

# Concezioni Inadatte all'Insegnamento della Fisica

Friedrich Herrmann, Georg Job

Traduzione italiana di Corrado Agnes e Alexander Bichler  
di alcuni articoli apparsi sulla rivista  
*Praxis der Naturwissenschaften - Physik in der Schule*  
nella rubrica  
*Altlasten der Physik*  
ottobre 2008



## Indice

Introduzione.....	5
1 Forme di energia.....	7
2 Energia pura.....	9
3 L'equivalenza di massa ed energia.....	11
4 La potenza.....	13
5 Leggi di conservazione.....	15
6 Le costanti del moto.....	17
7 Sistemi isolati.....	19
8 La conservazione dell'energia.....	21
9 Il linguaggio che nasconde.....	23
10 Il linguaggio preciso degli specialisti.....	25
11 Orologi al quarzo e contatori Geiger.....	27
12 Azione a distanza.....	29
13 Le leggi di Newton.....	31
14 Equilibrio delle forze e terza legge di Newton.....	33
15 Le forze apparenti.....	35
16 Forza ed energia.....	37
17 Pressione e forza.....	39
18 Campi di forza.....	41
19 La forza di richiamo.....	45
20 Frequenza propria e frequenza di risonanza.....	47
21 Differenze di fase nelle oscillazioni forzate.....	49
22 La pressione dinamica.....	53
23 Perché volano gli aeroplani.....	55
24 Scale provvisorie di temperatura.....	57
25 La dilatazione termica.....	59
26 L'equivalenza tra calore e lavoro.....	61
27 Grandezze di stato.....	63
28 Entropia.....	65
29 Microscopico e macroscopico.....	67
30 Calore ed energia interna.....	69
31 Misura dell'entropia.....	71
32 La tendenza verso il minimo dell'energia.....	73
33 Il degrado dell'energia.....	75
34 Il rendimento di Carnot.....	77
35 Rendimento e fattore di Carnot.....	79
36 Capacità termica e quantità di calore.....	81
37 Evaporare e bollire.....	83
38 Il terzo principio della termodinamica.....	85
39 Entropia negativa e negentropia.....	87

40 Entropia e organismi viventi.....	91
41 Radiazione termica.....	93
42 Clima marittimo e calore specifico dell'acqua.....	97
43 La trasmissione del calore attraverso l'atmosfera.....	99
44 Stratificazione in temperatura dell'atmosfera.....	103
45 Stelle cadenti e capsule spaziali.....	105
46 Il Sole e le lampade spettrali.....	109
47 I molti nomi dell'equazione dei gas.....	113
48 Energia chimica.....	115
49 Il potenziale chimico.....	117
50 La costante di Avogadro.....	119
51 Due tipi di carica elettrica.....	121
52 La convenzione sulla direzione della corrente.....	123
53 La capacità elettrica.....	125
54 Il campo come regione di spazio con proprietà.....	127
55 Superfici equipotenziali.....	129
56 Poli magnetici.....	131
57 La lente condensatrice.....	133
58 Amplificatori.....	135
59 Coerenza.....	137
60 Il principio di Huygens.....	141
61 I colori fondamentali e lo spazio tridimensionale dei colori.....	143
62 L'etere e il vuoto.....	145
63 Indistinguibilità delle particelle.....	147

## Introduzione

La scienza è in uno stato di continua crescita. In un certo modo il suo sviluppo è simile a quello dei sistemi biologici. Tutti quelli che imparano e poi insegnano la scienza assimilano dei fatti e li trasmettono mutati. Perché mutati?

- Perché la trasmissione non è sempre priva di disturbi,
- perché la rilevanza delle domande si sposta nel tempo,
- perché la ricerca fornisce continuamente nuove conoscenze.

L'obbligo di essere efficaci nelle applicazioni fa in modo che gli errori vengano eliminati, le strutture non necessarie smontate e scomposte, mentre vengono invece favorite le impostazioni che fanno risparmiare lavoro.

Già da tanto il sapere scientifico si è così accresciuto che può essere posseduto solo applicando il principio della divisione del lavoro. Un ricercatore puro o applicato quasi sempre conosce esattamente solo una piccola parte, mentre del resto ha solo una visione d'insieme. Chi insegna le conoscenze di base non ha più la possibilità di provarne criticamente l'attualità e migliorarle. Le conoscenze di base non sono sottoposte alla stessa pressione selettiva. Le novità si aggiungono al bagaglio delle precedenti conoscenze senza toccarne il vecchio nucleo, un fenomeno che nella teoria dell'evoluzione viene chiamato prolungamento. Ciascun cambiamento rappresenta un forte dispendio, al punto che le resistenze diventano sempre più forti, mentre la spinta verso il cambiamento diventa sempre più debole. Più un sistema è complicato, più diventa conservatore.

Una conseguenza di questo è che quello che viene considerato come il bagaglio di conoscenze di base di una disciplina ne rispecchia lo sviluppo storico. Ogni studente segue più o meno lo sviluppo storico. Il processo di imparare del singolo individuo si svolge, spesso fin nei dettagli, secondo uno schema simile al processo di sviluppo dell'intera scienza naturale. Questo ci ricorda la fondamentale legge biogenetica di *E. Haeckel*, secondo la quale lo sviluppo individuale di un organismo vivente comprende una breve ripetizione della storia della sua specie. Si possono perfino mantenere deviazioni e prodotti che in un contesto più ampio si dimostrano superflui e svantaggiosi, e restarci tenacemente attaccati. Vecchi stadi intermedi sono riusciti a durare fino ad adesso, come fossili viventi, e anche errori evidenti hanno potuto sopravvivere decine di anni, poiché il flusso eccessivo di notizie rende inefficace la reazione critica ad essi. Ci vuole particolare attenzione per individuare tali concetti obsoleti, e sforzi ancora maggiori sono necessari per eliminarli. L'abitudine di molti anni vela lo sguardo, pregiudizi superficiali e l'integrazione in una struttura cresciuta a dismisura paralizzano la disponibilità a cambiare qualcosa.

Noi vogliamo, con una serie di brevi interventi, attirare l'attenzione su qualcuno di questi concetti obsoleti e inadatti all'insegnamento, che nel seguito chiameremo "Altlasten" /1/ .

Ci sono Altlasten di natura molto diversa: più grandi e più piccoli, molto vecchi e altri appena nati. Ci sono Altlasten che si basano sull'imperizia della scelta di una sola parola, e altri che riguardano concetti fondamentali della nostra visione scientifica del mondo. Qualche argomento è diventato uno degli Altlasten a causa del cambiamento delle nostre impostazioni sui fondamenti della fisica, mentre altri soltanto perché sono cambiate le possibilità della tecnica sperimentale.

Daremo a tutti gli articoli la stessa struttura. Per prima cosa viene indicato il *tema* trattato. Quindi vengono analizzati i *difetti* della presentazione tradizionale. Quando possibile viene detto qualcosa sulla formazione e l'*origine* del problema didattico, e infine si danno consigli per la sua *eliminazione*.

In qualche articolo metteremo decisamente in discussione le comuni impostazioni didattiche. Sicuramente alcuni lettori non saranno d'accordo nel classificare l'uno o l'altro dei temi come uno degli Altlasten. Sicuramente è una questione discrezionale classificare un certo contenuto didattico come superfluo o espresso in modo maldestro, e ciò dipende dal quadro in cui si inserirà e dalle aspettative sul suo futuro sviluppo. Non ci aspettiamo che ogni lettore giudichi come noi, e d'altra parte avendo privilegiato la brevità degli articoli, le nostre argomentazioni non potranno risultare convincenti in ogni punto per tutti.

Importante per noi è mettere in moto una discussione sull'attuale adeguatezza dei comuni contenuti didattici, e stimolare possibilmente molti a cercare da sé altri Altlasten.

*Friedrich Herrmann*

*Georg Job*

/1/ NdT: questo termine, entrato in uso durante lo smantellamento dei residui industriali inquinanti della DDR (Repubblica Democratica Tedesca), è molto difficile da tradurre, e la nostra scelta è quella posta a titolo di questa raccolta.

## Forme di energia

### *Tema:*

L'idea che l'energia esista in varie forme è comune e diffusa. Calore, energia cinetica e potenziale, energia elettrica e chimica sono esempi noti a chiunque; “trasformare una forma di energia in un'altra” è un modo di dire comune.

### *Difetti:*

Anche se parlare di forme di energia è naturale, le difficoltà cominciano non appena cerchiamo di definirle. Non applichiamo con coerenza la necessaria distinzione tra forme di esistenza e forme di scambio dell'energia, ma al contrario nelle nostre formulazioni casuali abbiamo la tendenza ad identificare i due concetti. Mentre sono state stabilite alcune regole per il calore e molti tipi di lavoro, la classificazione delle forme di esistenza dell'energia sembra vaga e arbitraria, se si escludono alcuni esempi meccanici da libro di testo. Quale parte dell'energia di una molla di acciaio o di una molecola d'aria è meccanica, termica, chimica, elettrica o magnetica? Quale parte è di traslazione, di rotazione o di oscillazione? Quale parte è cinetica o potenziale? Quale parte è ordinata e quale disordinata? Il fatto di ottenere risultati ragionevoli senza conoscere la risposta a queste domande ci porta alla conclusione che la classificazione in forme di energia non ha importanza nelle considerazioni di fisica.

