

FISICA/ MENTE

LA FISICA **NELL' OTTOCENTO**

PARTE III: I CONTRIBUTI ALLA TERMODINAMICA ED ALTRI LAVORI DI HELMHOLTZ

Roberto Renzetti

BIOGRAFIA ED OPERA DI HERMANN VON HELMHOLTZ

Il fisico del quale tratterò in questo capitolo è uno dei personaggi della scuola dei fisiologisti tedeschi che ha dato contributi importantissimi allo sviluppo della fisica. Gli studi dei fisiologisti, come Mayer ma anche Du Bois Reymond, partono da problematiche di carattere medico e fisiologico per approdare a questioni di carattere molto più generale come la ricerca di un qualche motivo che spieghi i meccanismi della macchina uomo. Se Mayer aveva ancora un retroterra mistico e spiritualista condito da una sorta di meccanicismo, con gli altri si tenta il superamento di ogni spiegazione metafisica per riportare tutto

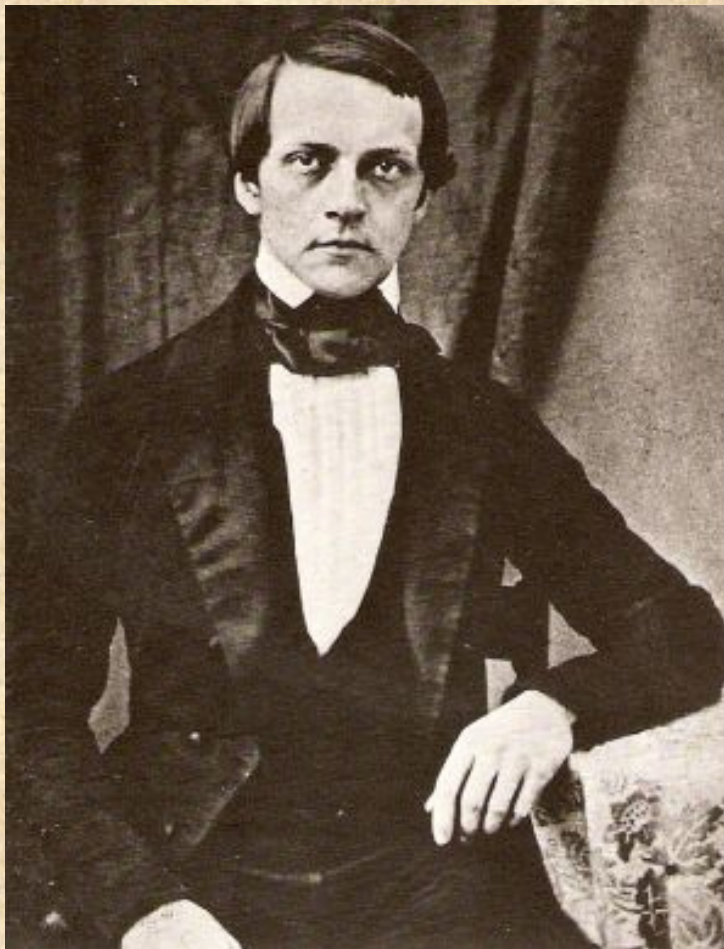
alla fisica, alla meccanica e soprattutto a quei capitoli della scienza che si andavano aprendo come l'elettricità. Si aprì una polemica di vasta portata contro la filosofia, la visione romantica e schellinghiana, lo stesso Goethe che con la sua teoria dei colori era maldestramente intervenuto su Newton. Si iniziò efficacemente a ridiscutere se la meccanica dovesse essere il fondamento della fisica o se non si dovesse più pensare a qualche discendenza nobile per affermare una priorità di qualche branca nuova, come l'elettricità appunto o la termodinamica. Il dibattito ne aprì un altro molto vasto in ambito epistemologico fino ad arrivare a Mach ed Ostwald ma anche allo stesso Einstein. Lascio queste considerazioni come *titoli* per tematiche da sviluppare ma non in questa sede.

Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, maggiore di quattro fratelli, nacque a Potsdam (Brandeburgo, Germania) nel 1821. Suo padre, Ferdinand, combattente contro Napoleone nell'esercito prussiano ed amico del filosofo Immanuel Hermann Fichte, era un professore di filologia e filosofia presso il ginnasio della città. Le condizioni della famiglia non erano floride e Hermann, come egli stesso raccontò, in un suo [profilo biografico](#) che lesse in occasione del settantesimo compleanno, per i primi sette anni della sua vita fu un bambino fragile che passava gran parte del tempo a letto infermo. Più avanti, a scuola, aveva difficoltà a memorizzare e a ritenere nozioni anche semplici, ad esempio i verbi irregolari nelle lingue. Si ingegnò con mezzi mnemotecnici che lo aiutarono e, tra tali mezzi, quello per lui più efficace era la conoscenza delle leggi dei fenomeni. Lo aveva cominciato a capire dai suoi giochi di costruzioni, dalla sua capacità di vedere i rapporti tra gli oggetti, la geometria nello spazio. Lo studio della geometria e delle scienze che affrontò a scuola, con i loro metodi rigorosi, gli fece svanire le difficoltà che aveva avuto in precedenza. La geometria era per Hermann una costruzione quasi perfetta alla quale mancava una cosa fondamentale: si occupava solo di forme astratte mentre egli era interessato alla realtà nella sua completezza. Fu così che indirizzò i suoi interessi principalmente alla fisica con la quale si poteva dominare la natura mediante l'uso del pensiero, grazie alla potenza logica della legge che descrive una classe di fenomeni ed alla scoperta del legame causale dei fenomeni. Ma il suo corso di studi era determinato dalle condizioni economiche. Terminati i primi studi presso il ginnasio di Potsdam, nel 1838, grazie al passato militare del padre poté iscriversi con una borsa di studio all'Istituto Reale medico chirurgico Friedrich-Wilhelm-Institut dove ci si impegnava, dopo la laurea, a prestare servizio per un determinato numero di anni nell'esercito prussiano. Raccontava Helmholtz di avere qui subito l'importante influenza del fisiologo Johannes Müller (1801 - 1858),

maestro anche di Du Bois Reymond (1818 - 1896), il quale aveva intrapreso una ferma battaglia culturale per far uscire il problema della natura della *vita* dalle interpretazioni metafisiche a studi scientifici. A tale proposito, sosteneva Müller, niente può rimpiazzare la conoscenza dei fatti. Fu così che Hermann dedicò le sue prime emozioni a tentare di capire l'essenza misteriosa della *forza vitale*. In quell'epoca la gran parte dei fisiologisti seguiva le teorie del chimico fisico tedesco George Ernst Stahl (1660 - 1734) secondo le quali la forza vitale (o anima) è costituita dalle forze chimiche e fisiche, che agiscono in lui, degli organi e della materia costituente il corpo vivente. E nel medesimo corpo risiede una forza vitale in grado di tenere unite tali forze (vita) o disunirle provocando la degenerazione del corpo (morte). Vi era qualcosa che non tornava a Helmholtz di tale teoria. La forza vitale non smetteva mai di agire come se operasse in un *moto perpetuo* e tale moto era quindi un'ammissione implicita di quella forza vitale di cui occorre sbarazzarsi. E poiché in passato si era molto occupato della questione del moto perpetuo, su questo punto egli focalizzò la sua attenzione. Il giovane laureando in medicina, per mantenersi faceva il bibliotecario dell'Istituto e lì lesse tutto ciò che trovò (Daniel Bernoulli, D'Alembert, Laplace, Biot, Poisson, Jacobi ma anche Kant ...), inoltre, nel tempo libero che gli venne concesso dopo la laurea, seguì all'Università dei Berlino delle lezioni di chimica, fisica e meccanica razionale. Non seguì comunque lezioni di fisica matematica e di matematica; in queste discipline era un autodidatta. Da questi studi i suoi problemi si chiarirono in due domande: data l'impossibilità del moto perpetuo, che relazioni vi sono tra le varie forze della natura? E tutte le relazioni che ci appaiono, esistono davvero?

Nel 1843 si laureò con una tesi di fisiologia in cui portò elementi a sostegno dell'origine cellulare delle fibre nervose. Fu assegnato al reggimento di stanza a Potsdam ma in realtà poté dedicare tutto il tempo alla ricerca. Con pochi mezzi indagò nel laboratorio di Müller i processi di putrefazione, fermentazione, metabolismo nell'attività muscolare, calore del corpo umano e si convinse del legame esistente tra processi vitali organici ed inorganici. Dal 1843 al 1846 pubblicò le prime sue memorie su questioni di *fisiologia energetica* da cui viene fuori con chiarezza la sua posizione contraria al moto perpetuo: dallo studio dell'attività muscolare e della produzione di calore risultava che la vita si realizza a spese di altra vita o di materiale inorganico e che la forza muscolare è originata solo da fattori fisici e chimici. E qui parve naturale creare un'analogia tra corpo umano e macchine, tra sistemi biologici e sistemi meccanici anche perché su tale questione si era discusso e scritto in passato in particolare dal medico fisiologo francese Julien Offroy De Lamettrie (1709 - 1751) che non a caso morì in esilio

a Potsdam, con il suo *L'Homme machine* (1747). Era un Illuminismo riletto in periodo di crisi del Romanticismo ed avrà avuto un qualche effetto in chi indagava il rapporto tra calore umano e sua capacità di compiere lavoro meccanico.

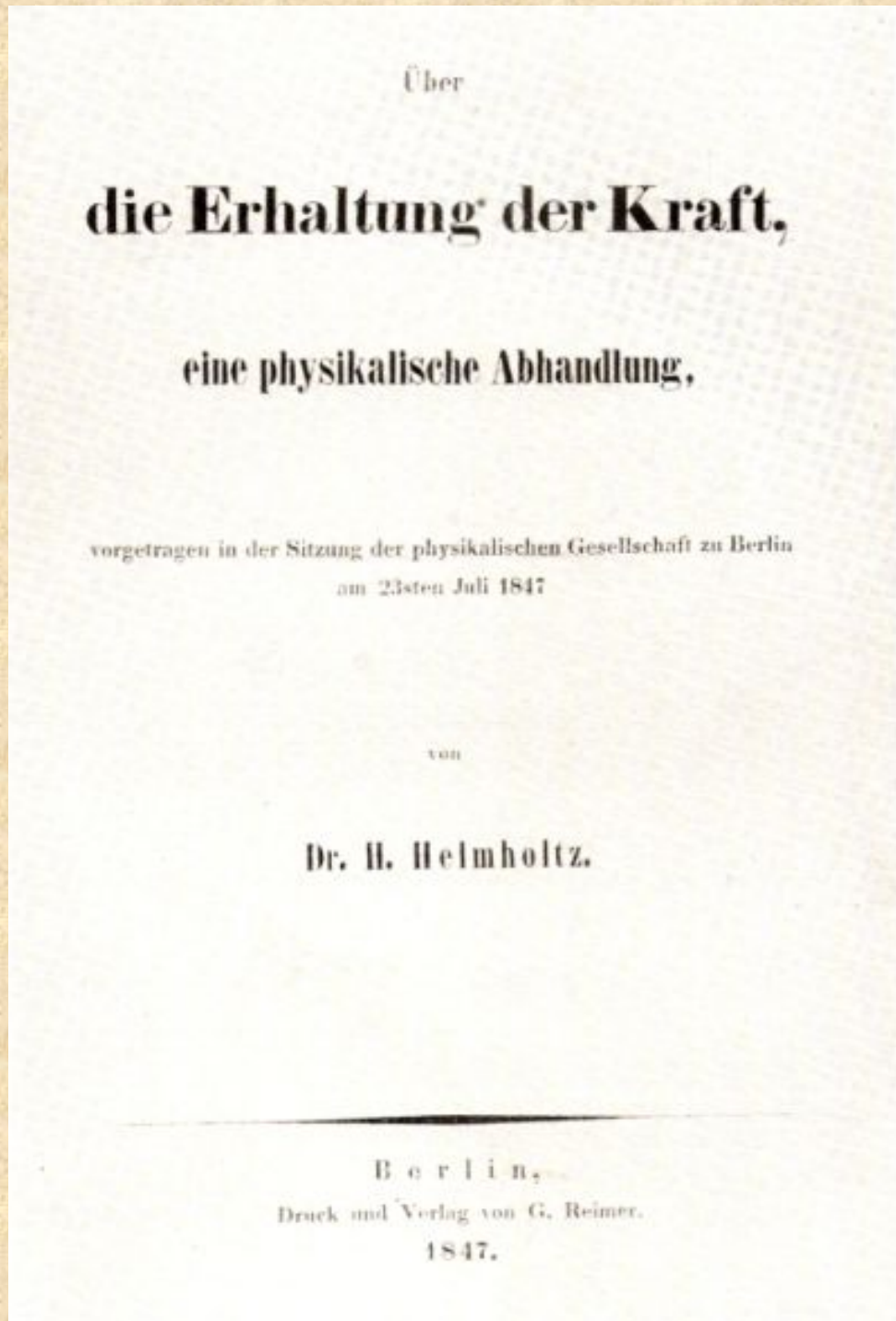


Helmholtz a 26 anni

LA CONSERVAZIONE DELLA FORZA

Il 23 luglio del 1847, alla Società Fisica di Berlino, il ventiseienne Helmholtz lesse la sua memoria *Über die Erhaltung der Kraft* (Sulla conservazione della forza⁽¹⁾) e quindi, dopo il rifiuto di pubblicazione da parte di Poggendorf sugli *Annalen der Physik und Chemie* (troppo lungo, disse, ma in realtà vi era la posizione di Poggendorf che non avrebbe mai sacrificato un lavoro sperimentale per una elaborazione teorica), la pubblicò privatamente presso l'editore G. Reimer. Anche qui la cosa non fu facile perché Reimer non pubblicava qualunque cosa; furono necessarie lettere di raccomandazione di suoi estimatori Müller, Du Bois Reymond, Magnus (un collaboratore degli *Annalen*). Reimer

accettò ed Helmholtz, che continuava in ristrettezze economiche, chiese che gli fosse fatto un buon prezzo perché si trattava di sole 15 copie; Reimer, alla fine del lavoro che tra l'altro non richiedeva lamine incise di rame per le figure, con sorpresa di Helmholtz, lo pagò. Si tratta di uno dei capisaldi del pensiero scientifico che colloca l'autore tra i grandi pensatori scientifici dell'Ottocento.



