

---

APPARECCHIO PER LA DETERMINAZIONE DELL'EQUIVALENTE MECCANICO DEL CALORE; DEL DOTT. ADOLFO BARTOLI, PROFESSORE DI FISICA NELL'ISTITUTO TECNICO DI FIRENZE.

La determinazione dell'equivalente meccanico del calore ha formato il soggetto di molte ricerche sperimentali da parte dei fisici. Ma dopo tanti studi siamo ancora incerti sul valore preciso che si deve assegnare a questo equivalente: mentre alcuni fondandosi sulle dirette esperienze del Joule ammettono 425 chilogrammetri all'incirca; altri invece, appoggiandosi su altre esperienze e con altre considerazioni tendono ad ammettere un valore assai superiore e segnatamente un valore prossimo a 433 (1).

(1) Compara, Rühlmann. *Handbuch der mechanischen Wärmetheorie*, Braunschweig, 1878. — Verdet. *Oeuvres*, T. VII ed VIII. — Hirn. *Théorie mécanique de la chaleur*, Parigi 1875. Nel Vol. I, pag. 115 a 118 è riportata la tavola pubblicata dalla Società di Fisica di Berlino, relativa ai valori dell'equivalente, ottenuti nelle determinazioni più meritevoli di fiducia, con l'aggiunta dei valori ottenuti dall'Hirn. — Duprè. *Th. mec. de la chaleur*, Parigi 1869, pag. 22. Vedi anche Wüllner. *Experimentalphysik*, Bd. III, s. 354, e Mousson. *Die Physik auf Grundlage der Erfahrung*, Bd. II, s. 94.

Ma quantunque i metodi adoperati fin qui per tali determinazioni, siano stati tanti, possiamo dire che pochi sono di tal natura da ispirare confidenza assoluta nei risultati ottenuti.

Nei metodi anche migliori fin qui adoperati la determinazione dello equivalente dipendeva da osservazioni alle quali per la natura del metodo bisognava far subire delle correzioni non insignificanti e non sempre molto esattamente determinabili, per cui possiamo dire con la certezza di non sbagliare, che se i valori già trovati non sono tanto discordi, ciò è da attribuire più che ad altro alla valentia degli sperimentatori, e un poco forse anche a questo, che conoscendosi dallo sperimentatore i limiti entro i quali esser deve compreso il valore dell'equivalente, serviva ciò di norma per accettarsi se nel metodo da lui adoperato fosse stato commesso qualche errore rilevante o per lo meno questa conoscenza faceva sì che lo sperimentatore non tenesse conto di quei risultati nei quali il valore dell'equivalente troppo si scostava dai limiti entro i quali conosceva dover esser compreso. E a conferma di ciò si può osservare che nelle prime determinazioni, quando si era molto più incerti che non oggi sul valore dell'equivalente, sperimentatori insigni e d'incontrastabile valentia, trovarono per questo equivalente valori differentissimi da quello che ora si ritiene più probabile. Nè ciò è da attribuirsi ad altro che alla difficoltà di tale determinazione, per la grandezza appunto del valore dell'equivalente meccanico del calore, per cui un piccolo errore di osservazione influisce sensibilmente sulla terza e qualche volta anche sulla seconda cifra significativa, come ne sarà persuaso facilmente chi con qualche attenzione abbia esaminati i processi delle determinazioni (anche di quelle accettate con maggior fiducia).

Perciò è da ritenere che un metodo esatto per determinare con tutta la precisione possibile il valore dell'equivalente meccanico del calore abbia da fondarsi, come quello del Joule ed altri pochi, sulla diretta trasformazione del lavoro in calore, eliminando così le incertezze che provengono dal calcolare il risultato finale per mezzo di valori intermedi

non sempre esattamente determinabili, i quali anche nel caso più favorevole sperimentato fin qui, lasciano campo a discussione sulla esattezza del risultato finale. E tanto più pregevole sarà il metodo, per determinare l'equivalente meccanico del calore, se i valori degli elementi necessari pel calcolo dell'equivalente, saranno presi direttamente dalla esperienza, senza far loro, subire correzione di sorta, od almeno solamente correzioni piccole ed esattamente determinabili.

