

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

BOHR





©

ISBN
979-12-218-1484-2

PRIMA EDIZIONE
ROMA 18 SETTEMBRE 2024

Alla mia famiglia

INDICE

11	<i>Prefazione</i>
13	CAPITOLO I La creazione di un mito
23	CAPITOLO II Formazione, viaggio a Cambridge e Manchester
35	CAPITOLO III L'atomo di idrogeno
67	CAPITOLO IV Oltre l'atomo di Bohr e Sommerfeld. La nuova meccanica quantistica e la sua interpretazione
85	CAPITOLO V Il principio di complementarità
103	CAPITOLO VI L'ipotesi della non conservazione dell'energia in processi elementari

10 *Indice*

125 CAPITOLO VII
I lavori di fisica nucleare

189 CAPITOLO VIII
La seconda guerra mondiale – l’invasione della Danimarca

209 CAPITOLO IX
Gli ultimi anni: 1945-1962

PREFAZIONE

Bohr e Einstein nella letteratura scientifica sono spesso indicati come i due più importanti e rappresentativi scienziati del millenovecento. Il primo nell'ambito della Meccanica Quantistica, il secondo per la Meccanica Quantistica e la Relatività Speciale e Generale. Uno dei più qualificati sostenitori di questa scelta è indubbiamente Abraham Pais un importante fisico teorico che ha dedicato i suoi ultimi anni alla stesura di testi di storia della fisica di alta qualità, in particolare *Inward Bounds, Of Matter and Forces in the Physical World* e le due monumentali biografie di Einstein e Bohr: *Subtle is the Lord* e *Niels Bohr Times*. Nella biografia di Bohr si spinge persino a un paragone tête-à-tête della loro vita, carattere, gusti.

Quando si leggono i due libri a loro dedicati si rimane interdetti. Entrambi estremamente accurati, esaustivi, ma completamente diversi come impegno richiesto al lettore. Premesso che una divulgazione scientifica di alta qualità come quella di Pais richiede una presentazione che non si limita a banali semplificazioni, ma cerca di entrare nel cuore dei problemi, il testo dedicato a Einstein è estremamente impegnativo e di difficile lettura per un fisico. Il testo dedicato a Bohr è estremamente scorrevole e penso sia comprensibile per chi abbia anche soltanto una semplice conoscenza scientifica di base.

In effetti anche se non si può negare che il lavoro di Bohr abbia avuto un grande impatto nel mondo scientifico, il suo più importante

risultato, la teoria dell'atomo di idrogeno, è una semplice applicazione delle leggi di Planck della quantizzazione dell'energia e dell'azione a un modello ipersemplicificato dell'atomo di idrogeno che non richiede alcuna conoscenza matematica sofisticata e può essere facilmente compreso da uno studente liceale. Che questo basti pur considerando i contributi di Bohr in fisica nucleare, secondo me di maggior sostanza, per ritenerlo insieme ad Einstein il più importante fisico del secolo scorso mi sembra discutibile.

Molti tuttavia pensano che il maggior merito di Bohr sia stato quello di aver creato il *Kopenhagener Geist* uno stile molto particolare di fare ricerca: agire, parlare, vivere in gruppi di studiosi, intenti a affrontare gli enigmi più profondi della fisica con uno spirito competitivo, libero da limiti convenzionali e di essere stato così l'ispiratore di tutte le ricerche che hanno portato allo sviluppo della Meccanica Quantistica che con la teoria della Relatività costituisce la base della Fisica Moderna.

È così? Questa domanda mi ha indotto a cercare di approfondire l'opera di Bohr e il ruolo che ha avuto nello sviluppo della fisica moderna. Ne è uscito questo testo che ne dà una immagine in chiaro-oscuro. Senz'altro contributi significativi, ma anche aspetti controversi che possono far pensare che in alcuni casi la sua opera sia stata più di freno che di motore nello sviluppo di questa disciplina.

È chiaramente una conclusione contro-corrente che probabilmente non sarà condivisa da tutti, spero tuttavia che questo mio saggio sia comunque una lettura stimolante anche per chi lo criticherà.