### *Origine:*

Per tenere conto del ruolo dell'energia nel complesso dei fenomeni fisici è quasi impossibile evitare questo modo di esprimersi specificando le forme di energia. Questo è evidente nella seguente citazione da *F. Mohr* (1837) in tempi precedenti alla scoperta della conservazione dell'energia: “*Oltre ai 54 elementi chimici conosciuti esiste in natura anche un altro agente che si chiama 'forza': a seconda delle circostanze, essa appare come movimento, affinità chimica, coesione, elettricità, luce, calore e magnetismo, e da ciascuna di queste forme in cui compare, tutte le altre ne possono derivare la propria esistenza.*”

### *Eliminazione:*

Si risparmiino molte parole astenendosi da distinzioni inutili. È comodo parlare di latte in bottiglia e di latte nelle confezioni di plastica. È completamente inutile tuttavia chiamare il processo di trasferirlo o il semplice berlo “trasformazione del latte”, o definire il contenuto di un bicchiere o dello stomaco come differenti “forme di latte”. La situazione è identica quando parliamo dell'energia. La soluzione più chiara, ma forse non la più confortevole, è quella di astenersi del tutto dal parlare di forme dell'energia. Naturalmente ci vuole tempo. Come accade al paziente che dopo una lunga convalescenza per la prima volta fa a meno delle grucce, non sarà facile abituarsi alla riacquistata libertà, ed essere in grado di procedere anche su terreni difficili.

*Georg Job*



## Energia pura

### *Tema:*

Nei libri di testo e nelle riviste scientifiche spesso si trovano affermazioni secondo le quali la radiazione elettromagnetica sarebbe pura energia, come per esempio nella seguente formulazione: “Quando un positrone incontra un elettrone, le due particelle si annichilano reciprocamente generando pura energia sotto forma di radiazione gamma” /1/. Oppure come in un altro esempio: “Una particella massiva e la sua antiparticella possono mutuamente annichilarsi, così da creare energia, e viceversa una tale coppia può venir nuovamente generata dall’energia” /2/. Un’analoga opinione viene espressa nella seguente formulazione: “... la luce può venir descritta anche per mezzo dei fotoni, quanti di energia emessi in modo discreto” /3/.

### *Difetti:*

Ovviamente le onde elettromagnetiche non sono pura energia. Il campo elettromagnetico è un sistema fisico, cioè un oggetto, per il quale tutte le variabili fisiche standard hanno determinati valori, e non soltanto l’energia.

Così oltre all’energia hanno, in generale, per il campo elettromagnetico valori diversi da zero anche le grandezze estensive quantità di moto, momento angolare ed entropia. (La carica elettrica è, al contrario, uguale a zero per tutti gli stati del campo). Ma anche le grandezze intensive hanno, esattamente come per altri sistemi, determinati valori. Così il campo elettromagnetico ha in ogni punto una determinata pressione (la pressione dipende dalla direzione, ed è quindi un tensore). In particolari stati, cioè gli stati noti con il nome di radiazione termica, il campo ha anche un valore preciso di temperatura e di potenziale chimico.

Identificare la radiazione con una sola delle grandezze fisiche è semplicemente scorretto. La radiazione è un sistema fisico che ci è stato dato dalla natura. Le grandezze fisiche sono, al contrario, prodotti dello spirito umano. Esse sono strumenti per la descrizione dei sistemi.

Anche un fotone, la porzione elementare del sistema “campo elettromagnetico” non è quindi solo un quanto di energia. Il fotone trasporta insieme all’energia altre grandezze estensive, ad esempio quantità di moto e momento angolare.

Spesso la confusione tra le idee di “grandezza” e di “sistema” si manifesta anche in un altro modo, in cui energia e materia vengono palesemente rappresentate come due tipi equivalenti di “sostanze” esistenti in natura: “Quindi se tutte le galassie si allontanano l’una dall’altra [...], appare logico che esse in passato fossero concentrate in un denso mare di materia ed energia” /4/.

### *Origine:*

Probabilmente ci sono due cause per la falsa identificazione della grandezza “energia” con il sistema “campo elettromagnetico”. Da un lato all’inizio si è probabilmente visto nell’energia qualche cosa di più che una semplice grandezza, dall’altro però non si è nemmeno preso sul serio il campo elettromagnetico come sistema fisico.

Dopo l'introduzione dell'energia verso la metà del secolo scorso, venne rapidamente riconosciuta la sua ampia importanza nelle scienze naturali. L'entusiasmo al riguardo, l'aver trovato una grandezza di così grande portata, condusse però anche ad una sopravvalutazione e ad una non corretta comprensione della grandezza: l'energia venne intesa, soprattutto nei circoli degli "energetici", come qualche cosa di materiale. Così nel libro di Ostwald "L'energia" del 1908 si legge /5/: "L'energia è perciò contenuta in tutte le cose reali o concrete come elemento essenziale, che non manca mai, e a tale riguardo possiamo dire che nell'energia si incarna il vero reale".

D'altra parte la radiazione elettromagnetica non era accettata così come viene compresa oggi. Noi oggi sappiamo che essa è un sistema come altri sistemi, ad esempio come il gas ideale o il sistema dei fononi di un solido. Come altri sistemi, così anche il campo elettromagnetico è costituito da porzioni elementari. Ciò che per il gas idrogeno sono le molecole di idrogeno, o per il sistema reticolare di un solido sono i fononi, per il campo elettromagnetico sono i fotoni.

Questa errata comprensione, tanto della grandezza fisica "energia" quanto del sistema fisico "campo elettromagnetico", ha lasciato le sue tracce dietro di sé. Anche se da molto tempo sappiamo meglio come stanno le cose, facilmente ci scappano dalle labbra frasi come quelle sopra citate.

#### *Eliminazione:*

Invece di dire che dalla reazione di un elettrone con un positrone si forma energia pura, si dica che si producono fotoni. E invece di dire che la radiazione elettromagnetica è pura energia, si dica che la radiazione elettromagnetica trasporta energia, ma oltre all'energia anche altre grandezze estensive, ad esempio quantità di moto, momento angolare ed entropia.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ "When a positron encounters an electron, the two particles annihilate each other and produce pure energy in the form of gamma radiation". Scientific American, dicembre 1993, p. 44.

/2/ "A massive particle and its anti-particle can annihilate to form energy, and such a pair can be created out of energy". R. Penrose: *The emperor's new mind*. Oxford University Press, 1999, p. 308.

/3/ "... light can also be described in terms of photons, discretely emitted quanta of energy". Scientific American, aprile 1993, p. 26.

/4/ "So if galaxies are all moving away from one another [...] it seems logical that they were once crowded together in some dense sea of matter and energy". Scientific American, ottobre 1994, p. 32.

/5/ W. Ostwald: *Die Energie*. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, p. 5.

## L'equivalenza di massa ed energia

### Tema:

La relazione di *Einstein* tra massa ed energia  $E = mc^2$

### Difetti:

In molti libri di scuola e riviste troviamo l'affermazione che la relazione di *Einstein* significa che massa ed energia sono differenti manifestazioni della stessa grandezza fisica e che l'energia può essere trasformata o convertita in massa. Se questo fosse esatto, allora dovrebbe essere possibile distinguere l'energia dalla massa. Una diminuzione di energia dovrebbe essere associata con un aumento di massa e viceversa. Questo non è vero, e non è ciò che ci dice la relazione precedente. Essa afferma che energia e massa sono la stessa medesima grandezza fisica, misurata in unità differenti.

### Origine:

Forse il colpevole è proprio *Einstein*: “*It follows from the special theory of relativity that mass and energy are both but different manifestations of the same thing, a somewhat unfamiliar conception for the average mind. Furthermore, the equation  $E$  is equal  $mc$  squared, in which energy is put equal to mass, multiplied for the square of the velocity of light, showed that very small amount of mass may be converted into a very large amount of energy and viceversa. The mass and energy were in fact equivalent, according to the formula mentioned above ...*” [1, 2].

### Eliminazione:

La pratica didattica non deve lasciare ambiguità sui seguenti punti:

la grandezza che prima conoscevamo come energia ha anche le proprietà della grandezza che prima conoscevamo come massa, cioè il peso e l'inerzia. Una batteria carica è più pesante di una batteria scarica. L'acqua calda è più pesante della stessa quantità di acqua fredda, un corpo in movimento è più pesante dello stesso corpo a riposo, e così via... Però le differenze di peso di questi esempi sono così piccole che è impossibile misurarle;

la grandezza che prima conoscevamo come massa ha anche le proprietà della grandezza che prima conoscevamo come energia. Questa affermazione sembra a prima vista incredibile. Una tipica applicazione dell'energia consiste nel fare dei lavori utili. Così ci si potrebbe aspettare che con 1 g di sabbia si possa fare un lavoro di  $E = 10^{14}$  J, cosa che ovviamente non è vera.

