sufficiente dell'assenza di qualunque "corpuscular substance" all'interno[6]. L'apparizione della cometa Coggia nell'estate del 1874 riaprì la discussione sulla pressione della luce e il diffondersi di esperimenti sul radiometro. Tuttavia l'ipotesi che fosse la pressione diretta della luce a [spiegare] i movimenti del radiometro stava perdendo consenso e sembravano via via più importanti il ruolo del gas residuo e della differenza di temperatura tra le palette. La soluzione si rivelò essere un affare per esperti di teoria cinetica.

La teoria cinetica dei gas

Uno dei primi a proporre, nel 1875, una spiegazione in termini dei moti delle molecole del gas fu Osborne Reynolds, fisico di Manchester, e la sua teoria, benché rivelatasi fallace, stimolò successive discussioni sul ruolo delle interazioni gas-superficie (Reynolds, 1876). Lo stesso anno venne a Manchester un giovane fisico, Arthur Schuster; costui propose un "esperimento cruciale" che poi fu condotto assieme a Reynolds.

Egli sospese il contenitore del radiometro con un filo e osservò che quando le palette ruotavano da una parte il contenitore stesso ruotava in senso opposto. Ciò significa che non c'è alcun momento meccanico entrante, ma soltanto energia, e che la rotazione delle palette deve dipendere da qualche meccanismo interno (Schuster, 1876, 1877).[7]

La forza doveva essere esercitata dalle molecole che colpivano la faccia annerita e che, in qualche modo, esercitavano una pressione maggiore di quelle che colpivano la faccia argentata. La ragione di questa differenza non era chiara. Dapprima fu proposto un meccanismo basato sulle correnti convettive nel gas, dovute a differenze di temperatura (Neesen, 1875), ma questo si dimostrò inadeguato, almeno con quel grado di rarefazione (però sembrava una buona spiegazione per il movimento delle palette a pressioni interne più alte, dato che era nella direzione "giusta"). L'ordinaria teoria cinetica dei gas, basata sul libero cammino

---

5 Per il coinvolgimento di Maxwell nel problema del radiometro, si veda Brush & Everitt, 1969. Il presente articolo è basato principalmente su questo interessante lavoro. Anche le figure sono riprese da questa fonte.

6 "sostanza corpuscolare". Le ricerche di Crookes sulla scarica nei tubi a vuoto lo condussero più tardi alla scoperta dei raggi catodici e si dimostrarono essenziali per la fisica atomica.

7 Una variazione interessante dell'esperimento di Schuster, con il bulbo galleggiante sull'acqua, si trova in Righi, 1876.

medio di Clausius per il moto molecolare, non poteva spiegare le pressioni su di un corpo all'interno del gas. Se una regione del gas all'interno del radiometro, vicino alla faccia annerita, avesse avuto una temperatura più alta delle altre, allora la velocità delle molecole al suo interno sarebbe stata più alta, ma questo avrebbe determinato un aumento del volume di quella regione compensato da un aumento della densità della regione "più fredda" vicino alla faccia argentata: perciò non avrebbe dovuto esserci alcuna forza netta su una paletta immersa nel gas, [vi sarebbe stato] soltanto un aumento della pressione esercitata dal gas sulle pareti. Ma, come osservato da J. Stoney, questo non poteva essere vero per i gas rarefatti, nei quali il libero cammino medio delle molecole è più grande e l'equilibrio di temperatura dovuto agli urti intermolecolari, che solitamente ha luogo a breve distanza, poteva realizzarsi [soltanto] in uno spessore di gas più grande dello spazio tra le palette e le pareti. Perciò nel gas si doveva stabilire un gradiente di temperatura fra la regione prossima al lato annerito, caldo, e quella vicina al lato argentato, più freddo. In questo modo, le molecole che colpivano la faccia annerita potevano rimbalzare con velocità aumentata e questo, come risultato, avrebbe generato una pressione su quella faccia. I calcoli della forza, tuttavia, dipendevano da assunzioni arbitrarie e lo "strato di Stoney" non convinceva gente come Lord Kelvin, Reynolds e Maxwell, i quali si rendevano conto che il problema era più complesso e poteva diventare una seria sfida per la teoria cinetica dei gas dopo i successi dell'articolo di Maxwell del 1867 sulla viscosità, la conduzione del calore e la diffusione nei gas.

Tuttavia l'interesse per il radiometro decadde perché, dopo tutto, non sembrava che la pressione della luce vi fosse coinvolta.