Frontespizio di *Über die Erhaltung der Kraft*

Come già accennato, l'opera si fonda sull'inammissibilità di moto perpetuo, sulla volontà di eliminare dalla fisica ipotesi filosofiche come quelle della *Naturphilosophie*, sul tentativo di trattare i fenomeni del

movimento in modo analitico, sulla necessità di ancorare i fenomeni naturali a cause ultime immutabili cioè a forze immutabili. Materie dotate di forze primordiali di attrazione e repulsione sono gli elementi primi della materia, i corpuscoli, che hanno la sola proprietà del movimento nello spazio, quel movimento che occorre indagare. Tutto ciò veniva detto con estrema chiarezza dallo stesso Helmholtz nell'*Introduzione* a questo suo lavoro (che era stata fortemente consigliata da Du Bois Reymond, contro il parere di Poggenдорf e Magnus). Scriveva Helmholtz:

Poiché la trattazione seguente era destinata, nella parte precipua del suo contenuto, soprattutto a fisici, ho preferito porre le sue basi in modo indipendente da una fondazione filosofica: nella pura forma di una premessa fisica, della quale sviluppare poi le conseguenze, che saranno confrontate con le leggi empiriche dei fenomeni naturali, vigenti nei diversi rami della fisica.

La prima notazione da fare è quella relativa alla pretesa di Helmholtz di fare una trattazione indipendentemente da una fondazione filosofica. Non serve dire che tale fondazione è evidente, se non altro in quanto si negano le fondazioni precedenti, in quanto lo stesso Helmholtz dirà 25 anni dopo presentando una nuova edizione di questo lavoro.. Egli scrisse che le sue considerazioni sulla conservazione della forza erano state influenzate dalla teoria della conoscenza di Kant e che ora (1872) non avrebbe più sostenuto quella posizione filosofica ma avrebbe puntato solo ed esclusivamente sull'esperienza: Scriveva ancora il nostro:

Compito delle scienze [fisiche] è, innanzi tutto, quello di cercare le leggi, attraverso le quali i singoli processi della natura possono essere ricondotti a regole generali, e nuovamente determinati per mezzo di queste ultime. [...] La ricerca delle regole sopra dette è il compito della parte sperimentale delle nostre scienze. La parte teorica cerca invece di trovare le cause ignote dei processi dai loro effetti visibili, e cerca altresì di comprenderli secondo la legge di causalità. Noi siamo costretti ed autorizzati a far ciò dall'assioma che ogni trasformazione deve avere in natura una causa sufficiente. Le prime cause, che noi attribuiamo ai fenomeni naturali, possono, a loro volta, essere immutabili o mutevoli, nel quale ultimo caso lo stesso assioma, di cui abbiamo detto, ci costringe a cercare altre cause di questa trasformazione, e così via, fino a che

giungiamo alle cause ultime, che agiscono secondo una legge immutabile, e che, dunque, producono in qualsiasi tempo, a parità di condizioni esterne, lo stesso effetto.

Ecco dunque il programma di Helmholtz che avevo annunciato. Si tratta ora di capire come si procede per andare a scovare le leggi immutabili:

La finalità ultima delle scienze teoriche della natura è, perciò, quella di scoprire le ultime, immutabili cause dei processi naturali. Se, ora, tutti i processi possano essere ricondotti a cause siffatte, e se, di conseguenza, tutta la natura debba essere completamente intellegibile, o se vi siano nella natura trasformazioni, che si sottraggono alla legge di una causalità necessaria, e ricadono in un ambito di spontaneità e di libertà, è cosa che non deve essere decisa qui; è chiaro, in ogni caso, che la scienza, la quale ha per scopo di comprendere la natura, deve muovere dalla presupposizione della sua intellegibilità, concludendo e indagando conformemente a tale presupposizione, fino a che essa debba essere eventualmente costretta a riconoscerne i limiti per via di fatti irrefutabili.

La scienza considera gli oggetti del mondo esterno secondo due diverse astrazioni. Da una parte essa li considera secondo il loro puro esistere, a prescindere dagli effetti, che gli oggetti esercitano su altri oggetti o sui nostri organi di senso; considerandoli tali, la scienza designa gli oggetti come materia. L'esistenza della materia in sé è, dunque, per noi, immota e priva di effetti; in essa distinguiamo la distribuzione spaziale e la quantità (massa), che è posta come eternamente immutabile. Alla materia in sé non possiamo attribuire differenze qualitative, poiché, quando parliamo di materie di diversa specie, identifichiamo sempre tale diversità con quella dei loro effetti, cioè con le loro forze. La materia in sé neppure, dunque, può subire altra trasformazione, che non sia spaziale: che non consista, cioè, in movimento. Ma gli oggetti naturali non sono privi di effetti, anzi noi li conosciamo in generale attraverso gli effetti, che essi determinano nei nostri organi di senso, e da questi effetti concludiamo all'esistenza di un fattore efficiente. Se vogliamo applicare alla conoscenza della realtà il concetto della materia, possiamo farlo solo a patto di avvicinarci nuovamente a quella astrazione, dalla

quale prima volevamo tenerci lontani, ossia alla capacità di produrre effetti; dobbiamo, cioè, attribuire alla materia delle forze. È illuminante il fatto che i concetti di materia e di forza non possano mai essere separati uno dall'altro nella loro applicazione alla scienza della natura. La mera materia costituirebbe per la restante natura una realtà indifferente, poiché non potrebbe determinare un mutamento né in essa né nei nostri organi di senso; una mera forza sarebbe qualcosa, che dovrebbe e non dovrebbe esistere, poiché noi chiamiamo materia quel che esiste. È altrettanto erroneo voler spiegare la materia come alcunché di reale, e la forza come un semplice concetto al quale non corrisponderebbe alcuna realtà. L'una e l'altra, la materia e la forza, sono, invece, astratte dalla realtà, e formate in modo del tutto uguale; e noi possiamo percepire la materia proprio soltanto attraverso le forze, insite in essa, non mai in sé e per sé.

Come si può osservare in tali parole vi è un trattato di filosofia, una ammissione di separazione e nel contempo unione di materia e forza. Di esistenza del principio causale, di materia che esiste in sé, di materia e forza che noi estraiamo dalla realtà per poterle indagare, .. Ognuna di queste cose meriterebbe un lungo discorso che verrà comunque fatto nel seguito con assunzione di diversi punti di vista, dal materialismo, all'idealismo, all'empiriocriticismo, all'energetismo. Insomma è troppo modesto Helmholtz a volersi tirare fuori da un dibattito filosofico. O forse, date le primissime parole, non voleva spaventare i fisici che, in ambiente positivista, diffidavano molto delle fantasticherie e delle parole vuote che da qualche tempo i filosofi offrivano senza nulla concludere. Altrove Helmholtz, in occasione del suo settantesimo compleanno, affrontò esplicitamente questo punto dicendo, a proposito di questa sua memoria, che si sarebbe aspettato un giudizio del tipo "sono cose che conosciamo", ma i fisici che contavano ebbero altro atteggiamento. *Essi erano disposti a negare la correttezza della legge e, nella lotta violenta contro la filosofia di Hegel, a dichiarare che il mio lavoro era esso stesso una speculazione fantastica.* Solo il matematico Jacobi capì fin dall'inizio che si trattava di ben altro. Continuiamo a leggere:

Abbiamo già visto che i fenomeni naturali devono essere ricondotti a cause ultime immutevoli. Questa esigenza si esprime ora nella necessità di trovare, quali ultime cause, forze immutevoli nel tempo. Materie dotate di forze immutevoli (di qualità indistruttibili) sono quelle che noi

chiamiamo, nella scienza, elementi (chimici). Ma se noi immaginiamo che l'universo sia suddiviso in elementi dotati di qualità immutabili, le uniche trasformazioni ancora possibili in un tal sistema sono spaziali cioè consistono in movimenti, e le condizioni esteriori, che possono modificare l'effetto delle forze, sono soltanto quelle spaziali: le forze, perciò, sono soltanto forze motrici, il cui effetto dipende soltanto dai rapporti spaziali.

A voler determinare ulteriormente questo concetto, si potrebbe dire che i fenomeni naturali debbono essere ricondotti a movimenti di materie, dotate di forze motrici immutabili, le quali dipendono soltanto dai rapporti spaziali.

Il moto è mutamento dei rapporti spaziali. Rapporti spaziali sono possibili soltanto rispetto a porzioni limitate di spazio, non rispetto allo spazio vuoto e privo di differenze. Il moto, perciò, nei limiti dell'esperienza si verifica solo come mutamento dei rapporti spaziali reciproci di almeno due corpi materiali; la forza motrice come causa del moto si manifesta soltanto nel caso dei rapporti reciproci di almeno due corpi, e deve essere definita come la tendenza di due masse a cambiare la loro vicendevole posizione. Ma la forza, che due masse considerate nella loro interezza esercitano l'una sull'altra, deve essere decomposta in forze reciproche di tutte le loro parti; la meccanica retrocede, perciò, alle forze dei punti materiali, ovvero dei punti dello spazio riempito di materia. I punti, però, non hanno altra reciproca relazione spaziale se non la distanza, poiché la direzione della linea che li unisce può essere determinata solo in rapporto ad almeno altri due punti. Una forza motrice, che essi esercitano l'uno sull'altro, può essere, pertanto, solo la causa d'un mutamento della loro distanza, ossia una forza attrattiva o repulsiva. Ciò costituisce anche una conseguenza immediata del principio di ragion sufficiente. Le forze, che due masse esercitano l'una sull'altra, devono necessariamente essere determinate secondo la loro grandezza e la loro direzione, se è data completamente la posizione delle masse. Attraverso due punti, però, è data completamente una sola direzione: la direzione della linea, che li unisce; di conseguenza le forze, che i punti esercitano l'uno sull'altro, devono essere dirette secondo questa linea, e la loro intensità può dipendere soltanto

dalla distanza. Il compito delle scienze fisiche si determina, pertanto, in ultima istanza, come quello di ricondurre fenomeni naturali a forze immutabili, attrattive o repulsive, la cui intensità dipende dalla distanza. [...]

Questo è il percorso che porta Helmholtz dalla ricerca delle cause prime ai corpuscoli ma c'è ancora una parte che entra direttamente in ambito filosofico. Si parla di forze agenti lungo una linea, si sta quindi negando il conflitto di forze della *Naturphilosophie* e si sta tornando alle forze di tipo newtoniano, con una adesione al meccanicismo. Fatta questa lunga premessa, che è un manifesto di convinzioni filosofiche, Helmholtz passa a trattare l'argomento centrale che si propone, **Il principio di conservazione della forza viva:**

Prendiamo le mosse dalla supposizione che sia impossibile produrre continuamente forza motrice dal nulla, attraverso qualsivoglia combinazione di corpi naturali. Da questo principio Carnot e Clapeyron hanno già dedotto teoricamente una serie di leggi in parte note, in parte non ancora dimostrate sperimentalmente, sul calore specifico e sul calore latente dei diversi corpi. Scopo di questa trattazione è di introdurre, nella stessa maniera, il principio suddetto in tutti i rami della fisica, sia per dimostrarne l'applicabilità a tutti quei casi, dove le leggi dei fenomeni siano già state investigate a sufficienza, sia giungere con l'ausilio del medesimo principio, e avvalendosi delle multiformi analogie con i casi meglio noti, alle leggi dei casi non ancora compiutamente investigati, e offrire così un filo conduttore all'esperimento.