Ma a ben pensare noi non riusciamo mai a trarre profitto da tutta l'energia contenuta in un sistema. Con dell'aria compressa a 1 bar (la pressione dell'ambiente) non possiamo far funzionare un martello pneumatico, con acqua calda a 25°C (temperatura ambiente) non si riesce a far funzionare un motore termico. Con a di-

sposizione solo la benzina non si mette in moto il motore. Abbiamo bisogno anche dell'ossigeno. Abbiamo bisogno anche di 1 g di anti-sabbia. Se avessimo l'anti-sabbia, ottenere energia dalla sabbia sarebbe possibile.

*Friedrich Herrmann, Corrado Agnes*

*/1/ “ ...dalla teoria della relatività consegue che la massa e l'energia non sono che differenti manifestazioni della stessa cosa, un'idea abbastanza poco familiare per la media della persone. Inoltre l'equazione ... nella quale l'energia viene posta uguale alla massa moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, dimostra che una piccolissima quantità di massa può essere trasformata in una grandissima quantità di energia e viceversa. La massa e l'energia sono infatti equivalenti secondo la formula menzionata in precedenza ...”*

/2/ Si può ascoltare la famosa relazione dalla viva voce di Einstein all'indirizzo:

[www.aip.org/history/einsteinvoice1/htm](http://www.aip.org/history/einsteinvoice1/htm). Vale però la pena di osservare che il discorso è fatto in una lingua non ben conosciuta da Einstein ed è rivolto a un pubblico generico.

# 4

## La potenza

### *Tema:*

Il termine “potenza” per la grandezza fisica  $P$  nella relazione  $P = dW/dt$

### *Difetti:*

La relazione  $P = dW/dt$  si riferisce ad una superficie assegnata.  $dW$  è l’energia trasportata attraverso la superficie, come si dice anche in fisica “il lavoro compiuto”.  $P$  è perciò l’energia trasportata attraverso la superficie nell’unità di tempo e quindi niente altro che l’intensità della corrente di energia. Quando l’energia fluisce lungo una ben definita via di trasporto, senza che l’intensità della corrente diminuisca lungo il cammino, allora  $P$  è l’intensità della corrente in qualsivoglia sezione del cammino o della conduttura.

Il significato di  $P$  è pertanto semplice. Ma la parola potenza non esprime questo semplice significato. Siamo abituati ad attribuire una potenza ad un’apparecchiatura – per esempio a un motore elettrico – invece che ai fili che trasportano l’energia verso l’apparecchiatura: il motore elettrico ha poca o molta potenza. Proprio per far comparire il significato di grandezza caratteristica di un trasporto, talvolta parliamo di “potenza trasferita”. Questo è un modo di esprimersi particolarmente infelice, perché quella che viene trasferita è energia, e non energia per unità di tempo.

### *Origine:*

La parola “potenza” ha origine in un periodo nel quale non si era in grado di localizzare l’energia e le correnti di energia. Però si sapeva che l’aumento di energia in un luogo era legato con la diminuzione di energia altrove, ma non si conosceva la distribuzione della densità di corrente neppure per uno dei più importanti trasporti di energia: quello elettrico. La grandezza  $P$  diventa quindi sinonimo per la variazione nel tempo dell’energia in un luogo fissato.  $P$  viene attribuita a un corpo o ad un’apparecchiatura, non a una superficie.

### *Eliminazione:*

$P$  venga chiamata non “potenza” ma intensità della corrente di energia, o brevemente corrente di energia.

### *Friedrich Herrmann*



## Leggi di conservazione

### *Tema:*

Di ogni grandezza estensiva si può dire se sia conservata oppure no. Alcune di queste grandezze estensive obbediscono, per quanto ne sappiamo ora, ad una legge di conservazione universale: energia, quantità di moto, momento angolare, carica elettrica, numero leptonico e barionico, carica di colore, eccetera. Sappiamo che per una grandezza vale una “mezza legge conservazione”: l’entropia può essere prodotta ma non distrutta. Ogni grandezza che non è conservata in generale, rimane costante a certe condizioni. Per esempio l’entropia in un processo reversibile è costante e si comporta come una grandezza conservata. La quantità di sostanza in generale non è conservata, ma ci sono tanti processi in cui il suo valore non cambia.

### *Difetti:*

Se si mettono in primo piano le grandezze estensive si giunge ad una rappresentazione della fisica in cui le diverse parti hanno la stessa struttura. Meccanica, termodinamica, elettricità, chimica appaiono come casi particolari di una struttura concettuale uniforme, che si adatta a tutti i campi parziali. Per poter approfittare di questa somiglianza strutturale, bisogna che le grandezze fisiche corrispondenti vengano trattate in modo corrispondente, cioè soprattutto trattare in modo uguale la conservazione o la non conservazione delle varie grandezze estensive. Tuttavia questo di solito non viene fatto.

Per esempio la conservazione dell’energia viene presentata come uno dei principi più importanti di tutta la fisica. Invece, nelle leggi di *Newton*, la conservazione della quantità di moto viene rivestita secondo una moda stranamente complicata da non far più riconoscere la sua semplice essenza. Tutto al contrario con la carica elettrica: per la sua conservazione non si spende neanche una parola perché viene considerata ovvia. Il fatto semplice che l’entropia può essere prodotta ma non distrutta nei libri di scuola si trova talvolta soltanto o nelle note o in capitoli dove il programma non arriva. La non conservazione della quantità di sostanza non viene mai formulata come legge, e neppure il fatto che in certe classi di processi rimane conservata. Invece di formulare e applicare le semplici leggi di conservazione che abbiamo imparato dalla fisica nucleare e dalla fisica delle particelle, si sprecano tempi preziosi di lezione discutendo i dettagli degli strumenti di misura della radiazione.

### *Origine:*

Le affermazioni sulla conservazione o non conservazione delle grandezze estensive riflettono lo sviluppo storico della fisica. Quanto più è stata lunga e difficile la scoperta e la formulazione di una legge e la discussione della sua validità, tanto più tempo verrà ad essa riservato nell’insegnamento e tanto più verrà sottolineata la sua importanza. L’esempio più significativo di ciò è la conservazione dell’energia. Forse il principio di conservazione dell’energia è per noi così affascinante perché proibisce qualcosa con cui si potrebbero fare tanti soldi. Potrebbe essere vero. Tuttavia dimostra anche la mancanza di immaginazione di coloro che si accaniscono a voler inventare un *perpetuum mobile*, dal momento che potrebbero fare tanti soldi anche violando le altre leggi di conservazione.

D'altra parte se la scoperta di un teorema di conservazione o di non conservazione è stata rapida e facile e la sua validità storicamente non contestata, allora anche questo teorema viene trattato rapidamente o perfino saltato del tutto.

*Eliminazione:*

Le lezioni ci guadagnerebbero molto seguendo le seguenti raccomandazioni:

1. formulare in modo ben chiaro la conservazione o la non conservazione di ogni grandezza estensiva;
2. tenere meglio conto dell'importanza della conservazione o della non conservazione, soprattutto nel caso della carica elettrica, della quantità di sostanza, del numero barionico e leptonico;
3. non sopravvalutare l'importanza della conservazione, come nel caso dell'energia.

*Friedrich Herrmann*

## Le costanti del moto

*Tema:*

Le costanti del moto, quantità il cui valore rimane costante nel tempo, giocano un ruolo importante nella meccanica analitica. Un sistema con  $n$  gradi di libertà ha  $2n - 1$  costanti del moto. Spesso queste vengono chiamate anche grandezze conservate:

(1) “Una funzione  $f(q, \dot{q}, t)$  si chiama grandezza conservata o costante del moto o più raramente integrale del moto quando per tutte le traiettorie  $q_i(t)$  che soddisfano alle equazioni di Lagrange vale la relazione seguente:

$$\frac{df(q, \dot{q}, t)}{dt} = 0$$

così che  $f(q, \dot{q}, t)$  rimane costante durante il moto.” /1/

(2) “Ovviamente la quantità di moto è una grandezza conservata se la sua derivata rispetto al tempo si annulla, cioè quando per l'intero svolgimento del moto le forze sono uguali e di senso contrario e quindi vale la relazione:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{0}.” /2/$$

*Difetti:*

Nella meccanica analitica l'espressione “grandezza conservata” ha un significato abbastanza diverso da quello che ha in altre parti della fisica.