Un fisico italiano, Adolfo Bartoli, in una memoria intitolata *Sopra i movimenti prodotti dalla luce e dal calore e sopra il radiometro di Crookes* (Bartoli, 1876), pur accettando che i movimenti delle palette del radiometro non fossero dovuti all'azione diretta della radiazione, avanzò alcune considerazioni fondate su un brillante "esperimento concettuale" e sulla seconda legge della termodinamica, suggerendo la possibilità di una pressione di radiazione. Questo lavoro, completamente ignorato per quasi vent'anni e ripubblicato nel 1884, stimolò il lavoro di Boltzmann e l'effettiva scoperta sperimentale della pressione della luce da parte di Lebedev (Carazza & Kragh, 1989). Incidentalmente, si può osservare che nel 1924, quando il radiometro era pressoché dimenticato, Albert Einstein, nel contesto della sua teoria della luce dedicò un articolo allo studio dei moti del radiometro (Einstein, 1924).

J. C. Maxwell e il radiometro

A James Clerk Maxwell, in quanto uno dei più eminenti esperti della teoria cinetica, veniva spesso richiesta un'opinione sul radiometro, ma egli non diede mai una risposta pubblica fino a che non ebbe considerato il problema accuratamente. Quando il fermento riguardante i radiometri stava scemando, Maxwell stava iniziando a lavorare seriamente sul problema. In quel periodo il Cavendish Laboratory acquistò alcuni radiometri e Arthur Schuster arrivò a Cambridge. La memoria di Maxwell *On stresses in rarefied gases arising from inequalities in temperature*[8] fu pubblicata nel 1879, poco prima della sua morte (Maxwell, 1879). Questo lavoro è dedicato al calcolo della forza che deriva da differenze di temperatura in un gas. Maxwell trovò che un gradiente costante di temperatura non avrebbe, da solo, prodotto una pressione, è un gradiente di temperatura variabile, dovuto a una sorgente di calore (le palette del radiometro) che può causare

Nota

[8] Sugli sforzi derivanti da differenze di temperatura nei gas rarefatti".

uno sforzo sui bordi delle palette. Il problema con la teoria cinetica classica sta nell'assunto che lo stato fisico del gas in prossimità della superficie fosse lo stesso di quello della superficie, mentre in un gas rarefatto questo non poteva esser vero. Le interazioni delle molecole con una superficie irregolare reale producono discontinuità nelle velocità delle molecole che rimbalzano e, di conseguenza, sia un moto delle molecole parallelo alla superficie (il fenomeno dello "*slipping*"[9] nei gas rarefatti, scoperto da Kundt e Warburg nel 1875), sia uno sforzo tangenziale sulla superficie. Nell'Appendice egli disse che uno dei *referee* lo aveva incoraggiato suggerendo varie ipotesi sull'interazione molecola-superficie; egli quindi propose una serie di equazioni che «*express both the fact that the gas may slide over the surface with finite velocity… and the fact the this velocity and the corresponding tangential stress are affected by inequalities of temperature at the surface of the solid, which give rise to a force tending to make the gas slide along the surface from colder to hotter places*»[10].

Maxwell non si attribuì il merito della scoperta di questo fenomeno e affermò che era stato indicato da Reynolds, che lo aveva chiamato "*thermal transpiration*"[11].

Egli disse «*it was not until I had read Professor Reynolds' paper that I began to reconsider the surface condition of gas, so that what I have done is simply to extend to the surface phenomena the method which I think most suitable for treating the interior of the gas. I think that this method is, in some respect, better than that adopted by Professor Reynolds, while I admit that his method is sufficient to establish the existence of the phenomena, though not to afford an estimate of their amount*»[12].

Questa è la base della spiegazione definitiva del radiometro e di molti altri fenomeni relativi ai gas rarefatti e alle interazioni gas-superficie. Da allora non è stato aggiunto molto e, nel 1971, in un Simposio sulla Dinamica dei Gas Rarefatti[13], fu osservato come fino ad allora la sola teoria disponibile fosse quella di Maxwell.

Potrebbe essere interessante notare che i risultati importanti della memoria di Maxwell ebbero origine dal suggerimento di un *referee* (sappiamo che si trattava di William Thomson e che Maxwell discusse molte parti con lui) e dalla conoscenza da parte di Maxwell di un lavoro di Reynolds non ancora pubblicato! Questa conoscenza derivava dal fatto che a Maxwell era stato chiesto, da parte della Royal Society, di fare da *referee* per l'articolo e le basi della sua stessa memoria sono tratteggiate nella sua relazione [Fig. 3], anche se «*this can be an* explanation satisfactory to the nonmathematical minds… though very far from being a *satisfactory introduction to a numerical calculation of the resulting force*».[14]

Note

9 scivolamento.

10 esprimevano sia il fatto che il gas potesse scorrere sulla superficie con velocità finita… sia il fatto che questa velocità e il corrispondente sforzo tangenziale erano influenzati dalle differenze di temperatura alla superficie del solido, il che dava luogo a una forza tendente a far scorrere il gas lungo la superficie dai punti più caldi ai punti più freddi.

11 traspirazione termica.