Per tali ragioni io credo che non sia senza pregio il metodo che sono ora per descrivere e che fu da me adoperato in via di prova, in condizioni di certo non le più favorevoli non consentendomi di far meglio il locale e i mezzi di cui disponeva.

Il principio del metodo da me adoperato è il seguente:  
 « Una massa di mercurio esattamente determinata, con la  
 « cui pressione esattamente determinata, e con una tempe-  
 « ratura esattamente di 0°, passa per un tubo di acciaio di  
 « diametro interno così piccolo e di lunghezza tale che alla  
 « uscita la velocità sia sensibilmente nulla: la temperatura  
 « del tubo essendo pur mantenuta esattamente a zero gradi  
 « per mezzo di un involucro di ghiaccio a 0°; si determina  
 « la quantità di ghiaccio fuso e quindi anche la quantità di  
 « calore sviluppata ».

La fig. I (*Tav. I*) rappresenta l'apparecchio da me adoperato in queste esperienze.

Esso è formato da un prisma verticale di legno ABCDE a base quadrata, alto circa 8 metri, e grosso più due decimetri, incastrato solidamente nel pavimento, e fissato alle pareti per mezzo di tiranti di ferro; su questo prisma od asta è fissata invariabilmente una solida mensola B la quale sorregge una campana di vetro I capovolta di 20 centimetri (circa) di diametro; la campana è munita di una tubulatura che guarda in basso, alla quale è fissato con mastice un tubo di ferro di due centimetri di diametro interno; al tubo di ferro è validamente attaccato in *c* un tubo di gomma elastica di 18 millimetri di diametro interno: questo tubo è esterna-

mente rivestito di una guaina di cotone e rinforzata da una fasciatura fatta con nastro assai resistente: il tubo così fasciato può reggere per lunghissimo tempo a pressioni assai forti, anche di 7 od 8 atmosfere, senza perdere goccia di mercurio <sup>(1)</sup>: l'altro estremo del tubo di gomma è inserito in *s* sopra un tubo di ferro *s d e f*, lungo 180 centimetri, e di 20 millimetri di diametro interno, composto di due grosse canne da fucile riunite insieme in *e* per mezzo di viti e di cuoio: il tubo di ferro *s d e*, è unito al rubinetto *f* di acciaio a perfetta tenuta, munito di un foro di 18 millimetri di diametro: il rubinetto è riunito ad un recipiente di ferro *g* di forma sferica, della capacità di circa un litro; infine al recipiente *g* è innestato un tubo d'acciaio verticale *H* a pareti sottili (compatibilmente colla pressione che deve sostenere) di 18 millimetri di diametro interno, il quale termina con un tubo di acciaio capillare per il quale deve sgorgare il mercurio. Il diametro dei tubi *J c s d e g H* contenenti mercurio è così grande (mai inferiore a 18 millimetri) da potere esser sicuri che la totalità della pressione si esercitasse sul mercurio contenuto nel tubo capillare.

Il recipiente *g* è circondato da un grande vaso cilindrico *V*, che si riempie di neve ben pura quando si vuol fare l'esperienza; ne contiene una tal quantità che possa nell'inverno durare per qualche giorno almeno, senza bisogno di rinnovarla.

Il tubo *s d e* può scorrere verticalmente, guidato da cuscinetti *d* sorretti da una staffa di ferro *C d* solidamente fissata all'asta di legno *A C D E*. Tutto il sistema del tubo *s d e* del rubinetto *f*, e del recipiente *g* si appoggia ed è fissato con viti e con dadi al fondo del recipiente *V*, e forma un tutto che può sollevarsi od abbassarsi con una corsa di una

(1) L'impiego di questo tubo flessibile e ben resistente di gomma semplifica molto la costruzione dell'apparecchio: esso fu adoperato già nel 1874 dal chiarissimo Prof. E. Villari nelle sue esperienze „ *Sull'efflusso del mercurio per tubi di vetro di piccolo diametro* „ Nuovo Cimento, serie 2. T. XV. pag. 263, alle quali ebbi la ventura di assistere, essendo allora suo aiuto.

trentina di centimetri, per mezzo di una binda  $mn$  e di sei guide  $u, t, u', t'$ , (delle quali due non si vedono nella figura) scorrevoli sopra tre cilindri verticali di acciaio,  $u, t, u', t'$ , solidamente fissati all'asta  $ABCDE$ .