Ringrazio mia moglie Enrica e i miei colleghi e amici Sigfrido Boffi, Mauro Giannini, Ludovico Lanz, Ignazio Licata per molti utili commenti e la correzione di varie inesattezze e errori che hanno significativamente migliorato il mio lavoro.

CAPITOLO I

LA CREAZIONE DI UN MITO

Niels Hendrick David Bohr è stato un importante scienziato che ha contribuito, nell'ambito della Meccanica Quantistica, alla comprensione della struttura dell'atomo e del suo nucleo. Ha speculato sulle profonde connessioni tra l'interpretazione fisica del mondo e le sue implicazioni filosofiche.

Alla sua morte nel 1962 Victor Weisskopf, un importante fisico teorico allora Direttore del CERN, lo commemorò con queste parole:

Siamo qui riuniti per rendere omaggio a Niels Bohr. Niels Bohr è il simbolo, l'origine e il principale architetto del nostro lavoro. È stato tramite lui, per mezzo di lui e con lui che tutto ciò su cui il nostro lavoro e la nostra esistenza si basa è stato creato. Era un grande uomo. Ma che cosa è la grandezza? Un grande uomo è uno che crea una nuova epoca, un nuovo modo di pensare, ed è certo che Bohr e la sua vita corrispondono a questa definizione. L'influenza di ciò che egli ha iniziato è visibile in ogni aspetto della nostra vita. La scienza moderna ha dato nuova forma al nostro mondo. Essa è diventata il fattore determinante del nostro pensiero, della nostra cultura, perfino della politica, e determina la direzione nella quale il genere umano si muoverà nei prossimi decenni...⁽¹⁾.

(1) CERN Courier, dicembre 1962.

Questa breve citazione e un successivo contributo pubblicato da Weisskopf nel Volume edito nel 1985 in occasione del centenario della nascita di Bohr⁽²⁾, sono uno dei non pochi tentativi di mitizzare la figura di Bohr attribuendogli spesso meriti ascrivibili ad altri scienziati la cui opera non viene neppure menzionata. Le due grandi scoperte scientifiche che stanno alla base della Fisica Moderna non sono dovute a Bohr, ma a Planck e Einstein. Il primo ha scoperto la natura discreta, o in linguaggio tecnico quantizzata, dell'energia e su base più fondamentale dell'azione, che governa l'evoluzione dinamica di un sistema, introducendo il quanto di azione h e originando la Meccanica Quantistica. Il secondo ha compreso come le leggi classiche siano inadeguate per lo studio dei fenomeni in condizioni estreme, a velocità vicine a quella della luce, e ha capito la connessione tra massa ed energia nell'ambito della Relatività Speciale e la struttura dell'universo nell'ambito della Relatività Generale. Parallelamente a questi studi ha dato fondamentali contributi anche alla Meccanica Quantistica introducendo il concetto di fotone a cui Bohr si oppose per molti anni e dimostrando che nell'interazione con le molecole di un gas una radiazione di comporta come se fosse costituita da fotoni di momento $h\nu/c$ scoprendo il fenomeno di emissione stimolata della radiazione che decenni dopo ha dato origine al maser e al laser.

La Meccanica Quantistica ha non solo permesso di capire le leggi che governano il mondo microscopico, ma con le sue ricadute tecnologiche ha cambiato in modo irreversibile il nostro modo di vivere e per certi aspetti è stata più "rivoluzionaria" della Teoria della Relatività. Bohr vi contribuì tra il 1912 e il 1913 con un modello dell'atomo di idrogeno molto semplice, descrivendolo come un elettrone un protone che interagiscono tramite la forza di Coulomb. In base alla Fisica Classica questo modello non è stabile, ma Bohr seguendo la legge di quantizzazione di Planck assume che l'elettrone possa ruotare attorno al protone solo su orbite particolari tra cui può transire emettendo o assorbendo energia elettromagnetica con frequenza $\nu = \Delta E/h$, dove ΔE è la differenza di energia tra gli orbitali tra cui transisce. Il modello

(2) V.F. WEISSKOPF, *Niels Bohr, the Quantum and the World*, in Niels Bohr, A Centenary Volume, Edited by A.P. French and P.J. Kennedy, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England, 1985.

proprio per la sua semplicità e perché era in grado di prevedere l'ordine di grandezza delle dimensioni atomiche e spiegare la legge di Balmer che riproduce con grandissima precisione la frequenza delle righe spettrali dell'idrogeno che cadono nel visibile ebbe un enorme successo e diede fama imperitura a Bohr, benché venisse abbandonato dopo poco più di 10 anni. Fu il suo maggior successo scientifico.