In generale, cioè a parte la meccanica analitica, si usa l'espressione conservata o non conservata per caratterizzare profondamente una grandezza fisica. Ricordiamo che di una grandezza “di tipo sostanza”, cioè alla quale può essere assegnata una densità e una corrente, si può sempre dire se è conservata oppure no. Alcune grandezze “di tipo sostanza” sono conservate, come l'energia, la quantità di moto e la carica elettrica, altre non lo sono, come l'entropia. La conservazione o la non conservazione è una proprietà universale di una grandezza. Non è la proprietà di una certa funzione, di un certo sistema o di un certo processo. Inoltre non ha nessun senso parlare di conservazione di una grandezza non “di tipo sostanza” ma “di tipo intensità”. Così la temperatura per esempio non è né conservata né non conservata.

Invece in meccanica analitica il termine “grandezza conservata” è sinonimo di costante del moto come nella nostra prima citazione. Una costante del moto non è necessariamente “di tipo sostanza” e talvolta è molto poco intuitiva, ma il suo valore non cambia durante il moto. Un esempio è il vettore di *Runge-Lenz* che nel problema di *Keplero* è indipendente dal tempo. Nel linguaggio usato dalla meccanica analitica esso è una grandezza conservata del problema di *Keplero*. Tuttavia il vettore di *Runge-Lenz* non è una grandezza “di tipo sostanza” poiché non ha né densità né corrente. Inoltre la sua conservazione non è universale ma vale solo per il problema di *Keplero*.

Le grandezze energia, quantità di moto e momento angolare sono, nel linguaggio usato dalla meccanica analitica, talvolta grandezze conservate, talvolta no come si vede nella nostra seconda citazione.

*Origine:*

La meccanica analitica è una delle più eleganti teorie fisiche. Essa ha inoltre un ruolo molto importante come base di altre teorie: bastano poche modifiche perché diventi una teoria quantistica. Questa perfezione può essere dovuta al fatto di essere stata completata indipendentemente dagli altri campi della fisica. Quindi ha naturalmente sviluppato un proprio vocabolario, come accade ad ogni disciplina specializzata. Tra le altre cose il termine conservazione viene usato in senso diverso che altrove. Questo non viene sempre notato perché in certi casi il significato si sovrappone a quello di altri campi della fisica. Questo uso potrebbe essere una causa ulteriore della formulazione abbastanza sfortunata della legge di conservazione di una grandezza. Invece di caratterizzare una grandezza conservata dicendo che essa non può essere né prodotta né distrutta, si dice che il suo valore rimane costante in un sistema isolato.

*Eliminazione:*

Si distingue tra i termini “costanti o integrali del moto” e grandezze conservate, come per esempio viene fatto nel *Landau-Lifshitz* /3/: “Tra di queste (costanti del moto) ce ne sono alcune la cui costanza ha una causa profonda in relazione alle proprietà fondamentali dello spazio-tempo di omogeneità e isotropia. Le cosiddette grandezze conservate hanno tutte in comune l'importante proprietà di essere additive.”

*Friedrich Herrmann*

/1/ Kuypers: *Klassische Mechanik*. Physik-Verlag, Weinheim, 1983, p. 38.

/2/ W. Macke: *Mechanik der Teilchen* [Meccanica delle Particelle]. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1962, p. 240.

/3/ L. D. Landau, E. M. Lifschitz: *Theoretische Physik kurzgefasst I*. Akademie-Verlag, Berlin, 1973, p.17.

## Sistemi isolati

*Tema:*

Quando si deve formulare la conservazione dell'energia o di altre grandezze fisiche, spesso ci riferiamo a sistemi isolati. Ad essi pensiamo come a delle regioni di spazio impermeabili per la corrente della quantità di cui si parla. Le citazioni (1) e (2), che si riferiscono alla conservazione dell'energia, sono prese da libri di testo delle scuole secondarie superiori, nei quali tali affermazioni compaiono evidenziate.

(1) “In un sistema isolato dal punto di vista termico e meccanico l'energia totale è costante.”

(2) “In un sistema isolato la somma di tutte le energie è costante. L'energia totale si conserva.”

$$E_{\text{totale}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \text{costante}$$

$E_1, E_2, \dots, E_n$  differenti forme di energia“

*Difetti:*

La conservazione di una grandezza estensiva o “di tipo sostanza”, non è un concetto difficile. Ciò ha a che fare con il fatto di poter facilmente rappresentare intuitivamente queste quantità: possiamo immaginarle come una specie di fluido o sostanza. La conservazione di una quantità  $X$  di questo tipo può essere formulata nel modo seguente:  $X$  non può essere prodotta e non può essere distrutta, oppure non può essere creata né annichilata.

Le parole esatte non hanno molta importanza. La conservazione è qualcosa che possiamo facilmente formulare con le parole del linguaggio comune.

Una conseguenza di questa affermazione è che il valore di  $X$  in una regione di spazio può cambiare solo se una corrente di  $X$  entra o esce da questa regione. Matematicamente questo si esprime nel modo seguente (noto nel linguaggio dei fisici come equazione di continuità):

$$\frac{dX}{dt} + I_X = 0.$$

Qui  $dX/dt$  misura il tasso di cambiamento di  $X$  nella regione e  $I_X$  il flusso di  $X$  attraverso la superficie che la limita.

Un caso particolare di questa affermazione diventa la formulazione della conservazione dell'energia quando si riferisce ad un sistema isolato. “Il sistema è isolato” significa che non c'è flusso attraverso la superficie che lo limita. Tuttavia l'isolamento è una restrizione non necessaria poiché le quantità considerate sono conservate indipendentemente dal fatto che il sistema sia isolato oppure no. Per convincersi che il numero degli studenti e delle studentesse è “conservato” non abbiamo bisogno di chiudere le porte dell'aula. Non c'è problema se, di quando in quando, uno esce o entra, fin tanto che controlliamo che il numero degli studenti presenti in aula aumenta di uno solo quando qualcuno entra, e diminuisce di uno solo se qualcuno esce.

### *Origine:*

Il fatto che noi formuliamo la conservazione dell'energia riferendoci ad un sistema isolato è un residuo del complicato sviluppo dell'idea di energia come una grandezza di tipo quantità di qualcosa, una specie di sostanza. Fino a poco prima del XX secolo non era stata ancora provata la localizzabilità dell'energia. Non era ancora possibile associare ad essa una densità di volume, una corrente e una densità di corrente nella sezione del flusso. Nel 1887 *Max Planck* /1/ scrisse una rassegna storica sul concetto di energia: "... secondo questa definizione la quantità di energia viene misurata solo da questi effetti esterni, e se vogliamo attribuire una qualche proprietà materiale all'energia, allora dobbiamo cercarla nell'ambiente che circonda il sistema, solo qui l'energia trova la sua spiegazione e quindi anche la sua esistenza concettuale. Fino a quando si ignorano del tutto gli effetti esterni al sistema materiale, non si può parlare della sua energia, dal momento che essa non è definita... d'altra parte dalla formulazione del principio come l'abbiamo derivato in precedenza, vediamo che l'energia di un sistema rimane costante se un processo non ha alcun effetto all'esterno del sistema, qualsiasi possano essere gli effetti all'interno. Questa osservazione ci porta a concepire l'energia contenuta in un sistema come una quantità che esiste indipendentemente dagli effetti esterni." E più avanti: "perciò è fuor di dubbio che ... con questa interpretazione dell'energia come una specie di sostanza, non solo essa diviene più intuitiva, ma consente anche un progresso diretto delle conoscenze..." e più avanti ancora "...tuttavia non appena ci si addentra in tali questioni, l'incertezza prima insita nel concetto stesso prende l'aspetto di problemi fisici che almeno in linea di principio possono essere risolti..."

Questa soluzione arrivò alcuni anni più tardi da parte di *Gustav Mie* /2/. Egli mostrò che il principio di conservazione dell'energia può essere formulato localmente, cioè nella forma di una equazione di continuità. Da allora in avanti non fu più necessaria la strana separazione tra il sistema e gli effetti che possono essere osservati solo nell'ambiente circostante.

In definitiva ci vollero circa 50 anni per dimostrare per l'energia la natura di quantità del tipo sostanza. Tuttavia fin dal principio era presente l'aspettativa che l'energia avesse questa proprietà: *W. Ostwald* /3/ nel suo breve saggio del 1908 "*L'Energia*" lodava il lavoro di *R. Mayer* con queste parole: "Per la nostra ricerca generale [sul concetto di energia] il risultato essenziale del lavoro di *R. Mayer* è l'opinione sulle proprietà del tipo di sostanza di quello che egli chiama forza, cioè dell'energia. Per lui essa è una entità ben definita e specifica, e il fatto di non poter essere né prodotta né distrutta sono i segni caratteristici della sua realtà."

### *Eliminazione:*

Formuliamo la legge di conservazione delle grandezze "di tipo sostanza"  $X$  più o meno così: "L'energia, la quantità di moto, il momento angolare, la carica elettrica eccetera, non possono essere prodotte e non possono essere distrutte." Altrettanto importanti sono le affermazioni sulla non conservazione delle grandezze "di tipo sostanza", per esempio: "L'entropia può essere prodotta ma non può essere distrutta."