Il sollevarsi od abbassarsi del sistema  $sdefg$   $VH$  è reso possibile dalla flessibilità del tubo di gomma, il quale passa senza esser teso, sulla gola di 4 grandi carrucole situate in uno stesso piano verticale, per impedire che il tubo di gomma nei movimenti del sistema prenda delle piegature troppo sentite.

Sopra un banco solidamente fissato al suolo è un calorimetro Bunsen  $i$  <sup>(1)</sup>, circondato da un doppio vaso di zinco: il vaso esterno ha 45 cent. di diametro e 50 cent. di altezza: quello interno 23 cent. di diametro e 37 cent. di altezza: il vaso interno comunica con l'esterno per mezzo del fondo, che è munito di tanti piccoli fori dai quali può uscire l'acqua di fusione della neve che vi si colloca; nell'intervallo esistente fra i due vasi si colloca altra neve od anche ghiaccio; questa serve a difendere dal raggiamento il vaso interno, nel quale la neve si può nell'inverno conservare per molti giorni. Infine il vaso esterno  $G$  è ricoperto esternamente, come sul fondo, da una veste di feltro spesso un centimetro, come si usa pei calorimetri Berthelot <sup>(2)</sup>. Infine si può spostare la posizione del calorimetro sul banco, per mezzo di una vite  $op$  e di una manovella  $oq$ .

La figura (III) indica la disposizione del tubo capillare di acciaio  $abcde$  con dimensioni più grandi di quelle da me adoperate: la parte  $ab$  per la quale comunicava col resto dell'apparecchio, era stata slargata internamente, per modo che il mercurio non incontrasse resistenza sensibile che un po' al di sotto del punto  $b$ : le pareti del tubo  $bcd$   $e$  erano state ridotte le più sottili possibili.

(1) Bunsen. *Pogg. Ann.* CXLI, pag. 1, e *Bibl. Un. de Genève*, 1871, T. 40, pag. 25. Vedi anche A. Schuller e V. Wartha. *Annal. de Phys und Chemie*. N. F, II, s. 359.

(2) Berthelot. *Essai de mécanique chimique*. T. I, pag. 140. (Parigi 1879).

Il tubo *abcde* era collegato al recipiente *g* per mezzo del tubo *glk* nella maniera che è indicata nella fig. II: si poteva impedire l'uscita del mercurio dal tubo capillare, serrando fortemente l'estremità del tubo stesso per mezzo dell'asta *lm* che in *m* portava un dischettino di cuoio; si agiva sopra quest'asta per mezzo di una leva *efi* mobile intorno ad un asse orizzontale *p*: premendo in *i*, o mantenendovi un peso si impediva lo sgorgo del mercurio. Quando invece si voleva lasciare uscire il mercurio si toglieva il peso in *i* e si girava di 90 gradi la leva *efpi*, nel senso indicato dalla freccia.

Fu necessario ricorrere a questo sistema di chiusura, non bastando il solo rubinetto V, a fare cessare del tutto lo sgorgo del mercurio, col chiuderlo: invece il mercurio continuava a uscire, quantunque più lentamente, ancora per qualche minuto: mentre che col sistema indicato si poteva far cessare istantaneamente l'uscita del mercurio.

Il mercurio sgorgato dal tubo capillare di acciaio si veniva a raccogliere in una piccola provetta di ferro ben lucida e sottile il maggiormente possibile, la quale era sostenuta per mezzo di tre fili di seta nell'interno del serbatoio del calorimetro Bunsen, e precisamente in quella parte del serbatoio *lm* che penetra dentro il calorimetro *i*: nello spazio fra la provetta e il serbatoio *lm* si versava dell'acqua stillata, la quale serviva come nelle esperienze del Bunsen a trasmettere il calore dalla provetta al calorimetro.

La capacità della provetta era tale che avrebbe potuto contenere 300 grammi di mercurio.