Il principio sopra menzionato può essere rappresentato nel modo seguente.

Se pensiamo a un sistema di corpi naturali, che si trovino l'un l'altro in determinati rapporti spaziali, e si muovono sotto l'influenza reciproca delle loro forze, fino a che siano giunti a occupare determinate altre posizioni: noi possiamo, allora, considerare le velocità da essi acquisite come un dato lavoro meccanico, e trasformarle in lavoro. Se vogliamo, poi, che le stesse forze agiscano una seconda volta, per ottenere un'altra volta lo stesso lavoro, dobbiamo in qualche modo rimettere i corpi nelle condizioni iniziali, servendoci di altre forze a noi disponibili; per il nostro scopo useremo, dunque, una certa quantità del lavoro, compiuto da tali ultime forze. In questo caso il nostro

principio esige che la quantità di lavoro, da noi acquisita quando i corpi del sistema passano dalla posizione iniziale alla posizione finale, e da noi invece perduta, quando i corpi passano dalla seconda posizione nella prima, sia sempre la stessa, a prescindere dal modo, dalla traiettoria o dalla velocità del suddetto passaggio. Ché se la quantità di lavoro fosse maggiore per una traiettoria che per l'altra, noi potremmo servirci della prima per ottenere lavoro, della seconda per ritornare allo stato iniziale dei sistemi, utilizzando nel ritorno la parte del lavoro da noi ottenuto, e guadagnando così indefinitamente forza meccanica. Avremmo costruito un perpetuum mobile, che non soltanto resterebbe in movimento, ma sarebbe anche in grado di cedere forza all'esterno.

Ecco l'altro elemento annunciato, l'impossibilità di *perpetuum mobile* attraverso una esemplificazione eccellente che è poi quella ancora in uso anche in un insegnamento elementare. Il prendere le mosse da questa impossibilità permetteva ad Hekmholtz di conseguire due risultati: da una parte disporre di un principio di validità generale in tutti i campi della fisica e dall'altra di avere in mano un principio che può essere espresso nel linguaggio rigoroso dell'analisi.

Se cerchiamo di determinare l'espressione matematica di siffatto principio, la troviamo nella nota legge della conservazione della forza viva. La quantità di lavoro, che è ottenuta e spesa, può essere, come si sa, equiparata a un peso m sollevato a una determinata altezza h ; essa è allora mgh , dove g indica l'intensità della gravità. Per poter salire liberamente in linea retta fino all'altezza h , il corpo m ha bisogno di una velocità $v = \sqrt{2gh}$, e la riacquista nella caduta. Abbiamo dunque $\frac{1}{2}mv^2 = mgh$; di conseguenza la metà del prodotto mv^2 , che nella meccanica, come è noto, è chiamato «la quantità della forza viva del corpo m », può essere sostituito alla misura della quantità di lavoro. Per istituire la migliore concordanza con il modo oggi consueto di misurare l'intensità delle forze preferisco subito indicare la grandezza $\frac{1}{2}mv^2$ come quantità della forza viva, con il che essa diventa identica alla misura della quantità di lavoro.

La quantità di lavoro risultava quindi come una grandezza che si manteneva costante nei processi fisici qualsiasi, purché godessero della proprietà della reversibilità.

Quanto si propone di mostrare Helmholtz, la conservazione della forza (nel senso di energia), deve valere per particelle che agiscano tra loro secondo leggi che facciano dipendere la forza dalla distanza. E la validità generale del principio, come Helmholtz andava a dimostrare, risiede nella possibilità di ridurre le forze semplici, agenti sui punti materiali, in forze di tipo centrale.

Questo principio non vale, però, per tutti i possibili generi di forze; nella meccanica esso è di solito collegato con il principio delle velocità virtuali, e questo può essere dimostrato soltanto per punti materiali con forze attrattive e repulsive. Noi vogliamo mostrare qui, in primo luogo, che il principio della conservazione delle forze vive è valido soltanto quando le forze agenti possono essere decomposte in forze di punti materiali, che operano nella direzione della linea che li congiunge, e la cui intensità dipende soltanto dalla distanza; nella meccanica tali forze sono di solito chiamate forze centrali. Da ciò segue anche, all'inverso, che in tutti gli effetti reciproci di corpi naturali, dove il principio suddetto può essere generalmente applicato anche a tutte le più piccole parti di tali corpi, è necessario ammettere che le forze fondamentali più semplici siano forze centrali.

A questo punto Helmholtz, nel Paragrafo II della memoria, forniva un'espressione più generale del principio di cui ha parlato. Prendendo in considerazione una massa puntiforme soggetta ad una forza centrale, scriveva (cambio alcune notazioni):

Se l'intensità f della forza, che agisce nella direzione di r , è considerata positiva quando la forza attrae, e negativa quando essa respinge, allora [le tre componenti della forza saranno]:

$$F_x = -\frac{x}{r} \cdot f \quad F_y = -\frac{y}{r} \cdot f$$
$$F_z = -\frac{z}{r} \cdot f$$

Allora la forza viva, che indico con F , sarà:

$$F = F_x + F_y + F_z$$

e cioè:

$$\frac{1}{2} m \cdot d(v^2) = -\frac{f}{r} \cdot (x dx + y dy + z dz)$$

Osservato ora che risulta:

$$\frac{x dx + y dy + z dz}{r} = dr$$

si trova subito:

$$\frac{1}{2} m \cdot d(v^2) = -f \cdot dr$$

Integrando ora questa espressione tra r ed un'altra distanza R (in corrispondenza della quale la velocità diventerà V) si ha:

$$\frac{1}{2} m V^2 - \frac{1}{2} m v^2 = -\int_r^R f \cdot dr$$

L'integrale a secondo membro è importante perché rappresenta *la somma delle forze di tensione* (che, come già detto, sono le forze che cercano di muovere il punto m fino a tanto che esse non abbiano ancora provocato il movimento) che la massa m sente tra le distanze R ed r . In definitiva Helmholtz enunciava la legge di conservazione della forza nel modo seguente:

«L'incremento della forza viva di una massa puntiforme, nel suo muoversi sotto l'influsso di una forza centrale, è uguale alla somma delle forze di tensione corrispondenti alla mutata distanza dal centro di quella massa».

Questo enunciato è ancora parziale perché riferito ad una sola massa puntiforme. Fatte le opportune generalizzazioni Helmholtz poteva dire che:

«La somma delle forze vive e di tensione che sono presenti è sempre costante».

Il paragrafo viene così concluso:

1) ogni volta che corpi naturali, a causa di forze attrattive

o repulsive che siano indipendenti dal tempo e dalla velocità, agiscono l'uno sull'altro, la somma delle loro forze vive e di tensione dev'essere costante; la quantità massima di lavoro, che si può ottenere, dev'essere una quantità determinata, finita;

2) se, invece, nei corpi naturali si danno anche forze che dipendono dal tempo e dalla velocità, o che agiscono in direzioni diverse dalla linea congiungente due dei punti materiali attivi, per esempio in una direzione rotatoria, allora sarebbero possibili composizioni di tali corpi, nelle quali o si perde forza all'infinito, o se ne acquista [si tenga a mente questo punto quando Helmholtz osserverà che la sua azione di forza non rispetta la conservazione dell'energia, ndr];

3) in uno stato di equilibrio di un sistema di forze sotto l'azione di forze centrali, le forze interne e le esterne devono tenersi per se stesse in equilibrio, se noi immaginiamo che i corpi del sistema siano legati tra loro in modo da essere immobili, e che soltanto il sistema nella sua interezza possa muoversi verso corpi al di fuori di esso. Un sistema fisso di tali corpi, perciò, non potrà mai essere messo in movimento per effetto delle sue forze interne, ma solo attraverso l'intervento di forze esterne. Se, invece, si dessero forze diverse dalle centrali, vi sarebbero legami rigidi tra corpi naturali, che si muoverebbero da sé, senza aver bisogno di una relazione ad altri corpi.

Fatto ciò, passava ad applicare queste sue considerazioni a problemi meccanici con una trattazione analitica che si serve di equazioni differenziali alle derivate parziali (dico questo per affermare che è la prima volta che in ambito di equivalenza lavoro calore o conservazione dell'energia, si utilizza una trattazione che avrebbe dovuto tranquillizzare i fisici ortodossi). Nel fare questo introdusse una grandezza che si rivelerà assai proficua, quella che egli chiamava *forza di tensione* e che oggi chiamiamo *energia potenziale*. Scriveva Helmholtz:

[...] chiamiamo forze di tensione, all'opposto di ciò che la meccanica chiama forza viva, le forze che cercano di muovere il punto m , fino a tanto che esse non abbiano ancora provocato il movimento [...].

Si tratta di un indispensabile concetto che mette nel conto non solo l'effetto fisico che si realizza quando un corpo cade o viene sollevato da terra ma anche quello che ci si deve aspettare dopo aver creato alcune situazioni (sollevare una massa è spendere energia che non è sparita ma è accumulata in quella massa finché essa non è lasciata cadere). La grandezza *forza di tensione* era indispensabile per formalizzare la capacità di fare lavoro presente in un sistema reversibile mediante il quale è stato possibile mostrare l'impossibilità del moto perpetuo. Dal punto di vista analitico forza di tensione e forza viva sono uguali ma la prima è contraddistinta da un segno meno (sollevare una massa significa farla muovere in un dato verso; il lavoro mi verrà restituito quando la massa si muoverà in verso opposto). Helmholtz concludeva questa parte, eminentemente meccanica con queste parole:

Possiamo ora formulare la legge nel modo seguente: «In tutti quei casi, nei quali punti materiali liberi si muovano sotto l'influenza delle loro forze attrattive o repulsive: forze, le cui intensità dipendano soltanto dalla distanza, la perdita della quantità di forza di tensione è sempre uguale all'acquisto di forza viva, e l'acquisto della prima è uguale alla perdita della seconda. La somma delle forze vive e di tensione, che sono presenti, è sempre costante». In questa forma affatto generale, possiamo definire la nostra legge come il principio della conservazione della forza.

Nel proseguire la sua trattazione Helmholtz iniziava a mettere nel computo dei fenomeni da considerare vive anche la luce intesa come un'onda elastica e quindi, nella visione di Augustin Fresnel (1788 - 1827), come vibrazione di particelle dotate quindi di forza viva. E, vista l'identità tra raggi luminosi, raggi calorifici (radiazione che oggi chiamiamo *infrarosso*), e raggi chimici (radiazione che oggi chiamiamo *ultravioletto*), come mostrato da [Macedonio Melloni](#), le considerazioni del nostro, si estendono a questo intero ambito di fenomeni.