### *Friedrich Herrmann*

/1/ M. Planck: *Das Prinzip der Erhaltung der Energie* [Il principio di conservazione dell'energia]. B. G. Teubner, Leipzig, 1908, p. 115.

/2/ G. Mie: *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*. Band CVII, Heft VIII, 1898, S.1113.

/3/ W. Ostwald: *Die Energie*. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 59.

## La conservazione dell'energia

### Tema:

La formulazione della legge di conservazione dell'energia non sembra essere banale. Le citazioni (1) e (2) sono prese da libri di scuola, e la citazione (3) da un libro universitario.

(1) Sottolineati come teoremi: “L'energia totale di un corpo può essere distribuita tra le diverse forme di energia. Se non viene trasferita energia da o ad altri corpi l'energia totale del corpo rimane costante.”...“Se in assenza di attriti più corpi sono coinvolti negli scambi e trasformazioni di energia, la somma delle energie cinetica, elastica e gravitazionale rimane conservata.” ... “In presenza di attriti, l'energia interna dei corpi e quella dell'ambiente fanno parte della somma totale delle energie.”

(2) Sottolineati come teoremi: “Teorema di conservazione dell'energia meccanica: in un sistema isolato dal punto di vista energetico la somma delle energie meccaniche rimane costante, fino a quando i fenomeni meccanici avvengono senza attrito. L'energia non viene mai perduta, e neppure viene creata della nuova energia; essa si trasforma dall'una all'altra delle forme meccaniche”. Poi, non più sottolineato: “Secondo questo teorema esiste una grandezza di stato di un sistema energeticamente isolato, chiamata energia meccanica, che compare in diverse forme, e il cui valore è sempre conservato. Pertanto l'energia di un siffatto sistema è una grandezza fisica conservata.”

(3) “Ora la legge dell'energia può essere formulata nel modo seguente: la quantità di calore  $\Delta Q$  fornita ad un sistema dall'esterno serve ad aumentare la sua energia interna  $\Delta U$ , e.g. la sua temperatura ... o la sua energia elettrica o chimica, e serve a compiere il lavoro  $\Delta W$ , che considereremo negativo quando viene fornito dal sistema, così che  $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$ .”

### Difetti:

Un fatto semplice viene descritto in un modo tale che è quasi impossibile riconoscere tale semplicità. D'accordo prima di formulare il teorema dell'energia si potrebbero prendere in considerazione molte cose. Ma prima o poi bisognerebbe affermarlo in tutta chiarezza: l'energia non può essere né prodotta né distrutta. E non c'entrano più gli scrupoli con questa affermazione. Altrimenti inevitabilmente viene fuori l'idea che la conservazione è un concetto proprio difficile.

### Origine:

Il fatto che noi formuliamo la conservazione dell'energia riferendoci ad un sistema isolato è un residuo del complicato sviluppo dell'idea di energia come una grandezza di tipo quantità di qualcosa, una specie di sostanza. Fino a poco prima del XX secolo non era stata ancora provata la localizzabilità dell'energia. Non era ancora possibile associare ad essa una densità di volume, una corrente e una densità di corrente nella sezione del flusso. Nel 1887 *Max Planck* [1] scrisse una rassegna storica sul concetto di energia: “... secondo questa definizione la quantità di energia viene misurata solo da questi effetti esterni, e se vogliamo attribuire una qualche proprietà materiale all'energia, allora dobbiamo cercarla nell'ambiente che circonda il sistema, solo qui l'energia trova la sua spiegazione e quindi anche la sua esistenza concettuale. Fino a quando si

*ignorano del tutto gli effetti esterni al sistema materiale, non si può parlare della sua energia, dal momento che essa non è definita... d'altra parte dalla formulazione del principio come l'abbiamo derivato in precedenza, vediamo che l'energia di un sistema rimane costante se un processo non ha alcun effetto all'esterno del sistema, qualsiasi possano essere gli effetti all'interno. Questa osservazione ci porta a concepire l'energia contenuta in un sistema come una quantità che esiste indipendentemente dagli effetti esterni." E più avanti: "perciò è fuor di dubbio che ... con questa interpretazione dell'energia come una specie di sostanza, non solo essa diviene più intuitiva, ma consente anche un progresso diretto delle conoscenze..." e più avanti ancora "...tuttavia non appena ci si addentra in tali questioni, l'incertezza prima insita nel concetto stesso prende l'aspetto di problemi fisici che almeno in linea di principio possono essere risolti..."*

Questa soluzione arrivò alcuni anni più tardi da parte di *Gustav Mie* /2/. Egli mostrò che il principio di conservazione dell'energia può essere formulato localmente, cioè nella forma di una equazione di continuità. Da allora in avanti non fu più necessaria la strana separazione tra il sistema e gli effetti che possono essere osservati solo nell'ambiente circostante.

In definitiva ci vollero circa 50 anni per dimostrare per l'energia la natura di quantità del tipo sostanza. Tuttavia fin dal principio era presente l'aspettativa che l'energia avesse questa proprietà: *W. Ostwald* /3/ nel suo breve saggio del 1908 "*L'Energia*" lodava il lavoro di *R. Mayer* con queste parole: "*Per la nostra ricerca generale [sul concetto di energia] il risultato essenziale del lavoro di R. Mayer è l'opinione sulle proprietà del tipo di sostanza di quello che egli chiama forza, cioè dell'energia. Per lui essa è una entità ben definita e specifica, e il fatto di non poter essere né prodotta né distrutta sono i segni caratteristici della sua realtà.*"

#### *Eliminazione:*

Si formuli la conservazione dell'energia allo stesso modo della conservazione della carica elettrica, cioè senza se e ma, per esempio così: l'energia non può essere né creata né distrutta.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ M. Planck: *Das Prinzip der Erhaltung der Energie*. [Il principio di conservazione dell'energia] B. G. Teubner, Leipzig, 1908, p. 115.

/2/ G. Mie: *Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung*. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*. Band CVII, Heft VIII, 1898, S.1113.

/3/ W. Ostwald: *Die Energie*. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 59.

## Il linguaggio che nasconde

### *Tema:*

I modi di dire che seguono sono familiari per noi insegnanti di fisica. Non ci stupiamo quando vengono adoperati nei libri di scuola e nelle riviste scientifiche, e forse li usiamo anche noi nelle lezioni:

1. “... i sistemi scambiano carica elettrica.”
2. “... i sistemi interagiscono tra loro.”
3. “... si origina l’azione di una forza.”
4. “... c’è un campo elettrico.”
5. “Il corpo sente l’azione di un campo gravitazionale.”
6. “Per ..., dobbiamo riuscire a fornire l’energia  $E$ .”
7. “A ogni elettrone viene associata una funzione d’onda.”

### *Difetti:*

Queste espressioni hanno in comune il fatto di affermare qualcosa e nello stesso tempo di lasciare la domanda aperta. Si sarebbe potuto dire qualcosa d’altro, ma non è stato detto. Veramente può essere legittimo non dire qualcosa che in linea di principio si sarebbe potuto dire. Come esempio consideriamo “scambiare”, un verbo molto popolare in fisica come si vede dal nostro primo esempio. L’affermazione “i sistemi A e B si scambiano carica” significa che della carica va da A a B o da B ad A senza distinguere tra le due possibilità. La ragione potrebbe essere che nel nostro contesto non è importante in quale direzione si svolge il trasporto. E così facciamo un’affermazione che va bene per entrambe le possibilità. Oppure sarebbe anche stato interessante sapere in quale direzione avviene lo scambio, ma non lo sappiamo. E finalmente capita anche che lo sappiamo e che sarebbe utile dirlo, ma ciò nonostante non lo diciamo. Di questo ultimo caso ci stiamo ora occupando: quando appunto si trascurava qualcosa che avrebbe potuto essere detto.

Torniamo ad analizzare i nostri esempi:

1. Del verbo scambiare abbiamo già parlato, vogliamo solo aggiungere che in fisica viene adoperato in un senso diverso dalla lingua quotidiana, dove significa che B ottiene qualcosa da A, e A qualcosa da B, cioè che lo scambio è bilaterale.
2. Quando si dice che due sistemi “interagiscono” tra loro significa che qualcosa va da A a B o da B ad A come nello scambio. Ma questa formulazione non solo lascia aperta la questione della direzione del trasporto, ma anche che cosa viene trasportato. Non sempre, ma in moltissimi casi si intende la quantità di moto. In questo caso bisognerebbe anche dirlo.
3. Di ogni forza, con l’eccezione delle forze di inerzia, si può dire quale corpo la esercita e su quale corpo agisce. Nella maggioranza dei casi è vantaggioso nominare entrambi i corpi.

4. Il modo di dire “c’è”, sinonimo di “esiste”, è il modo più vago di esprimere l’esistenza di qualcosa. Questa formulazione non lascia soltanto aperta la questione dove si trova questo “qualcosa”, ma la si può adoperare anche quando il “qualcosa” non è localizzabile, cioè in linea di principio non ha un proprio luogo. Al contrario, nel caso dei campi generalmente si può indicare esattamente dove si trovano. L’“esserci” o “esistere” confonde gli studenti: potrebbero credere che i campi non abbiano un luogo preciso.