Durante l'esperienza la provetta conteneva il tubo capillare d'acciaio *abcde* (fig. III) e per un'altezza quasi uguale il tubo più grande al quale esso era fissato: al principio della esperienza si collocava nella provetta tanto mercurio in modo che l'estremo del tubo capillare ne toccasse la superficie.

Per preparare una esperienza si riempiva di mercurio ben puro e perfettamente asciutto l'apparecchio *Icsdeg*, versandolo nella campana I; e ci si assicurava che nell'apparecchio non era rimasta aria; si riempiva di neve il vaso V,

e girando la binda si abbassava il sistema finchè il tubo H con la parte più bassa toccando il fondo della provetta di ferro immersa nel serbatoio del calorimetro, incominciasse a tendere i fili di seta per i quali esso era sospeso. In tale posizione il cilindro  $xy$  (*fig. II*) serviva a chiudere in alto, per mezzo di cuoi e a proteggere lateralmente il recipiente del calorimetro: si colmava allora di neve tutto lo spazio dove poteva esser collocata in maniera che il vaso V e quello G formassero tutto un corpo alla temperatura della neve fondente: si aspettavano allora alcune ore o bisognando anche un giorno finchè l'indice del calorimetro Bunsen non si spostasse affatto, durante un'ora, o almeno finchè si spostasse il meno possibile: allora si osservava di 15 in 15 minuti primi la posizione dell'indice: continuate per molte ore queste osservazioni, ed osservato che il cammino dell'indice era piccolissimo e perfettamente regolare, si apriva il rubinetto  $f$ , si toglieva il peso K e si faceva ruotare la leva  $fi$  (*fig. II*) di  $90^\circ$  nel senso della freccia: e così il mercurio passava attraverso il tubo capillare  $abcde$  (*fig. III*). Avendo determinata precedentemente la quantità di mercurio sgorgata in un'ora, si conosceva esattamente il numero di minuti occorrenti, perchè sgorgassero 100 oppure 150 grammi di mercurio: questo tempo doveva essere piuttosto grande acciò fosse piccolissima la velocità d'uscita del mercurio, ma non tanto grande, perchè non si rendessero molto sensibili le correzioni dovute allo spostamento dell'indice del calorimetro, durante quel tempo. Nelle condizioni in cui sperimentava, la durata di efflusso più conveniente era da 15 a 30 primi. Dopo tal tempo chiudeva l'uscita del mercurio, girando in senso contrario della freccia, la leva  $fi$  (*fig. II*) e caricandola di un peso, seguitava a leggere la posizione dell'indice del calorimetro che continuava a retrocedere regolarmente ancora per qualche tempo, passato il quale (15 a 30') l'indice rimaneva perfettamente immobile, e di lì a poco riprendeva il solito movimento lentissimo e regolare che aveva a principio dell'esperienza. Questi lentissimi spostamenti dell'indice del calorimetro, furono assai diligente-

mente indicati dal Bunsen stesso (\*) a me fu impossibile evitarli, quantunque io adoperassi della neve ben pura della quale aveva fatta provvista in grandi casse di legno, subito dopo caduta. Devo aggiungere che la passata stagione d'inverno fu assai adatta per queste esperienze

Infatti la temperatura dell'ambiente dove faceva le esperienze era di pochi decimi di gradi o al più di un grado superiore a zero.

Coll'apparecchio che io ho brevemente descritto io poteva valutare esattamente con un errore di certo non superiore a un decimo di millimetro, la pressione del mercurio: errore questo piccolissimo se si osserva che questa pressione era circa sette metri, (ossia inferiore a  $\frac{0,2}{7000} - \frac{1}{35000}$ ).

Il mercurio uscito (circa 150 grammi) si poteva pesare con grande esattezza, con un errore di certo inferiore a 5 milligrammi, ossia con un errore relativo inferiore a  $\frac{5}{150.000}$ .

Infine la quantità di calore svolta in tali condizioni si poteva misurare con un errore che credo inferiore a  $\frac{1}{560}$ : difatti lo spostamento dell'indice del mercurio era in media 56 millimetri e si potevano con tutta sicurezza misurare i decimi ed anche i ventesimi di millimetro, per mezzo di un microscopio.