E fin qui siamo nell'ambito dei lavori o delle energie dei tipo meccanico. Per completare la trattazione di quanto si è proposto, si doveva passare a trattare il calore. Helmholtz iniziò in un modo felice, riprendendo la meccanica ed andando a citare i fenomeni dove *scompare* lavoro, l'urto tra corpi anelastici e l'attrito. Quest'ultimo viene rappresentato in meccanica come una forza che agisce in verso opposto al moto, cosa comoda nei calcoli che non consente però di capire cosa accade, soprattutto a livello delle forze molecolari. Ma, aggiungeva Helmholtz, *l'acquisto di calore [che si origina in questi fenomeni] costituisce per noi una forza, attraverso la quale possiamo produrre*

*effetti meccanici.[...] Resterebbe da chiedersi se la somma di queste forze corrisponda sempre alla forza meccanica perduta [...] e] se per una certa perdita di forza meccanica sorga ogni volta una determinata quantità di calore, e fino a qual punto una quantità di calore possa corrispondere a un'equivalente di forza meccanica. E qui troviamo una citazione di Joule⁽²⁾ non certamente benevola perché Helmholtz la riferiva solo al processo diretto (dalla forza meccanica si origina calore) e criticava i suoi processi di misura *troppo poco adeguati alla difficoltà della ricerca, perché questi risultati possano avere qualche pretesa di esattezza.**

Quel che è stato finora chiamato quantità di calore, potrebbe servire d'ora in poi come espressione in primo luogo della quantità di forza viva del movimento termico, e in secondo luogo della quantità di quelle forze elastiche degli atomi, che, cambiando la loro disposizione, possono provocare un tale movimento; la prima parte corrisponderebbe a ciò che fino ad ora è stato chiamato calore libero, la seconda a ciò che è stato chiamato calore latente. Se è consentito di compiere un tentativo per determinare ulteriormente il concetto di questo moto, diremo che, in generale, un'ipotesi conforme alle vedute di Ampère sembra corrispondere nel migliore dei modi allo stato odierno della scienza. Se immaginiamo che i corpi siano costituiti di atomi, i quali poi consistono di parti differenti (elementi chimici, elettricità ecc.), in un atomo così concepito si possono distinguere tre tipi di movimenti e cioè: 1) spostamento del punto di gravità, 2) rotazione intorno al punto di gravità, 3) spostamenti reciproci delle particelle dell'atomo⁽³⁾. I due primi movimenti sarebbero compensati dalle forze degli atomi circostanti, e si propagherebbero perciò a questi in forma di onda: una maniera di propagazione, che corrisponde forse all'irradiazione, ma non alla conduzione del calore. I movimenti reciproci delle singole parti dell'atomo si compenserebbero attraverso le forze interne dell'atomo medesimo, e solo lentamente potrebbero comunicare il movimento agli atomi circostanti, come fa una corda oscillante nel metterne in movimento un'altra: perdendo, per questo, una uguale quantità di moto; questa maniera di propagazione sembra essere simile a quella dei fenomeni di conduzione del calore. È anche chiaro, in generale, che tali movimenti negli atomi possono determinare modificazioni delle forze molecolari, cioè dilatazione e mutamento dello

stato di aggregazione; ma a noi mancano tutti gli indizi per determinare il tipo di questi movimenti, anche se per i nostri scopi è sufficiente capire la possibilità che le manifestazioni termiche siano concepite assimilandole a movimenti. In tali movimenti si verificherebbe la conservazione della forza dovunque è stata finora riconosciuta la conservazione della quantità di materia calorica, e cioè in tutti i fenomeni di conduzione e di irradiazione da un corpo all'altro, nell'assorbimento e nella liberazione di calore, determinati da modifiche dello stato di aggregazione.

Qui Helmholtz si avventurava in speculazioni teoriche richiamando la teoria delle molecole di Ampère⁽⁴⁾. E la costruzione ipotetica andava molto oltre perché egli faceva un'operazione di tipo riduzionista, certamente molto efficace, soprattutto per le conseguenze che avrebbe avuto: il calore è prodotto dalle energie meccaniche delle molecole. E' lo studio di tali energie, attraverso le vibrazioni delle molecole, che permette di avere una corretta rappresentazione di ciò che chiamiamo calore. Si tratta di studiare il comportamento microscopico dei corpuscoli costituenti la materia, di avviare cioè uno studio della materia mediante una teoria cinetica. Attraverso questo cammino introduceva una differenza che svilupperà più oltre e sarà feconda per Clausius, la separazione concettuale tra l'energia termica che si può trasformare chiamata libera e quella che resta nel sistema come calore latente individuata nell'agitazione propria delle molecole, anticipando quella che sarà l'energia interna di un sistema termodinamico. Ma introduce anche un concetto che sarà fecondissimo, quello dei gradi di libertà delle molecole. Si tratta di un programma sul quale lavoreranno vari fisici nella seconda metà dell'Ottocento ed oltre. Noto a margine l'introduzione che Helmholtz fa del *calore libero*. Da questa espressione nascerà in seguito quella di *energia libera*, una funzione di stato che gioca un ruolo molto importante in termodinamica.

Nei passi successivi della memoria, Helmholtz considerava il calore che si sviluppa nei processi chimici discutendo i risultati di Clapeyron e trovandoli in accordo con i propri e con i dati sperimentali. E, di seguito, passava a considerare l'insieme dei fenomeni elettrici sia quelli statici rappresentati proprio come azioni di cariche nella legge di Coulomb che è legge di forza centrale e quindi nei fenomeni interessati nel funzionamento di una pila, distinguendo tra correnti ordinarie e quelle di polarizzazione. Tutto ciò guidato sempre dall'ammissione di conservazione dell'energia con la quale confrontare i vari fatti noti.

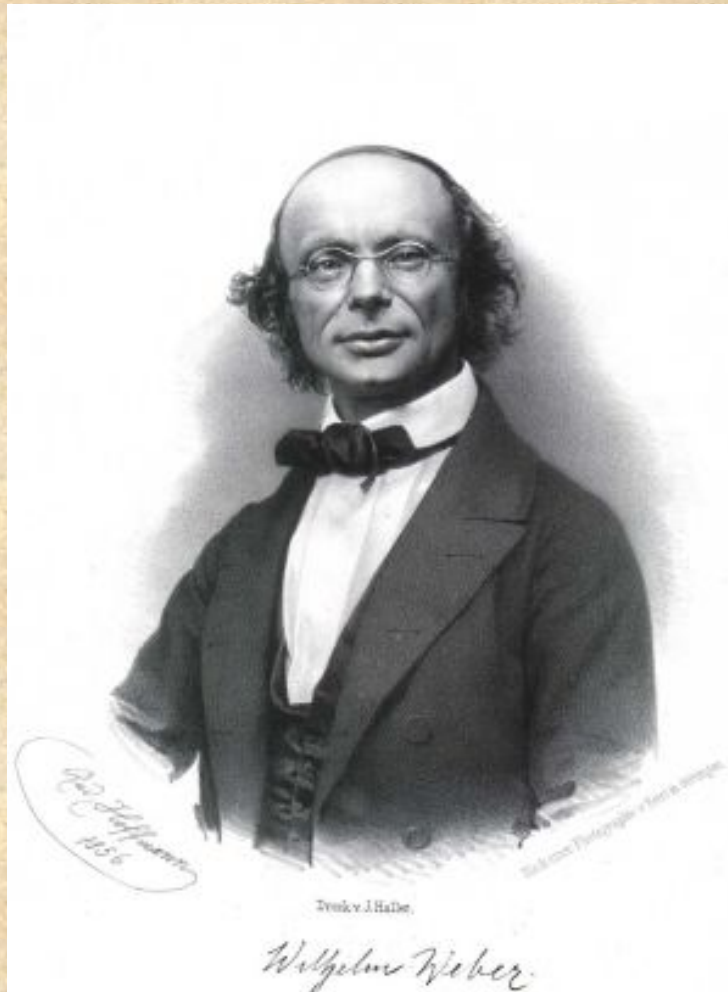
Egli passava poi a considerare i fenomeni magnetici ed elettromagnetici e, da ultimo, quelli del mondo organico (vegetale) ed animale, ma con brevi cenni. E, dopo questa competa disamina di tutti i fenomeni noti, Helmholtz concludeva la sua memoria così:

Io credo di avere dimostrato, con quanto è stato detto, che la legge, di cui ci siamo occupati, non contraddice ad alcuno dei fatti finora noti alle scienze della natura, ed è, invece, convalidata in modo sorprendente da un gran numero di tali fatti. Mi sono sforzato di presentare, con la maggiore possibile completezza, le conseguenze che derivano dal porre in relazione alla legge della conservazione dell'energia le altre leggi, finora note, dei fenomeni naturali: conseguenze che ancora devono aspettare conferma dall'esperimento. Lo scopo di questa ricerca, il quale può anche ottenermi venia della parte ipotetica della ricerca stessa, fu quello di esporre ai fisici, con la maggiore possibile completezza, l'importanza teorica, pratica ed euristica della legge di conservazione dell'energia, la cui esauriente convalida deve, forse, essere considerata come uno dei principali compiti della fisica nel prossimo futuro.

C'è da osservare che, come lo stesso Helmholtz riconoscerà in seguito, la derivazione delle conclusioni di Helmholtz a partire dall'impossibilità del moto perpetuo non era sostenibile. Infatti questa derivazione riesce ad Helmholtz solo attraverso l'ipotesi aggiuntiva ma determinante che tutte le forze in natura debbano essere forze centrali. Questa ipotesi sorge, per Helmholtz, dalla non creabilità della forza, mentre dall'unica esistenza delle forze centrali seguirebbe, a sua volta, l'indistruttibilità della forza.

Ma [Wilhelm Weber](#) (1804 - 1891) nella nella prima memoria di una serie [Elektrodynamische Maasenbestimmungen uber ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung](#) ovvero: "Determinazione di una misura elettrodinamica a proposito di una legge universale di azione elettrica" (*Abhandlungen Leibnizens Ges.*, Leipzig, p. 316, 1846) aveva mostrato che le forze elettrodinamiche da lui ipotizzate dipendono non solo dalla distanza ma anche dalla velocità e dall'accelerazione e, più tardi nella *Elektrodynamische Maasbestimmungen, insbesondere über das Princip der Erhaltung der Energie* ovvero "Sulle misure in elettrodinamica con particolare riferimento al principio di conservazione dell'energia" (*Abhandlungen der mathem.-phys. Classe der Koenigl. S'achsischen Gesellschaft der Wissenschaften*, Vol. X, Jan. 1871), che

tali forze soddisfano sempre il principio di conservazione della forza salvo i casi di velocità enormi, tali da superare la velocità della luce. Su questo vi sarà uno scambio di memorie tra Weber ed Helmholtz agli inizi degli anni Settanta, come dirò più oltre.



Wilhelm Weber

In ogni caso questo lavoro, che è una pietra miliare nella storia del pensiero scientifico, come già detto, fu presentato agli *Annalen der Physik und Chemie* di Poggendorff che non lo volle pubblicare, ripetendo l'impresa portata a termine con Mayer, ma con qualche giustificazione. La pubblicazione presso un editore privato e non su una rivista scientifica prestigiosa e con diffusione nel mondo della scienza, ritardò di almeno 5 anni la compiuta conoscenza di questo lavoro da parte di molta parte della comunità scientifica. Si può osservare che, nel complesso, il principio di conservazione dell'energia non emerge a seguito di particolari sperimentazioni o del presentarsi di fatti nuovi ma come esigenza di sistemazione, soprattutto teorica, di molti risultati che venivano accumulandosi da più parti e dalle più diverse discipline. Il lavoro, come vedremo, verrà ripreso, e penetrato in tutta la sua potenza esplicativa e predittiva da William Thomson nel 1852 in un contesto di *teoria dinamica del calore*.

ALTRI LAVORI

Gli studi di Helmholtz seguirono incessanti. Da questo punto li racconterò per completezza ma non compare quasi più la termodinamica, anche se il principio di conservazione dell'energia che aveva trovato e mediante il quale aveva potuto dare un primo colpo a quel *vitalismo* che non era altro che metafisica, gli servì da guida per molti altri studi. Lavorò con esperienze in modo da dare alla fisiologia una base scientifica molto più solida tentando di applicare ad essa la fisica. L'impegno con cui si mise su questa strada, che gli farà fare scoperte d'interesse alle quali accennerò, fu colto dalla sua famiglia con disapprovazione. Lo studio dei sensi, udito e vista, come apparati fisici era stato accolto con profondo dispiacere dal padre che intravedeva un orientamento materialista in suo figlio. Lo pregò di lasciar perdere e di passare a vedute più alte del mondo. Il figlio reagì semplicemente non facendo più sapere alla famiglia l'oggetto dei suoi lavori.