5. Si intende che il corpo si trova nel campo gravitazionale di un altro. Sente il campo a sua volta il corpo? E sente il corpo il suo proprio campo?

6. Anche il “riuscire a fornire” l’energia lascia aperta una questione che si potrebbe dire chiaramente: cioè da dove viene l’energia e dove va.

7. La cautela e vaghezza di questa affermazione sono insuperabili. Perché non dire semplicemente: l’elettrone ha una funzione d’onda? Ha una funzione d’onda nello stesso modo in cui ha una massa e una carica.

### *Origine:*

Non si tratta di perle, anche se nei libri di fisica se ne trovano tantissime. Non si offenderà certo nessuno quando si dice che gli autori dei libri di fisica non sono scrittori. Qui si tratta di dire chiaramente quello che si può dire chiaramente. Le inesattezze hanno diverse cause.

Il linguaggio della fisica talvolta è poco chiaro perché certi fatti in un determinato momento non erano ancora ben conosciuti. Non si poteva esprimerli in modo più chiaro. Specialmente quando si parla di energia gli esempi sono innumerevoli. Fino alla fine del XIX secolo non si sapeva localizzare né l’energia, né la sua corrente. Il linguaggio di allora doveva operare con espressioni che lasciassero aperta la questione della distribuzione spaziale dell’energia. A queste appartengono: “potenza” come nome per la corrente di energia, il modo di dire “fare lavoro”, il “rifornimento” e il “dispendio” di energia e anche il “trasferimento” di energia. Queste formulazioni vaghe erano termini tecnici, ma vengono usate tuttora anche se potremmo esprimerci in modo più chiaro. Per gli esperti di fisica non c’è problema, fra di loro si capiscono bene. Il problema è tutto per lo studente, e specialmente per quello che non ha una grande passione per la fisica.

Ma in alcuni casi sembra anche che l’autore non abbia una visione completa dell’argomento e per cautela sceglie una espressione meno precisa.

### *Eliminazione:*

Uno dei compiti dell’insegnamento, anche della fisica, è la cura del linguaggio. E la cura del linguaggio, soprattutto in un campo che fa parte delle scienze esatte, consiste nell’esprimersi chiaramente. Infatti è sempre valido il detto di Wittgenstein /1/: “*Tutto quello che può essere espresso, può essere espresso in modo chiaro.*”

### *Friedrich Herrmann*

/1/ L. Wittgenstein: *Tractatus Logico Philosophicus*. Suhrkamp, 1963, p. 42.

## Il linguaggio preciso degli specialisti

### *Tema:*

“Termine tecnico: denominazione specialistica fissa per qualcosa del tutto determinato in un campo specialistico ben preciso.“ /1/

“Una delle differenze tra il linguaggio specialistico e quello comune è che i concetti sono indicati con precisione, ma di regola valgono solo all’interno del campo specifico considerato.“ /2/

### *Difetti:*

Il linguaggio specialistico è, come dimostrano le due citazioni, un linguaggio preciso. Quando si sa a quale campo specifico appartiene un’affermazione, essa è inequivocabile, così almeno secondo l’opinione diffusa. Probabilmente questa è l’opinione dei non esperti. Poiché gli esperti sanno, o dovrebbero sapere, che questa opinione non è vera.

Ben noti sono i diversi significati fisici e tecnici del termine forza. Nel XVII e XVIII secolo il concetto di forza comprendeva non solo quello che oggi noi indichiamo come quantità di moto, ma anche ciò che oggi chiamiamo forme di energia meccanica. E finalmente anche quello che oggi generalmente si intende come forza in fisica. Si potrebbe pensare che il motivo di questa molteplicità di significati sia dovuto al fatto che il processo di chiarificazione dei concetti fosse in pieno sviluppo. Ma anche quando questo processo si poté considerare concluso, il termine non fu per nulla adoperato in modo unico. La citazione seguente proviene da un libro di scuola del 1912: “Chiamiamo forza viva il prodotto di  $1/2$  della massa per il quadrato della velocità del peso che si muove.” E anche oggi talvolta l’energia in fisica viene indicata con il termine forza. Quando veramente avrebbe dovuto essere tutto chiarito, entrava in scena un altro concorrente. Era la termodinamica dei processi irreversibili ad impiegare la parola forza per i suoi scopi come denominazione per la spinta nei processi di trasporto: “... per la comparsa di fenomeni irreversibili vengono prese in considerazione una serie di cause: per esempio gradienti di temperatura, di concentrazione, di potenziale o una affinità chimica. Tutte queste grandezze vengono solitamente chiamate forze nella termodinamica dei processi irreversibili.“ /3/

Per finire sono sopravvissuti senza contestazioni fino ad oggi i vecchi modi di dire “forza elettromotrice” e “forza termoelettrica” al posto di tensioni elettriche. Si potrebbe pensare che solo i nostri antenati avrebbero potuto usare in modo così irresponsabile il linguaggio scientifico. Ma così non è. Perché proprio ai nostri giorni possiamo osservare come la innocente parola forza viene sequestrata da un nuovo gruppo di specialisti, i fisici delle particelle elementari. Quello che loro intendono per forza non è facile da identificare. In ogni modo, quando si tratta delle loro quattro interazioni, parlano sempre anche delle quattro forze: “Due delle tre particelle scambiate dalla forza debole sono elettricamente cariche. Perciò subiscono anche la forza elettromagnetica. Esse possono emettere fotoni e attirarsi reciprocamente.“ /4/ Ovviamente in questo contesto la parola “forza” non viene usata come nome di una grandezza fisica.

Con un po’ di attenzione possiamo osservare che dappertutto troviamo tali cambiamenti di significato, allo stesso modo oggi come in passato.

All'inizio il bit aveva un significato molto semplice. Venne introdotto come misura della quantità di dati di *Shannon*. In seguito è stato rivalutato e adoperato come sinonimo di "sistema con due stati", e lo si trova in strane espressioni come "mi gioco un bit". Questa promozione ha raggiunto la sua apoteosi quando al bit si è aggiunto il qubit.

Nonostante organizzazioni come DIN (Deutsche Industrie Norm) o ISO (International Organisation for Standardisation), SI (Sistema Internazionale di misura) e IUPAP (International Union of Pure and Applied Physics) le espressioni specializzate non vengono adoperate con un unico significato. L'esattezza del linguaggio scientifico non è quella che ci fanno credere.

Al linguaggio specializzato capita come al linguaggio comune: esso continuamente si sviluppa. Questo è assolutamente necessario per l'efficacia e l'utilizzabilità del linguaggio comune. I linguisti conoscono bene questo processo di cambiamento di significato. Ma per il linguaggio scientifico questi cambiamenti di significato provocano malintesi e difficoltà didattiche. Tali problemi vengono creati soprattutto quando chi utilizza il linguaggio, in particolare gli insegnanti, non sono consci di questa molteplicità di significati.

#### *Origine:*

Il linguaggio specializzato obbedisce alle stesse leggi del linguaggio comune, e questo vuol dire che si sviluppa. Nuovi significati si creano qua e là con un contatto disinvolto con la lingua. Tutte le volte che nella scienza e nella tecnica si forma una nuova branca viene subito creato un gergo che non viene subito preso molto sul serio, ma che rapidamente si trasforma in un linguaggio specializzato.

#### *Eliminazione:*

Non seguire tutte le mode linguistiche e le manie dei rappresentanti dei campi specialistici di scienza e tecnica. Non favorire senza necessità l'uso di un termine specialistico in diversi significati, come per esempio: distinguere bene il termine campo come sistema fisico dal termine intensità del campo come nome di una grandezza fisica. Ma quando si sono stabiliti per un termine due significati diversi ed entrambi sono convenienti, avvertire gli studenti del problema: la parola corrente che da una parte indica un fenomeno elettrico e dall'altra l'energia elettrica.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ Duden: *Deutsches Universalwörterbuch*. Dudenverlag, Mannheim, 1989, parola chiave: termine tecnico (Fachausdruck).

/2/ Wikipedia, Dezember 2006, parola chiave: linguaggio specializzato.

/3/ S. R. de Groot: *Thermodynamik irreversibler Prozesse*. Bibliographisches Institut, Mannheim, 1960, p. 4.

/4/ DESYs KworkQuark 2006 <http://www.kworkquark.net>

## Orologi al quarzo e contatori *Geiger*

### *Tema:*

Seguendo i contenuti dei libri di testo dobbiamo imparare come funziona un contatore *Geiger* ma non un orologio al quarzo. Così ci occupiamo ampiamente dei termometri a mercurio e ad alcol, ma quasi per niente delle termocoppie. Impariamo a conoscere i processi atomici che si svolgono nei laser ma non quelli di una lampadina o di una candela. Vengono ampiamente trattati spettrometri di massa e filtri di velocità, ma niente sulla analisi spettrale di *Fourier*. Vengono trattati i processi isotermi anche dal punto di vista quantitativo, ma poco o niente quelli isoentropici. Nei libri di testo per le superiori si impara perché il cielo è blu, ma non perché il resto del mondo è rosso, verde, grigio o bianco.