12 Non fu che dopo aver letto la memoria del Professor Reynolds che iniziai a riconsiderare le condizioni dei gas alla superficie, cosicché ciò che ho fatto è stato semplicemente estendere ai fenomeni superficiali il metodo che ritengo maggiormente adatto a trattare l'interno di un gas. Penso che questo metodo sia, per qualche verso, migliore di quello adottato dal Professor Reynolds, sebbene debba ammettere che il suo metodo è sufficiente per determinare l'esistenza dei fenomeni, anche se non per consentire una stima della loro entità.

13 D. Dini, C. Cercignani, S. Nocilla (curatori). *Rarefied Gas Dynamics: Proceedings of the Seventh International Symposium on Rarefied Gas Dynamics*, Editrice tecnico scientifica, Pisa 1971 [NdT]

14 Questa può essere una spiegazione soddisfacente per le menti non matematiche… benché molto lontana dall'essere un'introduzione soddisfacente per il calcolo numerico della forza risultante.

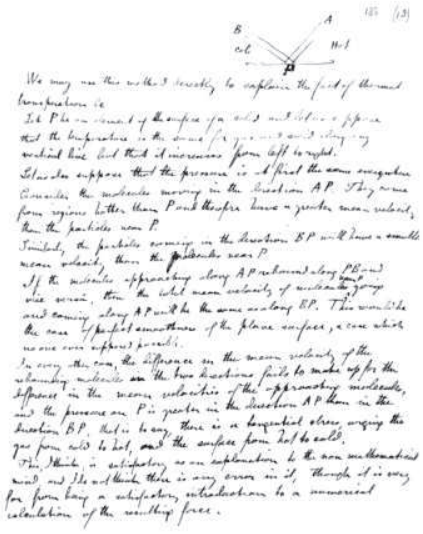

Fig. 3
Una pagina tratta dalla relazione di Maxwell relativa alla memoria di Reynolds del 1879.

La memoria di Reynolds *On certain dimensional properties of matter in the gaseous state*[15] (Reynolds, 1879) fu pubblicata diversi mesi più tardi e Reynolds fu molto seccato principalmente per l'uso da parte di Maxwell di alcuni risultati (sebbene con appropriato riconoscimento) nel lavoro dell'altro che fu pubblicato prima di quello di Reynolds. Era stata resa pubblica una critica al lavoro di Reynolds quando Reynolds si trovava in condizione di non poter rispondere. La morte di Maxwell, nel novembre del 1879, mise Reynolds in una condizione di maggior debolezza, perché le sue proteste non avevano più una controparte e anche perché i potenti amici di Maxwell sarebbero corsi in sua difesa se chiunque avesse osato criticarlo. Ma questo ha più a che fare con la "storia privata" delle relazioni tra scienziati.

In ogni modo, il radiometro, questo semplice strumento con una così difficile spiegazione teorica (come accade spesso), non fu più l'argomento della discussione, che si spostò sulle proprietà dei gas rarefatti e sulle interazioni gas-superficie, e così cadde praticamente nel dimenticatoio «*more because the majority of physicists felt that the matter had been placed beyond their grasp, rather than because some well understood explanation had been given which rendered further research superfluous*» (West, 1920)[16,17].

Bibliografia

[1] Bartoli, A., *Sopra i Movimenti prodotti dalla Luce e dal Calore e sopra il Radiometro di Crookes*, Le Monnier, Firenze 1876 (scansione completa in Google Books, all'URL: tinyurl.com/artBartoli).[18]

[2] Bennet, A., *Phil. Trans.*, **82**, (1792), 87.

[3] Brush, S. G.; Everitt, W. F., Maxwell, Osborne Reynolds and the Radiometer, *Historical Studies in the Physical Sciences*, **1**, (1969), 105-125 (articolo completo su Jstor all'URL: inyurl.com/Brush-Everitt).

[4] Carazza, B.; Kragh, H., Adolfo Bartoli and the Problem of Radiant Heat, *Annals of Science*, **46**, (1989), 183-194 (testo completo all'URL: tinyurl.com/Carazza-Kragh).

Note

15 Su alcune proprietà dimensionali della materia nello stato gassoso

16 Più perché la maggioranza dei fisici pensava che la questione era stata [ormai] collocata al di là della loro comprensione, che perché fosse stata data una qualche spiegazione ben comprensibile che rendeva superflue ulteriori ricerche.

17 In anni recenti si è risvegliata ancora qualche attenzione sul meccanismo del mulinello di Crookes, in vista di possibili applicazioni con micromacchine e per la propulsione e stabilizzazione rispetto ai venti d'alta quota di veicoli stratosferici. Un articolo di rassegna che tratta anche questi sviluppi è: A. Ketsdever, N. Gimelshein, S. Gimelshein, N. Selden. Radiometric phenomena: From the 19th to the 21st century, *Vacuum*, **86**, 1644-662, Elsevier 2012 (reperibile all'URL: tinyurl.com/Ketsdever) [NdT]

18 Alla bibliografia originale sono stati aggiunti alcuni riferimenti sitografici, per gli articoli reperibili gratuitamente [NdT]

[5] Crookes, W., On Attraction and Repulsion resulting from Radiation, *Phil. Trans.*, **164**, (1874), 501 (articolo completo sul sito della Royal Society, all'URL: tinyurl.com/artCrookes).