Intanto qualche personalità di rilievo si era accorto delle grandi capacità del giovane Hermann. Tra questi, il famoso naturalista ed esploratore Alexander von Humboldt (1769 - 1859) che intervenne presso l'esercito per ottenere la liberatoria anticipata del giovane dal servizio che avrebbe dovuto prestare. Iniziò così l'insegnamento, prima all'Accademia d'arte di Berlino (1848) quindi in un sede per lui mitica per essere stato il luogo dove aveva insegnato Kant, Königsberg, dal 1849 al 1855. Da Königsberg passò a Bonn (1855 - 1858), quindi a Heidelberg (1858 - 1871). Fin qui i suoi insegnamenti erano stati o di anatomia o di fisiologia ma nel 1871, dopo essere stato nominato membro dell'Accademia delle



Alexander von Humboldt

Scienze di Prussia ed a seguito di alcune sue memorie relative all'elettrodinamica, fu chiamato come professore di fisica a Berlino. A questo punto si susseguirono

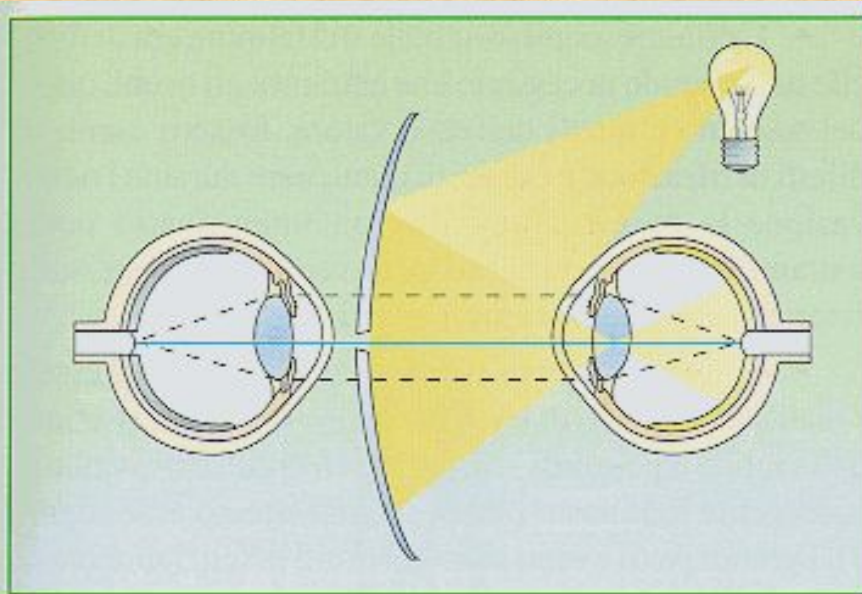


Friedrich-Wilhelm-Universität di Berlino poi divenuta Humboldt-Universität

incarichi di prestigio: nel 1876 divenne rettore dell'Università Humboldtiana (istruzione universitaria dove ricerca ed insegnamento andavano avanti di pari passo e basata sull'unità ed universalità del sapere. Lo studente doveva costruire da sé il curriculum in base ai suoi interessi generali, specifici e concreti rispetto al mercato culturale e del lavoro che il momento offriva. Il fine era la formazione del cittadino più che la preparazione di specialisti); nel 1888 fu nominato Presidente dell'Istituto Imperiale fisico-tecnico, *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt*, che era stato creato con importanti donazioni da parte dell'inventore ed industriale tedesco Werner von Siemens (1816 - 1892). Ebbe molti onori, tra i quali quelli dell'imperatore Guglielmo II che lo fece nobile e lo nominò consigliere privato.

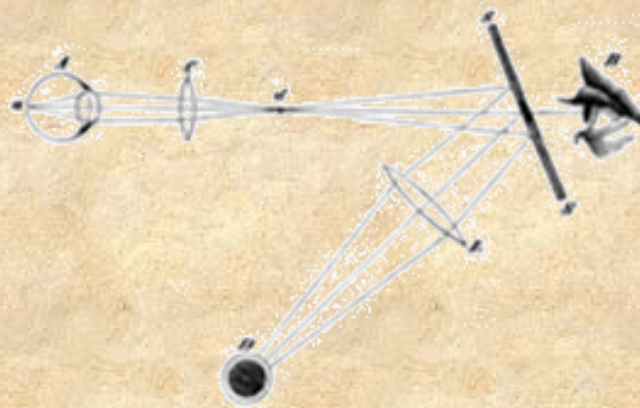
Gran parte dei lavori di Helmholtz saranno di ottica fisiologica, di acustica fisiologica ed in generale di problemi di fisiologia trattati con l'acutezza delle sue osservazioni e la serietà ed accuratezza delle sue esperienze. Non entrerà nei dettagli di questi lavori ma li citerò quando d'interesse all'economia di questo lavoro.

Nel 1850, Helmholtz fece un'importante scoperta che gli dette molta notorietà: dimostrò che l'eccitazione si propaga lungo i nervi con velocità finita e neppure elevata. I fisici misero in dubbio la correttezza del metodo di misura mentre i filosofi si scandalizzarono perché vi era qualcuno che sosteneva che i fenomeni psichici richiedessero del tempo. Sempre nel 1850 realizzò un dispositivo ottico, l'*oftalmoscopio* (Augen-Spiegel), per permettere l'osservazione del fondo dell'occhio mediante la proiezione su uno schermo dei raggi di luce arrivati alla retina e qui riflessi. Lo strumento fu in seguito perfezionato e divenne un *oftalmometro* che permetteva di stabilire la curvatura della cornea. La notizia dell'evento venne data in una memoria del 1851.



Principio di funzionamento dell'oftalmoscopio:
l'occhio del paziente è guardato attraverso un foro
che si trova nel mezzo di uno specchio concavo che
illumina l'occhio osservato riflettendo la luce di una
sorgente.

Da: www.xagen.it/fimmg.toscana/fimmg003.htm



Schema di funzionamento dell'oftalmoscopio



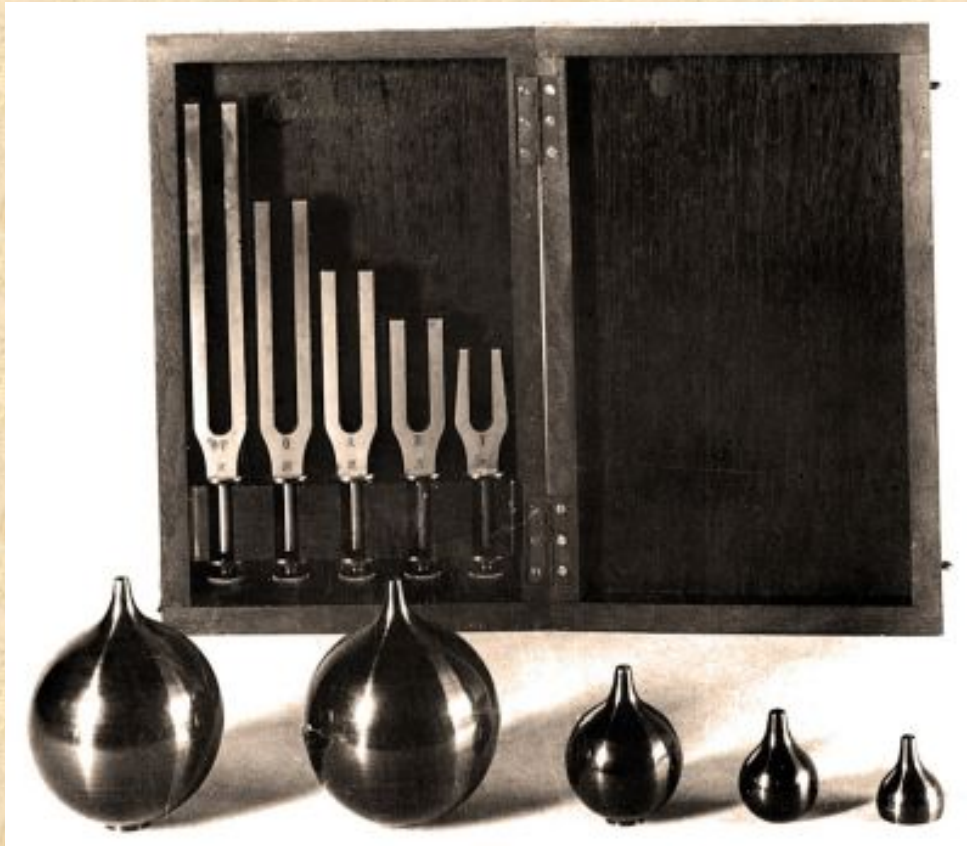
Come si presentava lo strumento.

Gli studi ottici proseguirono interessando, nell'ambito di una teoria dell'occhio, lo studio dei colori ma anche della visione più in generale (*Handbuch der Physiologischen Optik*, 1861). Riprese la teoria del medico inglese Thomas Young (1773-1829) e mostrò la non correttezza della teoria dei colori di Newton (ma tre anni dopo si corresse su questo punto) e, soprattutto, della [teoria di Goethe](#) (1749 - 1832)⁽⁵⁾ sviluppata nella *Zur Farbenlehre* (Teoria dei colori) del 1810. Questi studi di ottica occuparono tutti gli anni di Königsberg ed irritarono i filosofi che intesero questi i lavori di Helmholtz come interventi indebiti nel loro campo, quello delle impressioni sensoriali.

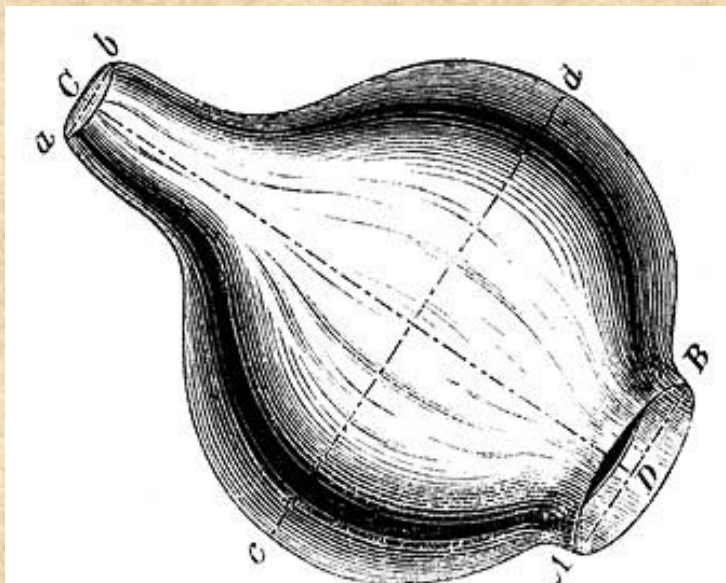
A partire dal 1856, già a Bonn, il nostro affrontò anche studi di acustica fisiologica che lo portarono alla realizzazione di altri strumenti di grandissima utilità per la medicina. E dovette anche difendersi in giudizio per una denuncia fatta al ministero a Berlino da Friedrich Züllner, personaggio dedito allo spiritismo e autodefinitosi riformatore morale della scienza, sul suo approccio all'anatomia ritenuto meccanicista e materialista. Altri attacchi arrivarono più tardi da quell'Eugen Dühring filosofo ed economista contro il quale Friedrich Engels scrisse l' *Anti-Dühring: Herr Eugen Dühring's Revolution in Science*, ovvero: *Anti-Dühring: la scienza sovvertita del sig. Eugen Dühring*, 1878. E tutto ciò prostrava il suo animo che si sentiva sempre più scoraggiato.

Anche con i lavori di acustica, che portò avanti ancora durante i 14 anni che passò ad Heidelberg, egli operò in modo da oggettivare i fenomeni e riportarli, nell'ambito del possibile, a spiegazioni fisiche.

Come fece per l'ottica realizzò uno strumento per l'analisi dei suoni, il *risonatore*⁽⁶⁾. Si tratta di varie sfere cave di differenti dimensioni (vedi figura), ognuna tarata ad una data frequenza, che basano il loro funzionamento su banali principi di acustica.



In primo piano vi sono 5 risonatori di Helmholtz (ma se ne possono fabbricare molti di più, con volumi diversi). Sullo sfondo in una cassetta contenitrice vi sono i diapason per tarare i risonatori.





Il risonatore ha due aperture, una in grado di penetrare nel cavo dell'orecchio e l'altra che comunica con l'ambiente esterno. L'aria contenuta nella sfera ha una frequenza propria dipendente dal suo volume. Quando dall'esterno si produce un suono composto da più frequenze, al timpano arriva esaltata la frequenza propria del risonatore e si è quindi in grado di capire quali frequenze un dato orecchio è in grado di percepire e quali no. Si è quindi in grado di capire eventuali difetti perché la percezione dei suoni semplici, dipende, oltreché dalla loro intensità, dalla loro frequenza. Nel caso di suoni ordinari provenienti dall'ambiente le cose sono più complesse perché occorre tenere conto delle armoniche e quindi di fase ed ampiezza di tali componenti.

I suoni furono anche sottoposti ad analisi teorica da Helmholtz che provò l'esistenza di suoni di combinazione ([*Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*](#), 1863). Egli applicò ad essi il metodo dello sviluppo in serie che Fourier aveva utilizzato per formulare la sua teoria meccanica del calore e che già Ohm aveva applicato allo studio delle armoniche superiori nelle oscillazioni⁽⁷⁾. A quanto aveva ricavato Ohm, egli aggiunse che la qualità di un tono dipende solamente dal numero e dall'intensità relativa dei toni e non dalla loro fase relativa, fornendo una spiegazione fisiologica di quanto Ohm aveva trovato. Inoltre Helmholtz trovò che *ogni movimento periodico dell'aria può essere espresso da una somma di termini, ciascuno dei quali ha la forma $A \cdot \sin(2\pi n t + c)$ e corrisponde, dunque, a una vibrazione pendolare semplice delle particelle d'aria.*

Era soddisfatto di questo suo lavoro e lo comunicò con una lettera a William Thomson, del quale era diventato amico, dopo una visita in Gran Bretagna nel 1853:

Con le mie teorie fisiche, ho scandagliato a fondo la teoria della musica, più a fondo di quanto io stesso abbia potuto sperare, e questo lavoro è stato per me estremamente divertente. Sviluppando nelle loro differenti applicazioni le conseguenze di un principio generale esatto, si ha sempre a che fare con delle sorprese. Le conseguenze non procedono secondo il gusto dell'autore, ma secondo il loro proprio piacere ed io ho avuto spesso l'impressione che quello che facevo non era il mio lavoro, ma quello di un altro.