Vero è che alle misure di pressione e di calore sviluppato erano da fare alcune correzioni che ora indicherò.

Infatti la pressione  $H$  misurata a principio della esperienza, non rimaneva rigorosamente invariata durante l'esperienza: il mercurio si abbassava nella campana I mentre il livello si sollevava, nel serbatoio di ferro contenuto nel calorimetro. Ma si poteva facilmente conoscere la differenza di livello  $h$  espressa in metri, fra il mercurio della campana I e quello del serbatoio di ferro, dopo un numero  $t$  di secondi contati dall'istante nel quale si lasciava uscire il mercurio. Chiamata  $s$  la sezione della campana,  $\sigma$  quella del serbatoio

(1) Bunsen l. c.



di ferro, misurata in decimetri quadri,  $H$  la differenza di livello (misurata in metri) al principio della esperienza,  $\alpha$  il peso del mercurio (in chilogrammi) uscito in un secondo e  $\Delta$  il peso specifico del mercurio a zero gradi, si aveva

$$h = H - \frac{\alpha}{10 \Delta} \left( \frac{1}{s} + \frac{1}{\sigma} \right) t$$

e se  $\theta$  indicava la durata della esperienza e  $P$  il peso totale del mercurio uscito; la misura del lavoro meccanico, espressa in chilogrammetri, era

$$\int_0^\theta \left[ H - \frac{\alpha}{10 \Delta} \left( \frac{1}{s} + \frac{1}{\sigma} \right) t \right] \alpha dt = HP - \frac{P^2}{20 \Delta} \left( \frac{1}{s} + \frac{1}{\sigma} \right)$$

Il lavoro convertito in calore era dunque esattamente determinabile, potendosi conoscere esattamente  $H$ ,  $P$ ,  $\Delta$ ,  $s$ ,  $\sigma$ ; inoltre il termine correttivo  $\frac{P^2}{20 \Delta} \left( \frac{1}{s} + \frac{1}{\sigma} \right)$  era relativamente assai piccolo ed esattamente calcolabile ( $s$  era circa 3 decimetri quadri, e  $\sigma$  circa 0,07 decimetri quadri, mentre  $H$  era circa 7 metri). Altra correzione era da fare per la differenza tra la pressione atmosferica esistente al livello del mercurio nella campana, e quella al livello del mercurio nel tubo di ferro contenuto nel calorimetro: questa correzione poteva farsi facilmente conoscendo questa differenza di livello; questa correzione però era piccolissima. Altra correzione era da fare relativamente alla densità del mercurio contenuto nel tubo, non essendo zero la temperatura in tutta l'altezza del manometro: questa correzione però era trascurabile, avendo sperimentato nell'inverno, in un ambiente la cui temperatura non eccedette mai un grado sopra zero.

Alle osservazioni calorimetriche occorre pure apportare qualche correzione, aggiungendo cioè alla deviazione dell'indice di mercurio la media dello spostamento che in ugual tempo subiva l'indice di mercurio del calorimetro Bunsen, un po' avanti e un po' dopo l'esperienza. Questa correzione risultò pure assai piccola; non fu mai superiore al centesimo dello

spostamento dell'indice del calorimetro, durante l'esperienza. Io non aggiungerò altro relativamente alle misure calorimetriche, perchè non mi sono scostato da quel che ne dice il Bunsen (loco citato) nella sua classica memoria (1).

Col metodo precedentemente indicato ho eseguito 12 esperienze in buone condizioni: il valore dell'equivalente meccanico dedotto da queste esperienze fu assai concorde: infatti il numero più elevato fu

430,2 chilogrammetri

ed il più basso

426,8 chilogrammetri

e il valore medio

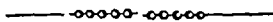
428,40 chilogrammetri

le determinazioni essendo fondate su spostamenti dell'indice calorimetrico, di circa 56 millimetri, sperimentando con una pressione di circa 7 metri di mercurio e facendo passare circa 0,15 chilogrammi di mercurio in trenta primi. Non riporto per intiero i dati relativi a queste determinazioni perchè qui io mi proponeva soltanto di far conoscere il nuovo apparecchio e i pregi che a parer mio gli vanno uniti: però i pochi risultati da me ottenuti mi hanno persuaso, che quando si sperimentasse con pressioni più forti (e di certo nessuna difficoltà insormontabile vi ha a portare la pressione a 4 o 5 volte o più) quella da me adoperata, si potrebbero rendere piccolissime e perfettamente trascurabili le correzioni ai risultati delle esperienze, e si potrebbe insieme rendere tanto sensibile il riscaldamento del mercurio, da poterlo misurare direttamente non più con apparecchi squisita-