[6] Einstein, A., Zur Theorie der Radiometerkräfte, *Zeitschrift für Physik*, **27**, (1924), 1-6.

[7] Faye, A. H., Sur l'hypothèse de la force répulsive dans ses rapport avec la théorie des satellites, *Comptes Rendus*, **50**,(1860), 705, 894-899, 956-964.

[8] Fresnel, A., Note sur la Répulsion que les Corps échauffés exercent les Uns sur les Autres à des Distances sensibles, *Ann. de Ch. et de Phys.*, **29**, (1825), 57 et 107 (articolo completo su Google Books, all'URL: tinyurl.com/artFresnel).

[9] Maxwell, J. C., *Treatise on Electricity and Magnetism*, vol. Il, Oxford, 1873, §792 et §793.

[10] Maxwell, J. C., On Stresses in Rarefied Gases arising from Inequalities of Temperature, *Phil. Trans.*, **170**, (1879), 231-256; ristampato in Maxwell, J. C. *Scientific Papers 2*, Cambridge, 1890, 681-712 (scansione completa sul sito della Royal Society, all'URL: tinyurl.com/artMaxwell).

[11] Neesen, F., Über Anziehung und Abstoßung durch Licht und Wärmestrahlen, *Pogg. Ann.*, **156**, (1875), 144.

[12] Puschl, K.,Über die Einwirkung der Licht und Wärmewellen auf Bewegliche Massenteichen, *Wien. Ber.*, **9**, (1852), 173-185 & (1855). *Wien. Ber.*, **15**, 279-303 (quest'ultimo reperibile all'URL: tinyurl.com/artPuschl).

[13] Reynolds, O., On the Force caused by the Communication of Heat between a Surface and a Gas, *Nature*, April 13 (1876), (scansione completa sul sito della Royal Society, all'URL: tinyurl.com/artReynolds1); vedere anche: On the force caused by evaporation and condensation at a surface, *Proc. Royal Soc.*, **406,** (1874); anche in: Reynolds, O. (1900-1903). *Papers on Mechanical and Physical subjects*, Cambridge, I, 8 (scansione completa su Google Books, all'URL: tinyurl.com/artReynolds2).

[14] Reynolds, O., On certain Dimensional Properties of Matter in the Gaseous State, *Phil. Trans.*, **170**, (1879), 727-845 (scansione completa sul sito della Royal Society, all'URL: tinyurl.com/artReynolds3).

[15] Righi, A., Esperienze col Radiometro di Crookes, *Il Nuovo Cimento*, **16**, (1876), 228-233 (articolo completo all'URL: tinyurl.com/artRighi).

[16] Rossetti, F., Il Radiometro di Crookes, *Il Nuovo Cimento*, **16**, (1876), 157-184; 206-217 & (1877). Ulteriori Esperienze fatte col Radiometro di Crookes, *Il Nuovo Cimento*, **3S.1**, 5-10.

[17] Schagrin, M. L., Early Observations and Calculations on Light Pressure, *Am. J. Phys.*, **42**, (1974), 927.

[18] Schuster, A., On the nature of the force producing the motion of a body exposed to rays of heat and light, *Proc. Royal Soc.*, **24**, (1876), 391-392 & *Phil. Trans.*, **166**, (1877), 715-724 (scansione completa sul sito della Royal Society, all'URL: tinyurl.com/artSchuster).

[19] Stoney, G. J., On Crookes's Radiometer, *Phil. Mag. I*, (1876)177-182; 505-513.

[20] West, G. D., *Proc. of the Physical Society of London*, **32**, (1920), 222.

[21] Woodruff, A. E., William Crookes and the Radiometer, *Isis*, **58**, (1966), 188-198 (articolo completo su Jstor, all'URL: tinyurl.com/artWoodruff).

Errata corrige

Nel numero precedente sono stati segnalati alcuni refusi che desideriamo segnalare e correggere.
Per prima cosa l'anno indicato della rivista che corrisponde al volume nei riferimenti bibliografici è LII e non X come riportato sulla copertina.
Il nome di uno degli autori dell'articolo a pag. 75 è Massimo Salvi. Più avanti, nello stesso articolo a pag. 81, nella quinta riga la frase corretta è "Dall'osservazione diretta non sono rilevabili differenze;".
Ringraziamo l'autore per le segnalazioni e ci scusiamo per i refusi.