### *Difetti:*

Quando si progettano gli argomenti da insegnare o un piano di studi, o si stabiliscono degli obiettivi formativi, ma anche quando semplicemente si preparano le proprie lezioni, dobbiamo sempre operare delle scelte. Cioè, quali grandezze fisiche introduco e quali no? Quante ore prevedo per la meccanica, quante per la termologia, quante per l'elettrologia? Per quali fenomeni dare una spiegazione a livello atomico, per quali invece macroscopica? Quali strumenti di misura e quali sensori trattare nelle lezioni? Guardando i libri di testo appare evidente che la scelta è fatta in modo maldestro, come si vede dai nostri esempi iniziali.

### *Origine:*

Gli argomenti del programma scolastico si formano spesso casualmente lungo lo sviluppo storico. Diventano un'abitudine e la loro legittimazione non viene più messa in discussione. Inoltre si è stabilita una tradizione di esercizi per gli esami di maturità che garantisce la sopravvivenza di certi argomenti. Altri vengono fissati attraverso l'offerta delle ditte specializzate in apparecchiature di laboratorio. L'insieme dei professori e degli autori dei libri di scuola e di università, delle apparecchiature di laboratorio, dei vari indirizzi delle scuole di formazione degli insegnanti, delle abitudini di esame e delle regole sui programmi di studio, crea un sistema con una inerzia enorme.

### *Eliminazione:*

Consiglio di usare il metodo seguente per selezionare gli argomenti per i piani di studio o le proprie lezioni. Prima si sceglie uno dei temi che potrebbe essere un candidato per l'insegnamento. Poi si cercano dei "concorrenti", cioè argomenti che potrebbero avere lo stesso diritto da qualche punto di vista: grado di difficoltà, utilità nelle applicazioni, valore dal punto di vista della formazione generale. Una proposta di argomento sopravvive solo quando si trovano buoni motivi per cui esso è più importante dei suoi concorrenti: pertanto perché un tema venga accettato deve superare i suoi concorrenti. Allora non basta avere buoni motivi per ritenere un argomento importante, poiché questi si trovano sempre e si possono facilmente difendere in modo convincente.

Un semplice esempio: la proposta iniziale è introdurre l'intensità del campo elettrico. Ci sono vari concorrenti. Prima l'altra grandezza vettoriale con la quale si può descrivere il campo elettrico: lo spostamento elettrico. Poi una grandezza scalare, ma equivalente per la descrizione: il potenziale elettrico. Ma ci sono altri concorrenti come l'intensità del campo magnetico, l'induzione magnetica e il potenziale magnetico scalare, e poi l'intensità del campo gravitazionale e il potenziale gravitazionale. Adesso facciamo le seguenti domande: quando introduciamo l'intensità del campo elettrico perché non introduciamo anche l'intensità del campo magnetico, l'intensità del campo gravitazionale, il potenziale elettrico ecc.? Oppure, quando si rinuncia all'intensità del campo gravitazionale e all'intensità del campo magnetico, perché non rinunciare anche all'intensità del campo elettrico? In questo caso la decisione non è difficile. Ma è molto diverso nel caso seguente.

La proposta è quella di trattare la dilatazione termica dei solidi e dei liquidi. Di nuovo cerchiamo i concorrenti e questi sono soprattutto le altre proprietà dei materiali: termiche, meccaniche, elettriche, magnetiche, ottiche. Possiamo confrontarle dal punto di vista dell'ordine di grandezza, della rilevanza per la comprensione generale della fisica, dell'importanza nelle applicazioni tecniche. Il numero dei concorrenti in questo caso è così grande che non si vede come possa sopravvivere la dilatazione termica. Analogamente quando la proposta fosse quella di introdurre il funzionamento del contatore *Geiger*. Fra gli innumerevoli concorrenti, alcuni sono esotici allo stesso modo del contatore *Geiger*, ma altri sono familiari e possono essere trovati dappertutto, come l'orologio al quarzo o il componente CCD della fotocamera digitale. Altri esempi di questo tipo li abbiamo indicati all'inizio.

*Friedrich Herrmann*

# 12

## Azione a distanza

### *Tema:*

Affermazioni come “la Terra attira la Luna”, “il Sole esercita una forza sulla Terra”, “poli magnetici dello stesso nome si respingono, poli di nome diverso si attraggono”.

### *Difetti:*

Le frasi trasmettono l’opinione che esistano azioni di un corpo A su un corpo lontano B, senza che tra questi ci sia il coinvolgimento di un altro sistema che connetta tra loro A e B e tale da trasmettere l’azione. Da quando fu formulata la prima teoria di campo, l’elettrodinamica di *Faraday* e *Maxwell*, gli scienziati si persuasero che tale descrizione di azione a distanza è inappropriata.

### *Origine:*

Il linguaggio dell’azione a distanza, che ancora oggi viene utilizzato in tutti i libri di fisica proviene dal tempo di *Newton*. Infatti prima di *Faraday* e *Maxwell* non c’era altra scelta che rappresentare le forze elettriche, magnetiche e gravitazionali come azioni a distanza. Già *Newton* stesso considerava l’azione a distanza come un difetto della sua teoria.

### *Eliminazione:*

Non appena nelle lezioni si trattano le forze gravitazionali, elettriche o magnetiche tra due corpi, si introduca il corrispondente campo come il terzo sistema fisico coinvolto.

Si descriva il campo come un oggetto altrettanto realmente esistente come entrambi i due corpi.

L’attrazione o, rispettivamente, la repulsione viene descritta all’incirca così: due corpi con carica dello stesso segno vengono premuti l’uno lontano dall’altro dal loro campo, corpi con cariche di segno opposto vengono tirati dal campo l’uno verso l’altro.

### *Friedrich Herrmann*



# 13

## Le leggi di *Newton*

### *Tema:*

1. Un corpo rimane nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, fino a quando ad esso non venga applicata una forza.
2. La forza che agisce su di un corpo è uguale al prodotto della massa per l'accelerazione del medesimo.
3. Se un corpo A esercita sul corpo B la forza  $F_{AB}$ , allora il corpo B esercita sul corpo A la forza  $F_{BA} = -F_{AB}$ .

### *Difetti:*

Tutte tre le leggi sono casi particolari di un'unica affermazione, che si può formulare in modo molto più semplice: la quantità di moto non può essere prodotta e neppure distrutta. Ciò diventa particolarmente evidente se si considera che la forza non è niente altro che l'intensità di una corrente di quantità di moto. Le leggi di *Newton* si possono quindi formulare nel modo seguente:

1. la quantità di moto di un corpo non cambia fin tanto che nessuna quantità di moto fluisce dall'esterno dentro il corpo oppure dall'interno fuori dal corpo;
2. la variazione nel tempo della quantità di moto di un corpo è uguale all'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce dentro il corpo;
3. quando una corrente di quantità di moto fluisce da un corpo A ad un corpo B, allora l'intensità della corrente è la stessa all'uscita di A e all'ingresso in B.

Queste conseguenze del principio di conservazione della quantità di moto sono così semplici da non meritare il rango di affermazioni fondamentali. Ci si convince facilmente che si potrebbero formulare le stesse affermazioni per altre grandezze conservate, per esempio anche semplicemente per l'acqua: "La quantità di acqua in un contenitore non cambia se non ne esce e non ne entra."

### *Origine:*

L'origine è da una parte chiara a tutti: *Newton* non ha messo all'inizio delle sue considerazioni la conservazione della quantità di moto. D'altra parte sarebbe necessaria un'analisi approfondita dell'opera di *Newton* per capire che le tre leggi sono per lui indipendenti l'una dalle altre. Esse si situano in una complicata serie di osservazioni e definizioni.

### *Eliminazione:*

Si introduca nella meccanica quasi subito la quantità di moto come grandezza indipendente: come una misura della "quantità di movimento", di ciò che nel linguaggio comune si chiama impeto, impulso o anche "forza". Quando la quantità di moto di un corpo cambia, non si dica che su di esso si esercita una forza, ma che dentro di esso fluisce una corrente di quantità di moto di intensità  $F$ . Questo modo di dire è del tutto estraneo

per il fisico esperto, ma è più semplice per il principiante, poiché diminuisce alcune delle complicazioni che la discussione delle tre leggi di *Newton*, soprattutto la terza, porta con sé.