La Danimarca che pure aveva avuto grandi astronomi e fisici come Brahe, Rømer e Ørsted, tributò onori straordinari a Bohr, che visse per gran parte della sua vita in una villa principesca sovvenzionata dalla maggior produttrice di birra della Danimarca, la Carlsberg, e poté creare a Copenhagen l'Istituto di Fisica Teorica in cui oltre allo staff permanente lavorarono per brevi periodi scienziati provenienti da numerosi paesi.

Il periodo compreso tra l'inizio del 1920 e gli anni che precedettero la seconda guerra mondiale fu straordinario. Quasi ogni anno furono fatte scoperte che hanno cambiato in modo irreversibile la nostra visione della natura e la nostra vita. Di quanto avvenne nell'Istituto di Bohr parla Weisskopf nel lavoro che ho già citato:

...Non vi fu un singolo lavoro dello stesso Bohr del livello del suo lavoro del 1913. Bohr trovò un nuovo modo di lavorare. Non lavorò più da solo, ma in collaborazione con altri. Fu capace di radunare attorno a se i più attivi, i più dotati i più preveggenti fisici del mondo... fu in quel periodo e con quegli scienziati che vennero formulati i concetti che sono alla base della Meccanica Quantistica, che il Principio di Indeterminazione venne concepito e discusso, che il dualismo onda-corpuscolo venne capito per la prima volta. In vivaci discussioni in gruppi di due o tre o più vennero esplorati i più profondi problemi riguardanti la struttura della materia. [Difficilmente] si può immaginare quale atmosfera ci fosse, che vita, che attività intellettuale regnasse in quel periodo a Copenhagen. Lì si poteva apprezzare al suo meglio l'influenza di Bohr. Lì creò il suo stile il *Kopenhagener Geist* uno stile molto particolare che egli impose alla fisica. Lo si poteva vedere, il più grande tra i suoi colleghi, agire, parlare, vivere, come uguale in un gruppo di giovani, ottimisti, scherzosi, entusiasti studiosi, intenti a affrontare gli enigmi più profondi con uno spirito competitivo, libero da limiti convenzionali, uno spirito di gioia che può difficilmente essere descritto...

Che l'atmosfera di Copenhagen fosse straordinaria, che molti che frequentarono in quel tempo l'Istituto di Bohr ne abbiano avuto un meraviglioso ricordo non si può negare. È su questo che poggia il mito di Bohr. Tuttavia un semplice e obbiettivo studio dei progressi che si fecero in quel periodo mostra che quasi nessun fondamentale contributo venne da lì. L'unica eccezione venne forse dai lavori di Heisenberg, che ebbe sempre una particolare, non ricambiata, devozione per Bohr. Tuttavia uno dei suoi maggiori contributi, la formulazione dei principi della Meccanica delle Matrici con la non commutabilità della posizione e del momento di una particella apparve quando era assistente di Born a Gottinga e formalizzato in modo rigoroso con l'aiuto di Born e Jordan. La formulazione alternativa, la Teoria delle Trasformazioni, venne sviluppata da Dirac, uno scienziato che non fu mai pronò a discussioni collettive anche se frequentò per un certo tempo Copenhagen⁽³⁾. Il lavoro di Heisenberg sul Principio di Indeterminazione venne scritto e pubblicato contro il volere di Bohr che ne volle dare una formulazione diversa e, per certi aspetti, discutibile. Come mostrerò nel Capitolo dedicato al Principio di Complementarità (che Bohr ritenne sempre essere uno dei suoi maggiori contributi scientifici), il dualismo tra gli aspetti corpuscolari e ondulatori della materia venne risolto da Louis De Broglie a Parigi quando scoprì la relazione tra momento e lunghezza d'onda di ogni entità fisica e portò Schrödinger che lavorava a Zurigo, a formulare la Meccanica Ondulatoria con la sua famosa equazione⁽⁴⁾. L'interpretazione probabilistica della funzione d'onda nell'equazione di Schrödinger, di cui si impadronì Bohr, fu dovuta a Born che lavorava a Gottinga. La teoria con cui Dirac propose l'unificazione tra la Meccanica Quantistica e Relatività Speciale (con la spiegazione dello spin e la scoperta dell'antimateria) furono sviluppate a Cambridge e fu inizialmente osteggiata da Bohr. Il Principio di Esclusione fu formulato da Pauli quando lavorava ad Amburgo. La statistica cui obbediscono i fermioni e l'Interazione Debole furono opera di Fermi a Roma.