Non so se si tratti di coincidenza o altro, ma anni dopo, uno dei prestigiosi allievi di Helmholtz a Berlino, Heinrich Hertz⁽⁸⁾, ebbe a dire la stessa cosa a proposito della vita propria delle formule matematiche. Queste considerazioni di Helmholtz non sono isolate. Egli evidentemente rifletteva molto sulla teoria della conoscenza tanto che in proposito scrisse alcuni lavori risultando in qualche modo un precursore in campo epistemologico ([*Die Tatsachen in der Wahrnehmung, in Universitätsprogramm*](#), Berlin 1878). La domanda fondamentale che si poneva e che tutti oggi si pongono era: in che misura la descrizione interna che noi diamo in ambito fisico corrisponde al mondo esterno? Qui sorge una discrepanza con Kant che invece riteneva che le cose in sé sono inconoscibili. Anche la visione che i due avevano della matematica risulterà diversa, per Kant essa è una forma d'intuizione a priori, per Helmholtz essa, con riferimento particolare alla geometria, è anche un'acquisizione dell'esperienza. Un fisiologo-fisico ormai di fama entrava in discussioni che erano state di esclusiva competenza dei filosofi ma i filosofi non lo degnarono di alcuna attenzione, perdendo una delle ultime possibilità di avvicinarsi a comprendere il mondo e le problematiche della scienza. Anni dopo con ironia tornò sull'argomento, sostenendo che si dispiaceva di entrare in territori altrui ma che era convinto che nel mestiere del pensare il solo che può portare dei contributi utili è colui che ha fatto esperienze proprie (equi la polemica con Hegel continua con durezza, contro chi vuole costruire un mondo d'idee al quale la realtà fisica deve adattarsi). E nel 1875 scriverà:

Sono personalmente convinto che la filosofia non potrà manifestarsi con pienezza se non si applica seriamente e con zelo allo studio della conoscenza e dei metodi scientifici. Si tratta di un compito reale con piena giustificazione. Edificare delle ipotesi metafisiche corrisponde a fare dei versacci. Queste ricerche critiche devono essere fatte conoscendo innanzitutto la conoscenza esatta dei fenomeni che accompagnano le percezioni [...]. Nessuno sarebbe in grado di disconoscere che la filosofia

abbia avuto una frenata nella sua marcia, perché è rimasta esclusivamente nelle mani di uomini che hanno ricevuto un'istruzione letteraria e teologica e non ha ancora intrapreso la nuova strada suggerita dallo sviluppo possente delle scienze [...]. Credo che l'Università tedesca che avrà il coraggio per prima di chiamare ad una cattedra di filosofia uno scienziato che si occupi di filosofia, avrà grande riconoscimenti dalla scienza tedesca.



Helmholtz

Queste posizioni di Helmholtz erano fortificate dal suo forte impegno nello studio dei rapporti tra scienza e cultura. Egli era convinto della forte interdipendenza delle varie branche del sapere e della pedagogia della scuola superiore come ribadì in un discorso del 1869 al Congresso dei naturalisti tedeschi, *Über das Ziel die Fortschritte der Naturwissenschaft*.

Tornando alle ricerche di ottica ed acustica fisiologica, osserva Cappelletti: *Non v'era più dubbio sul fatto che l'organismo vivente fosse assimilabile ad un sistema fisico, in quanto s'erano trovati nell'uno e nell'altro [occhio ed orecchio] gli stessi comportamenti energetici, le stesse simmetrie geometriche.* Ed egli usò i suoi risultati per scrivere un articolo in lingua inglese, nel quale poteva affermare che ormai il vitalismo era morto. In un articolo scritto in inglese del 1861, *On the application of the Law of the Conservation of Force to Organic Nature* (*Proceedings of the Royan Institution*, III p. 347), dopo aver sostenuto che la sua è stata la «scoperta d'una legge generale che abbraccia tutte

le branche della fisica e della chimica» ed aver calcolato che il rendimento di una *macchina uomo* si aggira intorno al 25%, ebbe a scrivere:

Ancora all'inizio di questo secolo i fisiologi ritenevano che fosse il principio vitale la causa dei processi della vita [...]. La generazione d'oggi, al contrario, si adopera a scoprire le cause reali dei processi che avvengono nel corpo vivente. Oggi si ritiene che non vi siano altre differenze tra gli effetti chimici e meccanici dentro e fuori dell'organismo vivente, se non quelle che possono essere ricondotte alle più complesse circostanze e condizioni in cui tali effetti si verificano: e la legge di conservazione della forza rende legittima quest'ipotesi.

Siamo nel 1861, dopo che William Rankine (1820 - 1872) ha imposto il termine *energia*⁽⁹⁾ nel 1853, ed ecco che Helmholtz introduce le due espressioni,

25. Energy—Potential Energy. (A. M., 514, 517, 593, 660.)—*Energy means capacity for performing work, and is expressed, like work, by the product of a force into a space.*

The energy of an effort, sometimes called “potential energy” (to distinguish it from another form of energy to be afterwards referred to), is the product of the effort into the distance through which it is capable of acting. Thus, if a weight of 100 pounds be placed at an

36. Equality of Energy Exerted and Work Performed.—*When an effort actually does drive its point of application through a certain distance, energy to the amount of the product of the effort into that distance is said to be exerted; and the potential energy,*

or energy which remains capable of being exerted, is to that amount diminished.

When the energy is exerted in driving a machine at an uniform speed, it is equal to the work performed.

27. Various Factors of Energy.—*A quantity of energy, like a quantity of work, may be computed by multiplying either a force into a distance, or a statical moment into an angular motion, or the intensity of a pressure into a volume. These processes have already*

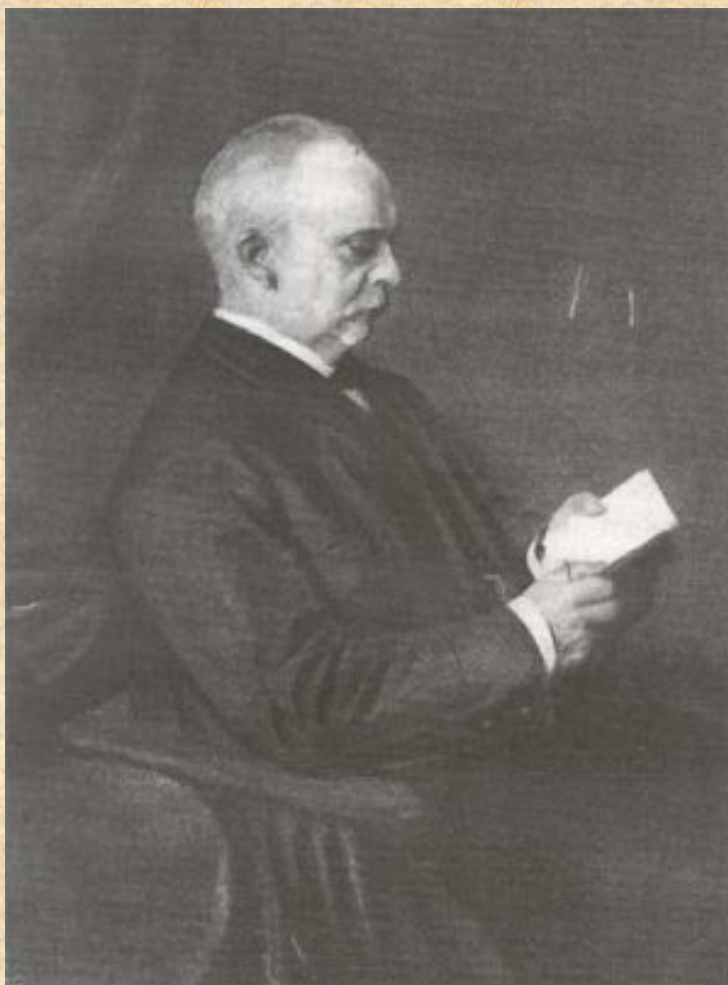
La definizione della parola *energia* a pagg. 32 e 33 del trattato di Rankine *A Manual of the Steam Engine and Other Prime Movers* del 1859 [nel secondo brano riportato il 36 sta per 26].

quella in uso e la nuova, in questo lavoro: parla di «conservazione dell'energia» accanto a «conservazione della forza». E spiega che accetta la proposta di Rankine perché chiarisce bene la sua memoria del 1847 nella quale egli non si riferiva all'intensità della forza, ma alla quantità totale delle forze naturali presenti nel sistema.



William Rankine

Nel 1858 e nel 1868 Helmholtz si cimentò con due grandi memorie dedicate allo studio dei vortici idrodinamici dei quali ricavò le equazioni differenziali⁽¹⁰⁾ Più tardi, nel 1888 e 1889, scriverà altre due memorie sulla dinamica dell'atmosfera⁽¹¹⁾. Queste quattro memorie sono alla base della nascita della meteorologia moderna.



Helmholtz

Ma in quegli anni, nel 1859, Helmholtz perse la moglie Olga von Velten con la quale era stato insieme dal 1849. Egli aveva accettato la sede di Heidelberg proprio per offrire alla moglie malata un clima migliore. Ma non ci fu nulla da fare, egli rimase solo con i due suoi figli anche se presto, nel 1861, si risposò con Anna von Mohl dalla quale ebbe tre figli.

Tornando ai lavori di Helmholtz vi è una osservazione che occorre fare. Il nostro lavorava con impegno e con successo in fisiologia ma ogni volta che gli si presentava l'occasione tornava con dedizione verso la fisica che era la sua vera e grande passione. Questa sua tendenza si accentuò negli ultimi anni della sua vita. Ma vediamo prima il suo contributo alla nascita delle geometrie non euclidee.

La ricerca di Helmholtz in geometria risale ancora alla sua memoria del 1847. In essa aveva tralasciato il corpo umano e questo aspetto lo aveva colmato. Restava una questione. Riporto alcuni brani che avevo già riportato:

*L'esistenza della materia in sé è, dunque, per noi, immota e priva di effetti; in essa distinguiamo la **distribuzione***

spaziale e la quantità (massa), che è posta come eternamente immutabile. [...] La materia in sé neppure, dunque, può subire altra trasformazione, che non sia spaziale: che non consista, cioè, in movimento. [...] Se noi immaginiamo che l'universo sia suddiviso in elementi dotati di qualità immutevoli, le uniche trasformazioni ancora possibili in un tal sistema sono spaziali cioè consistono in movimenti, e le condizioni esteriori, che possono modificare l'effetto delle forze, sono soltanto quelle spaziali: le forze, perciò, sono soltanto forze motrici, il cui effetto dipende soltanto dai rapporti spaziali. [...] Il moto è mutamento dei rapporti spaziali. Rapporti spaziali sono possibili soltanto rispetto a porzioni limitate di spazio, non rispetto allo spazio vuoto e privo di differenze.