(1) Il calorimetro che più sovente fu da me adoperato era scelto fra altri sei costruiti dal Geissler; il tubo capillare era quasi esattamente calibrato. Ne determinai col mercurio la capacità centimetro per centimetro, con pesate esatte sino al decimo del milligrammo. La graduazione del calorimetro in unità di calore, dedotta dalla sezione del tubo e dalla densità del ghiaccio a 0° fu confrontata con quella che trovai sperimentalmente col metodo che indica il Bunsen (Memoria citata) adoperato ancora dai signori Schuller e Wartha.

mente sensibili come il calorimetro Bunsen, ma anche con un calorimetro di precisione come quello del Berthelot (\*). È ciò che mi propongo di fare nell'inverno venturo se ne avrò i mezzi e se questo lavoro incontrerà l'approvazione dei fisici (\*).

Firenze, 30 Maggio 1880.



(1) Nelle condizioni in cui ho sperimentato, l'aumento  $t$  di temperatura del mercurio, supponendo che tutto il calore svolto serva a riscaldare il mercurio uscito, è dato da

$$t = \frac{H}{CE},$$

dove  $H$  è la pressione espressa in metri di mercurio a 0°,  $C$  il calorico specifico ordinario del mercurio a 0°, ed  $E$  l'equivalente meccanico della caloria, espresso in chilogrammetri. Supposto  $H = 30$  (pressione che è possibile realizzare) si ottiene  $t = 2^{\circ},3$  circa: Il riscaldamento sarebbe dunque tanto considerevole da poterlo misurare direttamente.

(2) Il rubinetto di acciaio a perfetta tenuta, fu costruito dal sig. L. Giusti meccanico del Gabinetto di Fisica dell'Università di Bologna, sul modello di un altro fatto costruire anni addietro dal chiariss. Prof. E. Villari. I tubi di acciaio capillari mi furon procurati di Germania, per mezzo del sig. Wallach di Cassel. I calorimetri Bunsen erano stati costruiti dal fu Dott. H. Geissler di Bonn. Il rimanente dell'apparecchio fu costruito dal sig. R. Turchini meccanico di questo Gabinetto di Fisica. L'apparecchio completo venne a costare circa mille lire. È inutile aggiungere che la montatura dell'apparecchio e le esperienze preliminari richiesero lungo tempo e moltissima pazienza. Le misure dell'altezza, e così pure quelle di peso furono ottenute riferendosi rispettivamente ad un buon metro campione, o ad un buon chilogrammo campione, costruiti dal Delenil e verificati scrupolosamente. Per quel che riguarda le misure calorimetriche dirò soltanto che prima d'intraprendere queste determinazioni, misurai parecchie volte col calorimetro Bunsen già graduato, i calorici specifici medii fra 0 e +100° di due campioni di oro e di argento chimicamente puri, che io mi era procurato per le mie esperienze sulle elettrolisi. Ottenui per questi due metalli dei numeri molto vicini a quelli trovati dal Regnault ec. Per abituarli all'uso del calorimetro Bunsen cercai pure di determinare il calorico specifico medio fra 0° e +35° circa, di soluzioni di alcool assoluto nell'acqua, e il liquido era contenuto in ampolline di vetro zavorrate con una spirulina di platino esattamente pesata. Forse un giorno ne pubblicherò i risultati. Devo aggiungere ancora che le determinazioni dell'equivalente meccanico furono eseguite con due differenti calorimetri Bunsen; uno di questi essendosi rotto pochi giorni dopo preparato, L'altro calorimetro invece poté durare per lungo tempo ed è ancora sano e buono a servire per altre determinazioni, appena le condizioni di temperatura lo permetteranno.