(3) Dirac andò a Copenhagen verso la metà del 1920 su suggerimento di Rutherford, grande estimatore di Bohr. Discusse molte volte con Bohr, ma, come lui stesso disse, erano discussioni in cui parlava solo Bohr che si lagnò con Rutherford della scarsa ricettività di Dirac. Celebre la risposta di Rutherford: "Dirac parla poco, ma pensa molto".

(4) E GADIOLI, *Come è cambiata la nostra visione del mondo. I contributi di Planck, De Broglie e Eddington*, Aracne, 2023.

Contemporaneamente alla formulazione di queste teorie, nello stesso periodo, per limitarci alla sola Europa si fecero fondamentali scoperte in ambito sperimentale quali la scoperta dello spin dell'elettrone da parte di Stern e Gerlach a Francoforte, del neutrone da Chadwick e degli sciami di raggi cosmici da Blackett e Occhialini a Cambridge, della radioattività artificiale da F. Joliot e Irene Curie a Parigi, dell'interazione dei neutroni lenti con la materia da Fermi a Roma, della fissione nucleare da Hahn e Strassman a Berlino.

Considerato tutto questo come non si possono considerare un'enfasi non accettabile le parole di Weisskopf?

A Copenaghen non furono solo gli "ospiti" a "imparare" da Bohr. Bohr stesso apprese molto da loro e in alcuni casi non esitò a fare sue queste scoperte attribuendosene il merito (la teoria atomica di Slater, il modello a goccia di Gamow, l'interpretazione probabilistica della funzione d'onda di Born). Inoltre Bohr si oppose fermamente ad alcune teorie di fondamentale importanza che a Copenaghen erano, per così dire bandite. Tra queste la natura corpuscolare della radiazione e il modello a particelle indipendenti (shell model) del nucleo.

Con l'avvento del nazismo in Germania nel 1933 un numero via via crescente di scienziati ebrei dovette lasciare la Germania. In questa fase della sua vita Bohr mostrò al meglio le sue qualità umane. Ne ospitò alcuni a Copenaghen; aiutò molti altri a emigrare all'estero, soprattutto in Inghilterra e negli Stati Uniti.

Il 9 aprile 1940, otto mesi dopo lo scoppio della seconda guerra mondiale, la Germania invadeva la Danimarca e la Norvegia, ritenute nazioni strategiche per la guerra e l'approvvigionamento di materiali ferrosi. La madre di Bohr era di origine ebraica e questo metteva Bohr e la sua famiglia in grave pericolo per le leggi antiebraiche già in vigore in Germania. Bohr era, per formazione e per gli onori che gli erano stati concessi dalla sua nazione⁽⁵⁾, imbevuto della cultura e delle tradizioni danesi (per fare un esempio, tutti gli scienziati che frequentavano l'Istituto per la Fisica Teorica dell'Università di Copenaghen erano cordialmente, ma con fermezza, invitati a imparare il danese, anche se non era

(5) Vedi, ad esempio A. PAIS, *Niels Bohr Times*, Clarendon Press, Oxford 1991, traduzione italiana, *Il Danese Tranquillo*, Bollati Boringhieri, 1993. Nel seguito questo testo verrà citato come (PAIS).

strettamente necessario per lo svolgimento della loro attività scientifica) e non avrebbe mai potuto perdonare alla Germania la proditoria invasione della sua patria. Decise quindi di praticare una politica di resistenza passiva, alla Gandhi; in particolare di non avere alcun contatto con le autorità Tedesche e in particolare con l'Istituto Scientifico Tedesco di Copenhagen che era stato inaugurato dopo l'occupazione tedesca.