In queste frasi che si trovano nell'introduzione di *Sulla conservazione della forza*, sono messe in gioco delle premesse che coinvolgono pesantemente uno spazio non meglio indagato ma dal contesto si intende essere quello euclideo e/o newtoniano. Helmholtz non doveva essere soddisfatto di aver fondato la sua memoria su un concetto così sfuggente o comunque poco definito. Fu così che a partire dal 1868 egli lavorò proprio sulla critica dei fondamenti della geometria (più tardi, a Berlino, avrebbe affrontato i problemi dei fondamenti della matematica). Scrisse in proposito due memorie ⁽¹²⁾. Le conclusioni che ne trasse furono oggetto di un discorso divulgativo che, nel 1870, Helmholtz rivolse all'Unione dei Docenti di Heidelberg, [*Ueber den Ursprung und die Bedeutung der geometrischen axiome*](#) (Sui fatti che stanno a fondamento della geometria). Nelle memorie e nel discorso Helmholtz tornò al problema delle misure spaziali che determinano il movimento affermando che ognuna di tali misure non è altro che una constatazione di congruenza, ma ogni dimostrazione di congruenza è un dato di fatto meramente empirico. Si tratta di muovere nello spazio delle linee senza che esse mutino di dimensione e forma. E' ciò sempre possibile o vi è qualcosa di non logicamente dimostrato? Sembra proprio di no (nel *discorso divulgativo* Helmholtz esemplificava con mondi piani o mondi sferici e pseudosferici: chi vive su tali mondi ha geometrie diverse da quella euclidea). Egli si ispirava ad una memoria di Bernhard Riemann (1826 - 1866), *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* (Sulle ipotesi che stanno a fondamento della geometria), scritta nel 1854 e pubblicata postuma nel 1868, il resoconto di una sua famosa lezione a Gottinga, incaricatagli da Gauss per la tesi d'accesso alla docenza (si noti subito che, dove Riemann parlava di *ipotesi*, Helmholtz correggeva con *fatti*). Questa breve e non tecnica memoria di Riemann è un caposaldo della storia



Bernhard Riemann

della scienza. In essa venivano presi in esame gli assunti fondanti della geometria e sviluppati principi utili per la creazione di nuovi tipi di spazio e quindi di [nuove geometrie](#) chiamate non-euclidee. In particolare egli, in lavori successivi, sviluppò una geometria differenziale, chiamata ellittica, più generale di quella euclidea (della quale la euclidea è un caso particolare). Introdusse nella geometria la *distanza differenziale* che relegava subito la metrica euclidea a caso particolare. Il segmento infinitesimo, costituente la *geodetica*, sostituiva il segmento euclideo. In luogo del quinto postulato di Euclide sulla sola parallela che si può tracciare da un punto esterno ad essa, egli ne pose altri due e cioè che la retta è una linea finita chiusa e che per un punto non passa alcuna parallela ad una retta data. La geometria di Riemann è costruita in riferimento a superfici a curvatura costante come, ad esempio, la sfera. Ebbene per capire la differenza tra le due geometrie si consideri quanto segue. Pensiamo una circonferenza tracciata su una sfera di raggio infinito: abbiamo una retta in senso euclideo. Riducendo il raggio di questa sfera ci troviamo nelle condizioni di Riemann ed una circonferenza su di una sfera di raggio finito è una retta nel senso di Riemann.

Helmholtz aveva letto questo lavoro e ne comprese l'enorme portata anche proprio per definire meglio il suo concetto di movimento nello

spazio. Dice Cappelletti:

Di là dalla presunta idea semplice dello spazio Helmholtz aveva intraveduto un'idea più semplice, più originaria e passibile di applicazioni diverse: l'idea d'una molteplicità coesistente. Da essa discendevano con pari legittimità l'idea di un universo spaziale e quella di un universo cromatico. L'universo spaziale, però, aveva cessato d'essere univoco per la scienza.

In definitiva diverse geometrie con metriche diverse da definirsi di volta in volta e quindi la coesistenza di esse al variare delle ipotesi assunte. Ed Helmholtz concordava con Riemann proprio nel riconoscere il carattere ipotetico dell'identificazione di un dato modello geometrico con lo spazio fisico. Si trattava dell'osservazione che le nostre facoltà geometriche dipendono dall'esistenza in natura di corpi rigidi e la geometria euclidea non è la sola compatibile con tali corpi e dell'ammissione dell'origine empirica e non a priori della geometria, in ciò in contrasto con quanto affermava Kant. E di conseguenza, mentre in Riemann vi erano *ipotesi*, in Helmholtz *fatti*. Egli rivendicava infatti l'insostituibilità della misura fisica come tramite tra le ipotesi ed il dato dell'esperienza. E con questa posizione portò il mondo della fisica all'interno di queste problematiche che furono estremamente feconde, in particolare con i lavori di Einstein.

Resterebbero da discutere gli ultimi lavori che Helmholtz fece ancora in fisica e particolarmente alcune memorie, del 1884 e soprattutto del 1886 (*Über die physikalischew Bedeutung des Princips der kleinsten Wirkung*, che integravano la *conservazione dell'energia* discutendo in modo approfondito del principio del minimo sforzo, ed altre tre memorie relative all'elettrodinamica, *Über die Theorie der Elektrodynamik*, scritte nel 1870 nel 1871 e nel 1874. Su queste ultime memorie, nelle quali Helmholtz affronterà il problema della compatibilità della teoria di Weber con la conservazione dell'energia, tornerò quando saremo arrivati a discutere di questi problemi. Per ora basti dire che, nella memoria del 1870, Helmholtz obiettava a Weber che la legge di forza che aveva trovato, nella quale le forze non solo dipendevano dalla distanza (forze centrali) ma anche dalla velocità ed accelerazione, avrebbe permesso un lavoro infinito a spese di un lavoro finito. Weber, per dare una risposta alle obiezioni di Helmholtz, mostrò nella sua memoria del 1871 (alla quale ho fatto già cenno) che per realizzare ciò che Helmholtz affermava le particelle costituenti la corrente (le due correnti di segno opposto, circolanti una in un verso e l'altra in verso opposto, come ipotizzava Weber) avrebbero dovuto

muoversi ad una velocità relative enorme, superiore alla costante c che rappresentava la velocità della luce (attenzione, c ancora non era velocità limite ed è d'interesse osservare che vi era un qualche indizio che la faceva diventare limite). Weber aggiunse a questa sua considerazione anche un'ipotesi che può sembrare sorprendente: le particelle elettriche non possiedono solo quantità di elettricità (carica) ma anche massa con la conseguenza che a determinate distanze (*distanza critica*) l'azione di repulsione tra cariche elettriche deve tramutarsi in attrazione e viceversa e Weber fornisce anche il valore di tale distanza⁽¹⁴⁾:

$$\frac{2}{c \cdot c} \cdot \frac{\varepsilon + \varepsilon'}{\varepsilon \cdot \varepsilon'} \cdot e \cdot e'$$

dove e ed e' sono le cariche elettriche, ε ed ε' sono le rispettive masse delle cariche e c è la costante di Weber. Ed è una davvero strana coincidenza che questa quantità corrisponda all'espressione che ci fornisce la classica espressione per il raggio dell'elettrone.

A parte ogni altra considerazione, a questo punto dello sviluppo di tali complicati problemi, quando Hertz aveva mostrato l'esistenza delle onde elettromagnetiche ipotizzate da Maxwell, Helmholtz ebbe a scrivere nella *Prefazione a I Principi della Meccanica* (Lipsia 1894) di Hertz:

tutte le teorie che si erano sviluppate intorno all'elettrodinamica, particolarmente quella di Weber ma anche quella di Coulomb, costituivano *una copiosa messe di ipotesi che era molto poco chiara nelle sue conseguenze ed imponeva, per la loro derivazione, calcoli complicati, scomposizione delle singole forze nelle loro diverse componenti direzionali e così via. In tal modo, il dominio dell'elettrodinamica si era trasformato in un impraticabile deserto.*

Alcune considerazioni devono essere fatte, in chiusura, sulle due memorie a carattere meccanico che tendevano ad ampliare la portata del principio di conservazione dell'energia. Si tratta di considerazioni di carattere generale perché le memorie sono estremamente tecniche e non è qui il caso di entrare in troppi dettagli.

Helmholtz si propose di indagare se il *principio di minima azione* era compatibile con la conservazione dell'energia. La minima azione era stata introdotta nel 1744 da Pierre-Louis Maupertuis ("*nel passare da*

*uno stato ad un altro, una massa sceglie quasi sempre, tra varie vie possibili e diverse, quella che richiede la minima azione") e studiato a fondo e completamente formalizzato dal matematico William Rowan Hamilton (1805 - 1865), nella memoria [On a General Method in Dynamics](#) (*Philosophical Transactions of the Royal Society, part II for 1834, pp. 247–308*) del 1834, con l'osservazione che tale memoria si occupava del problema solo a livello teorico indipendente dalla sua applicabilità a fenomeni fisici.*

A queste due memorie faceva esplicito riferimento Helmholtz per iniziare la discussione. Il principio di minima azione, spiegava Helmholtz nel 1886, prescrive l'evoluzione del sistema, portando le masse in movimento al termine della loro traiettoria attraverso cammini tali che la potenza somministrata sia minima. Il sistema seleziona, tra i processi possibili che potrebbero condurlo da uno stato ad un altro, quello attraverso il quale la differenza tra energia cinetica e potenziale abbia, durante il tragitto, il minore valore possibile. Helmholtz assegnò al principio di minima azione un profondo significato fisico. Osservò che i fenomeni che non mettono in gioco la struttura atomica della materia sono sempre reversibili, essendo la irreversibilità inerente a tutti i fenomeni nei quali gli atomi entrano in scena. La conservazione dell'energia è il gran principio che racchiude in sé la totalità dei processi fisici siano essi reversibili o irreversibili. Helmholtz si chiedeva se esiste una legge generale che si possa applicare ai fenomeni reversibili, separandoli dagli irreversibili e rispondeva che tale legge è il principio di minima azione (*"deve considerarsi altamente probabile che tale principio rappresenti la legge generale di tutti i processi reversibili della natura"*).

Questo grande della fisica e della cultura in genere si spense a Berlino a settembre del 1894.



**Il monumento ad Helmholtz nel
cortile della Humboldt Universität di
Berlino**

NOTE

(1) Come già accennato quando ho parlato di Mayer e Joule, il termine forza deve essere qui inteso come *energia*. Quest'ultima espressione sarà introdotta, proprio per evitare confusione, da Rankine nel 1860.

Quando riporterò passi della memoria di Helmholtz, più oltre, si capirà che in alcune circostanze il termine forza denota proprio la forza, in altre energia.

(2) Il riferimento è al lavoro di Joule *On the Existence of an equivalent relation between heat and the ordinary forms of mechanical power*, *Philosophical Magazine*, s. 3, XXVII, 1845, p. 205. IN tale memoria

Joule ricavava l'equivalente meccanico del calore da esperienze di attrito dell'acqua in tubi sottili.

(3) I gradi di libertà delle molecole (traslazionali, rotazionali e vibrazionali) furono ufficialmente introdotti da Clausius nel 1857 nella sua memoria *Ueber die Art der Bewegung, welche wir Wärme nennen*, pubblicata su *Annalen der Physik*, C, 1857. Si tratta del suo primo contributo alla teoria cinetica dei gas. Mi pare di poter dire che trasse ispirazione da questo passo di Helmholtz.

(4) Elaborata nella memoria *Note de M. Ampère sur la Chaleur et sur la lumière considérées comme résultant de mouvements vibratoires* (*Annales de Chimie et de Physique*, t. 58 - S. 2 -1835 - pagg. 434-444). In tale memoria Ampère chiama particella *una porzione infinitamente piccola di un corpo e della sua stessa natura, in modo che una particella di un corpo solido è solida, quelle di un liquido, liquida, e quelle di un gas, allo stato aeriforme*. E, continuando, questa particella è per lui composta dall'aggregazione di più molecole che sono *tenute a distanza: 1° de ciò che resta a questa distanza delle forze attrattive e repulsive proprie degli atomi; 2° dalla repulsione che stabilisce fra esse il movimento vibratorio dell'etere interposto; 3° dell'attrazione in ragione diretta alle masse ed inversa al quadrato delle distanze*. La molecola è poi *un insieme di atomi, forze attrattive e repulsive proprie di ogni atomo, forze che io ammetto essere talmente superiori alle precedenti, che quelle possono essere considerate in confronto come quasi impercettibili*, mentre gli atomi sono *i punti materiali da cui emanano queste forze attrattive e repulsive*.

(5) Secondo Young vi sono tre colori primari (rosso, verde, blu) dalla cui sovrapposizione si ottengono tutti gli altri. Fatto fondamentale è che questo tricromatismo è causato dalla fisiologia del sistema visivo, cioè dall'occhio, e non dalle proprietà della luce.

(6) La risonanza è un fenomeno che nasce in acustica ma è presente in qualunque sistema materiale in grado di vibrare. Data una corda (o qualunque altro sistema fisico) in grado di vibrare con una certa frequenza (frequenza propria), se essa è investita dall'esterno da un'onda di frequenza nettamente diversa, si comporta come un sistema rigido, non si accorge cioè dell'onda che la investe; ma se la frequenza propria e quella esterna, hanno la stessa frequenza, la corda entra in oscillazione raggiungendo in breve tempo notevole ampiezza, e rinforzando quindi il suono. Si dice allora che essa entra in "risonanza". Il risuonatore o risonatore è, come dirò nel testo, uno strumento in grado di misurare le frequenze. Senza ulteriori spiegazioni, osservo che

Helmholtz, nel 1877, realizzò un altro tipo molto più perfezionato di risonatore. Nel 1863, nella memoria *Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik*, Helmholtz ipotizzò che, nell'orecchio interno, il dispositivo che risuonava era l'organo di Corti.