Il 29 settembre del 1943 dovette lasciare la Danimarca e scappare in Svezia in modo avventuroso per evitare un imminente arresto e un probabile internamento in un campo di prigionia. Di lì si trasferì prima in Inghilterra, poi negli Stati Uniti dove collaborò con gli scienziati del Progetto Manhattan alla costruzione della bomba atomica.

Già dalla metà degli anni trenta l'intesse di Bohr si era volto alla Fisica Nucleare a cui diede tre importanti contributi. Il primo riguarda la formazione del cosiddetto *nucleo composto* in una interazione nucleare⁽⁶⁾ di cui parleremo più avanti che, pur essendo essenzialmente qualitativo, è tutt'ora un componente essenziale della teoria delle reazioni nucleari e ha originato un numero straordinario di ricerche. Il secondo, scritto quando era già negli Stati Uniti ebbe un'influenza decisiva nelle ricerche riguardanti la produzione di energia nucleare sia in ordigni bellici che in reattori per la produzione controllata di energia. Sugeriva che solo il ^{235}U , l'isotopo raro della miscela isotopica naturale dell'uranio a cui contribuisce per lo 0,72%, fissionasse nell'interazione con neutroni lenti con energia dell'ordine dell'elettronvolt⁽⁷⁾⁽⁸⁾ e fosse quindi il costituente essenziale di un ordigno bellico. Questa ipotesi fu confermata solo due anni più tardi da O. Nier. Il terzo fu la formulazione sul finire del 1939, in collaborazione con J.A. Wheeler⁽⁹⁾, di una teoria quantitativa del processo di fissione.

Dopo la guerra, tornato in Danimarca, dedicò i suoi ultimi anni a proporre senza molto successo una politica internazionale definita da Pais ⁵ *Glasnost* in cui sosteneva che solo la massima trasparenza e

(6) N. BOHR, Nature 137, 344, 1936.

(7) N. BOHR, Phys. Rev., 55, 418, 1939.

(8) Un elettronvolt, eV, è l'energia che acquista una particella con la carica dell'elettrone quando è accelerata da una differenza di potenziale di 1 Volt ed è pari a $1,602176565 \cdot 10^{-19}$ J. In seguito incontreremo sottomultipli e multipli dell'eV: $1\text{meV} = 10^{-3}\text{eV}$, $1\text{keV} = 10^3\text{eV}$, $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$, $1\text{GeV} = 10^9\text{eV}$.

(9) N. BOHR e J.A. WHEELER, Phys. Rev., 56, 426, 1939; *ibidem* 1056, 1939.

condivisione di quanto si sapeva sull'energia atomica e il loro utilizzo potesse eliminare la pericolosa competizione tra le nazioni per dotarsi di ordigni bellici. Questa si sarebbe potuta realizzare in parte creando Centri di Ricerca in cui queste problematiche e le più importanti scoperte scientifiche potessero essere discusse e realizzate. Contribuì quindi alla creazione del CERN, attualmente il più importante Centro di Ricerca nell'ambito della fisica delle particelle, ma il suo contributo non fu il solo, né il più importante. Creò poi il NORDITA, l'Istituto Nordico per la fisica teorica.

Pur non accettando le parole di Weisskopf e di molti altri scienziati, non si può negare che Bohr sia diventata un'icona della fisica della prima metà del novecento e sia da molti considerato con Einstein lo scienziato più importante della fisica moderna. In gran parte questo fu dovuto al suo lavoro sull'atomo di idrogeno, un contributo che per quanto sia oggi considerato completamente superato a differenza di quello di molti degli scienziati che ho citato, contribuì a sistematizzare un'enorme mole di dati spettroscopici che si erano accumulati, ma soprattutto alla sua opera "ecumenica" svolta a Copenhagen dove lui, il maestro che trattava a tu per tu il Re di Danimarca e viveva in un castello, faceva sentire importanti i giovani studiosi con cui parlava. Contribuirono anche i cosiddetti "festival di Bohr" in occasione delle frequenti visite di Bohr nelle più importanti Università e Centri di Ricerca.