(7) La legge di Ohm per l'acustica dice che un suono viene percepito dall'orecchio come un set formato da un dato numero di toni armonici puri. La legge fu ricavata da Ohm nella sua memoria *Ueber die Definition des Tones, nebst daran geknüpfter, Annalen der Physik*, 1843.

(8) Molti fisici di levatura eccezionale furono allievi di Helmholtz. Tra questi vi fu anche Max Planck che lasciò ritratti tanto irriverenti quanto affettuosi di Helmholtz. Leggiamo qualche passo:

Fu a Berlino che il mio orizzonte scientifico si aprì notevolmente sotto la guida di Hermann von Helmholtz e Gustav Kirchhoff, i cui allievi avevano ogni opportunità di seguire le loro attività di pionieri, conosciuti e osservati da tutto il mondo. Devo però confessare che le lezioni di questi uomini non mi giovarono molto. Era chiaro che Helmholtz non preparava le sue lezioni. Procedeva faticosamente, e interrompeva il discorso per cercare i dati che gli mancavano in un piccolo taccuino; inoltre sbagliava continuamente i calcoli alla lavagna, e avevamo tutti la netta impressione che fosse stufo di noi, almeno quanto noi di lui. Col passar del tempo, i suoi corsi erano sempre meno frequentati, e alla fine vi erano solo tre studenti: io ero uno dei tre, insieme con un amico, il futuro astronomo Rudolf Lehmann-Filhés. Kirchhoff era proprio l'opposto. Teneva sempre lezioni accuratamente preparate, ogni frase era ben costruita e collocata al giusto posto. Non una parola di meno, né una di troppo. Ma pareva che recitasse a memoria, secco e monotono. Ammiravamo lui, non quello che diceva. [...]

Nella primavera del 1889, dopo la morte di Kirchhoff, accettai l'invito, rivoltomi su raccomandazione della Facoltà di Filosofia di Berlino, di prendere il suo posto all'università, per insegnare fisica teorica. In un primo tempo fui professore straordinario, e dal 1892 professore ordinario. Questi furono gli anni di maggiore espansione del mio panorama scientifico e del mio modo di pensare.

Perché questa fu la prima volta che io venni a stretto contatto con i pionieri mondiali della ricerca scientifica in quei giorni, con Helmholtz soprattutto. Imparai anche a conoscere Helmholtz, e a rispettarlo come uomo non meno di come lo avevo sempre rispettato come scienziato. Per la sua personalità, onestà di convinzioni e modestia di carattere, egli era l'incarnazione stessa della dignità e della probità della scienza. Questi tratti del suo carattere erano rafforzati da una vera gentilezza umana, che mi toccò profondamente il cuore. Quando durante una conversazione mi guardava con quegli occhi calmi, penetranti, e tuttavia benigni, ero preso da un sentimento di illimitata fiducia e devozione filiale, e sentivo che potevo confidarmi senza riserve, sapendo che sarebbe stato un giudice buono e tollerante. Una sua sola parola di approvazione, non dico di lode, mi avrebbe fatto felice più di qualunque trionfo.

Ebbi parecchie volte questa soddisfazione. Una volta fu quando mi ringraziò calorosamente dopo la mia commemorazione di Heinrich Hertz, che tenni alla Società di Fisica; un'altra quando mi espresse la sua approvazione per la mia teoria delle soluzioni chimiche, poco dopo la mia elezione all'Accademia prussiana delle Scienze. Porterò con me come un tesoro il ricordo di ognuno di questi momenti fino all'ultimo dei miei giorni.

(9) Il termine *energia* (*energheia* in greco vuol dire lavoro), in senso moderno, era già stato usato da Young nelle sue *Lectures on Natural Philosophy* del 1807. Egli scriveva:

Il vocabolo energia può essere applicato in modo molto appropriato al prodotto della massa o peso del corpo per il quadrato del numero che ne esprime la velocità... Questo prodotto è stato denominato forza viva o ascendente ... Alcuni lo hanno considerato la vera misura della quantità di moto; ma anche se questa tesi è stata rifiutata universalmente, la forza stimata in questo modo merita però una denominazione distinta. [citato da Elkana]

C'è da notare che il significato che viene assegnato all'energia è solo quello di energia cinetica ed in un contesto che non prevede alcun principio di conservazione. Inoltre, più oltre egli dirà che non esiste alcuna connessione tra il lavoro e la sua energia.

Un fugace uso del termine energia si ha in vari altri autori ma fu Rankine che impose l'uso del termine. Egli introdusse il termine *energia* già nel titolo di una sua memoria del 1853, *On the General Law of the Transformation of Energy* (Phil. Mag., 4, XXVIII, 1853, p. 106) letta alla Glasgow Philosophical Society. E' la prima volta che il termine è usato nel suo significato più generale, corrispondente all'uso che ne facciamo oggi.

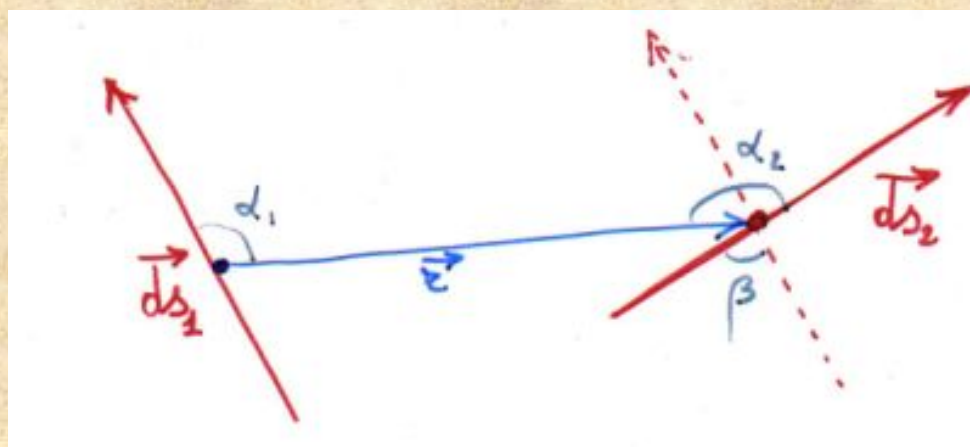
(10) *Über Integrale der hydrodynamischen Gleichungen, welche den Wirbelbewegungen entsprechen ed Über discontinuirliche Flüssigkeitsbewegungen.*

(11) *Über atmosphärische Bewegungen, 1888 e Über atmosphärische Bewegungen. Zweite Mittheilung. Zur Theorie von Wind und Wellen, 1889.*

(12) *Ueber die thatsächlichen Grundlagen der Geometrie* (Sui fatti che stanno a fondamento della geometria, *Verhandlungen des Naturhistorisch-Medizinischen Vereins zu Heidelberg*, 4, 1868, 197-202), e *Ueber die Thatsachen, die der Geometrie zu Grunde liegen* (*Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 9, 1868, 618-639).

(13) *Über die Hypothesen, welche der Geometrie zu Grunde liegen* ovvero: *Sulle ipotesi che sono a fondamento della geometria, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 13.

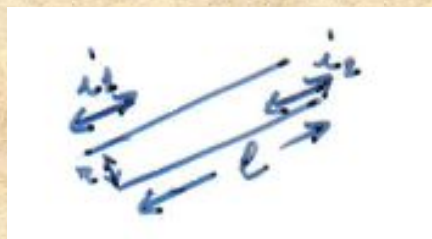
(14) Nell'indagare le azioni tra correnti, Ampère aveva presentato una legge di azione tra due fili rettilinei percorsi da corrente: la forza che si esercita tra due fili, percorsi dalle correnti i_1 ed i_2 , orientati come in figura:



nella forma:

$$\vec{f}_{1,2} = -\frac{\mu_0}{4\pi} i_1 \cdot i_2 \int_1 \int_2 \frac{(ds_1 \wedge \vec{r}) \wedge ds_2}{r^3}$$

e questa formula si riduce a quella elementarmente nota quando le due correnti sono parallele e rettilinee,



$$\vec{F}_{1,2} = \mp \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i_1 \cdot i_2}{r} \cdot \ell$$

Il programma di Ampère passò all'attenzione dei fisici tedeschi e particolarmente di W. Weber. Nella sua concezione una corrente elettrica è costituita da due flussi di uguale densità in verso opposto di cariche *statiche* rispettivamente positive e negative. Con tali ipotesi Weber ricavò, nel 1846, la legge elementare di Ampère da una legge di forza tra cariche, ancora più elementare di quella di Ampère:

$$F = \frac{e \cdot e'}{r \cdot r} \left(1 - \frac{1}{2c \cdot c} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{r}{c \cdot c} \cdot \frac{d^2 r}{dt^2} \right)$$

nella sesta memoria sull'argomento, quella del 1871, la legge di forza diventa:

$$F = \frac{e \cdot e'}{r \cdot r - \frac{r \cdot 2}{c \cdot c} \cdot \frac{\varepsilon + \varepsilon'}{\varepsilon \cdot \varepsilon'} \cdot e \cdot e'} \left(1 - \frac{1}{c \cdot c} \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{2rf}{c \cdot c} \right)$$

dove e ed e' sono le cariche elettriche, ε ed ε' sono le rispettive masse delle cariche (è questa una importante novità), r è la distanza tra le cariche, c è la costante di Weber,

$$\frac{dr}{dt} \quad \text{e} \quad \frac{d^2 r}{dt^2}$$

sono rispettivamente la velocità e l'accelerazione delle cariche. A parte qualche fattore numerico, la differenza tra le due leggi sta nel denominatore della seconda. In esso al prodotto rr è sottratta una quantità che è il prodotto di una r per una quantità che deve avere (ed ha) le dimensioni di una lunghezza. Questa quantità è la distanza critica della quale ho detto nel testo. Un'altra osservazione riguarda l'ultimo termine tra parentesi. In luogo dell'accelerazione d^2r/dt^2 compare ora la quantità f . Weber considera qui separatamente l'accelerazione delle particelle cariche dovuta alla loro mutua azione dall'accelerazione f dovuta ad altre cause. La legge di forza presentata è quindi indipendente dall'azione reciproca tra le particelle cariche. Scriveva Weber:

In the second place, another noteworthy result follows from this expression for the force—namely, that when the particles e and e' are of the same kind, they do not by any means always repel each other; thus when $dr^2/dt^2 < cc + 2rf$, they repel only so long as

$$r > \frac{2}{cc} \frac{\epsilon + \epsilon'}{\epsilon\epsilon'} ee'$$

and, on the contrary, they attract when

$$r < \frac{2}{cc} \frac{\epsilon + \epsilon'}{\epsilon\epsilon'} ee'$$

era dunque ben evidenziata la questione della distanza critica nel seguito della memoria si davano le condizioni per la distanza r in corrispondenza della quale non vi era attrazione ($r >$ distanza critica) e quella in corrispondenza della quale vi era attrazione ($r <$ distanza critica).

BIBLIOGRAFIA

- (1) AA. VV. - *Scienziati e Tecnologi dalle origini al 1875* - EST Mondadori 1975
- (2) Emilio Segrè - *Personaggi e scoperte nella fisica classica* - EST Mondadori 1983
- (3) Yehuda Elkana - *La scoperta della conservazione dell'energia* - Feltrinelli 1977

- (4) Thomas S. Khun - *La conservazione dell'energia come esempio di scoperta simultanea* - in: Thomas S. Kuhn - *La tensione essenziale* - Einaudi 1985
- (5) Wilhelm Ostwald - *Les Grands Hommes* - Flammarion, Paris 1912
- (6) Enrico Bellone - *Le leggi della termodinamica da Boyle a Boltzmann* - Loescher 1978
- (7) A. Baracca, A. Rossi - *Materia ed energia* - Feltrinelli 1978
- (8) Mario Gliozzi - *Storia della fisica* - in: N. Abbagnano (diretta da) - *Storia delle Scienze*, UTET 1965
- (9) René Taton (diretta da) - *Storia generale delle scienze* - Casini 1965
- (10) Friedrich Klemm - *Storia della tecnica* - Feltrinelli 1966
- (11) J.G. Crowter - *British Scientists of the Nineteenth Century* - Hesperides Press, 1935
- (12) C. Truesdell - *Essay in the History of Mechanics* - Springer-Verlag 1968
- (13) Kelvin - *Opere (a cura di Enrico Bellone)* - UTET 1971
- (14) Helmholtz - *Opere (a cura di Vincenzo Cappelletti)* - UTET 1967
- (15) Max Planck - *Autobiografia scientifica* - Einaudi 1956
- (16) H. Helmholtz - *Prefazione a "I Principi della Meccanica" di H. Hertz* - La Goliardica Pavese, 1996

[Torna alla pagina principale](#)