Ciò però sorprende perché Bohr ebbe sempre problemi di comunicazione. Le sue Conferenze non erano né da un punto di vista acustico, né per il loro contenuto facilmente comprensibili. Interessante è quanto scrive Cockcroft nel suo necrologio di Bohr⁽¹⁰⁾. Nel 1930 Rutherford aveva proposto Bohr come conferenziere alle Scott Lectures dell'Università di Cambridge, ma era preoccupato perché aveva saputo che Bohr pensava che in ambito microscopico l'energia non fosse conservata in singole interazioni, ma lo fosse solo "statisticamente" e aveva chiesto a Cockcroft di seguire con attenzione le sue tre conferenze. Scrive Cockcroft:

La prima difficoltà che incontrai fu di capire correttamente molto di quello che Bohr disse e per riuscirci era importante sedere il più

(10) J.D. COCKCROFT, *Niels Henrik David Bohr*, Biographical Memoirs, Royal Society, <https://royalsocietypublishing.org>.

possibile vicino alla lavagna. La seconda e più importante capire il significato delle sue parole, in questo ero aiutato dal gran numero di disegni di elettroni che erano diffratti da fenditure e di orologi che misuravano il tempo di uscita di fotoni da una fenditura...

von Weiszächer conferma quanto scrisse Cockcroft:

Quando Bohr parlava, dimenticava le regole dell'acustica, della grammatica e della logica. Piano, balbettando, ripetendosi diceva quello che già tutti sapevano e quando diceva la cosa veramente importante teneva ancora la mano davanti alla bocca⁽¹¹⁾.

Malgrado i suoi sforzi prodigiosi i suoi articoli e saggi frutto di innumerevoli riscritture sono di difficile lettura e pieni di ripetizioni. Scrive von Weiszächer:

...Lo stile di scrittura di Bohr ha un'accuratezza senza paragoni per un fisico. In lunghe, intrecciate frasi Bohr cerca di affrontare direttamente ogni problema concreto e al tempo stesso di assicurare la relazione e l'equilibrio con il tutto. Ogni singola parola è scelta con accuratezza dopo una lunga riflessione e molti cambiamenti. Ma proprio per questo Bohr finiva con il pretendere troppo dai suoi lettore; risultava incomprensibile...

Aveva, tuttavia, una fortissima personalità, il suo modo di parlare era diretto e sincero e impressionava studenti colleghi e le personalità a cui si rivolgeva. Come ricordava Rosenfeld: a Copenhagen venivano per incontrare lo scienziato, ma trovavano l'uomo nel vero senso del termine⁽¹²⁾. Questo coincide con il giudizio sull'opera di Bohr che espresse nel 1964 il grande scienziato inglese G.P. Thomson in una Conferenza commemorativa in occasione della sua morte.

L'influenza di Bohr in ambito scientifico è solo in parte espressa nei lavori che ha pubblicato, per quanto importanti siano stati. Ha guidato la scienza in occasione del cambiamento più radicale che ha subito dal

(11) C.F. VON WEISZÄCHER, *I grandi della fisica, da Platone a Heisenberg*, Donzelli Editore, 2002.

(12) W.H. CROPPER, *Great Physicists*, Oxford University Press, 2001.

tempo di Galileo e Newton, con la grandezza del suo intelletto e della sua saggezza. A parte l'ammirazione per i suoi risultati, gli scienziati di tutte le nazioni hanno provato per lui un affetto che forse non è mai stato uguagliato. *Per questo è stato giudicato più che per quanto ha fatto*⁽¹³⁾.

(13) G.P. THOMSON, *Niels Bohr Memorial Lecture*, 1964 (Epitaffio riportato all'inizio della Ref. 2).