*Friedrich Herrmann*

## Equilibrio delle forze e terza legge di Newton

### Tema:

Le forze agiscono sui corpi. Se il corpo C sul quale il corpo A esercita la forza  $F_{AC}$  rimane in quiete (non accelera), vuol dire che un secondo corpo B esercita su C una forza  $F_{BC}$  che equilibra la precedente in modo tale che la risultante sul corpo C è nulla. Ma se A esercita su C una forza  $F_{AC}$ , per la terza legge anche C esercita su A una forza  $F_{CA}$ . Analogamente per il corpo B: se B esercita su C una forza  $F_{BC}$ , per la terza legge anche C esercita su B una forza  $F_{CB}$ . Tutte quattro le forze hanno lo stesso valore, ma le direzioni sono a due a due opposte.

$$F_{AC} = -F_{BC} \quad , \quad F_{AC} = -F_{CA} \quad , \quad F_{BC} = -F_{CB} \quad , \quad F_{CB} = -F_{CA}$$

In questo modo viene descritta la situazione di quiete del corpo C. E questa è la più semplice delle situazioni comuni, a parte il caso banale di corpo libero non soggetto a forze. Chi vuol capire che cosa è una forza deve poter distinguere concettualmente queste quattro forze.

### Difetti:

Il problema è così complicato che uno studente mediamente dotato non può capire nulla. Di fatto anche studenti di fisica nei primi anni di università hanno difficoltà a districarsi tra le quattro forze descritte sopra. Bisogna veramente chiedersi se sia il caso di continuare a introdurre nelle scuole superiori il concetto newtoniano di forza.

### Origine:

Questo concetto di forza è stato elaborato da *Newton* in un periodo in cui le interazioni meccaniche potevano essere descritte solo come azioni a distanza. (Il concetto di campo nasce circa cento anni dopo). Una forza si riferiva a due corpi: quello che la esercita e quello che la subisce.

Nel caso precedente abbiamo a che fare con tre corpi, dai quali conseguono sei forze. Di queste a noi interessano solo le quattro che si riferiscono al corpo C.

Una semplificazione concettuale sarebbe stata possibile appunto quando *Faraday* e *Maxwell* introdussero il concetto di campo. Ma di fatto ciò fu proposto dopo il riconoscimento che la quantità di moto è una grandezza fisica estensiva primaria a sé stante, e non solo una comoda abbreviazione del prodotto di massa e velocità: *Max Planck* ha dimostrato nel 1908, cioè tre anni dopo la pubblicazione della teoria della relatività speciale, che la forza non è niente altro che l'intensità di una corrente di quantità di moto  $/l/$ . Pertanto la forza è una grandezza i cui valori non si riferiscono ad un corpo ma ad una superficie (come i valori di ogni altra corrente si riferiscono alla sezione attraverso la quale essa scorre), pensata come parte di un mezzo che trasporta la quantità di moto (conduttore).

Se applichiamo questo punto di vista alla situazione precedente si chiarisce la confusione delle quattro forze: si tratta in tutti quanti i casi della stessa intensità di corrente (di quantità di moto) misurata in quattro posti differenti. È l'intensità della corrente che fluisce da A a C quando lascia A, l'intensità della corrente quando

entra in C, l'intensità della corrente quando lascia C e l'intensità della corrente quando entra in B. Il valore è sempre lo stesso, dal momento che la quantità di moto non si accumula da nessuna parte: non nel passaggio tra i corpi e non nel corpo C medesimo. Il segno non è sempre lo stesso, poiché la superficie di riferimento per la misura della corrente non è sempre orientata nello stesso modo.

*Eliminazione:*

L'intera faccenda scompare se si utilizzano le correnti di quantità di moto invece delle forze. La descrizione verbale del caso considerato è la seguente: fluisce della quantità di moto da A a C e da C a B. Siccome la quantità di moto non si accumula da nessuna parte, l'intensità della corrente è la stessa in ogni luogo.

*Friedrich Herrmann*

/1/ M. Planck: *Bemerkungen zum Prinzip der Aktion und Reaktion in der allgemeinen Dynamik* [Osservazioni sul principio dell'azione e reazione nella dinamica generale]. *Phys. Z.* 9, 1908, p. 828.

# 15

## Le forze apparenti

### *Tema:*

In un sistema di riferimento accelerato compaiono le forze di inerzia. Una forza di inerzia si distingue dalle altre forze perché non c'è il corpo che la esercita, o dal quale proviene. Queste forze si chiamano anche forze apparenti. Anche se sono soltanto apparenti, esse sono realmente esistenti per l'osservatore accelerato.

### *Difetti:*

Partendo dal concetto newtoniano di forza, si riconosce una forza dal suo effetto su di un corpo: un'accelerazione o una deformazione. Secondo la terza legge di *Newton* ad ogni forza corrisponde una forza uguale e contraria, così che dobbiamo sempre osservare in totale due effetti. Le forze di inerzia hanno però il difetto che non si conosce alcun corpo a cui applicare la reazione. Esse sono in un certo senso incomplete. Di qui il nome forze apparenti. Questo ragionamento è tipico della descrizione delle interazioni come azioni a distanza. Nella sistemazione moderna la fisica non ha più bisogno delle azioni a distanza. Se una forza agisca o meno viene deciso da una osservazione locale, e non se da qualche altra parte c'è un corpo dal quale proviene la forza. Secondo questo criterio le forze di inerzia sono del tutto normali. L'aggiunta "apparenti" crea problemi non necessari a chi deve imparare: allora le forze di inerzia sono forze oppure no?

### *Origine:*

La denominazione forze apparenti è un esempio di uno dei tanti concetti obsoleti dell'età delle azioni a distanza. *Newton* non era ancora in grado di descrivere le interazioni gravitazionali in modo diverso perché non c'erano ancora i campi. Le forze si riconoscevano soltanto dall'azione sui corpi. Da una parte c'era il terzo principio, che ad ogni azione corrisponde una reazione uguale e contraria, e la reazione alle forze di inerzia non si riusciva a trovarla. D'altra parte l'evidenza di questa forza era tale che malgrado la mancanza della reazione non si poteva farne a meno. Dopo la creazione del concetto di campo, che *Newton* avrebbe accettato con sollievo, le forze non sono più una caratteristica dei corpi, ma del mezzo o del sistema che si trova tra i corpi: una corda, una molla, un gas o anche un campo. Il valore di una forza si riferisce ad una superficie. Questa può coincidere con la superficie esterna del corpo, e così otteniamo la forza che "agisce sul corpo" o che viene "esercitata" dal corpo. Ma questa superficie la possiamo mettere in qualsiasi altro posto tra i due corpi che interagiscono.

Il concetto di forza apparente ha perduto la sua ragione d'essere quando è stato creato il concetto di campo. Ancora più inadatto diviene con la teoria della relatività generale, secondo la quale forze di inerzia e forze gravitazionali sono solo due diversi nomi dello stesso oggetto. Localmente infatti non si possono distinguere le forze di inerzia da altre forze gravitazionali.

*Eliminazione:*

Si eviti il termine forze apparenti. Ma anche il termine forze di inerzia è superfluo.

*Friedrich Herrmann*

# 16

## Forza ed energia

### *Tema:*

Le formulazioni in cui compaiono le parole forza motrice o spinta come le seguenti: “La forza motrice che viene trasferita dal motore alle ruote, ...” oppure “un’auto che viaggia lentamente può essere accelerata dalla spinta del motore”.

### *Difetti:*

Nell’uso comune del linguaggio qualcosa che viene trasferito da A a B, si trova prima in A e poi in B. Le formulazioni sopra citate, che sono state prese da libri scolastici, non sono valide se usiamo la parola forza nel senso della fisica; neppure quando decidiamo di essere tolleranti. Le affermazioni diventano corrette quando la parola forza viene identificata con ciò che la fisica intende con energia.

### *Origine:*

Ora la fisica usa il nome forza per la grandezza  $F$ . Ma esiste una lunga tradizione in cui questa parola aveva significati diversi. Infatti indicava anche ciò che oggi chiamiamo energia – l’energia cinetica era “forza viva” – e anche ciò che oggi chiamiamo quantità di moto. La testimonianza di questo risulta dal dibattito sulla “vera misura per la forza” che si chiedeva se l’espressione  $mv$  oppure  $mv^2$  fosse la vera misura per la descrizione del movimento. Questa tradizione sembra così profondamente radicata anche nel linguaggio specialistico, che continua a venire adoperata la parola forza per la grandezza energia senza che l’insegnante o l’autore del libro se ne accorga. Il diffuso lamento che gli studenti non distinguono i concetti non dovrebbe essere rivolto a loro, perché ripetono soltanto quello che imparano da noi. Così anche i concetti di energia e forza, che prima abbiamo introdotto con cura, poi vengono pasticciati con leggerezza. Con quale pedanteria sottolineiamo la differenza tra densità e peso specifico e insistiamo su altre sottigliezze, mentre ci permettiamo confusioni quando si tratta di concetti veramente fondamentali, come nel caso di energia e forza!

### *Eliminazione:*

Si stia molto attenti ad usare il termine *forza* nel contesto dei fenomeni fisici solo come nome della grandezza fisica  $F$ .

*Friedrich Herrmann*



## Pressione e forza

*Tema:*

“La pressione in ogni punto all’interno di un liquido è uguale verso l’alto, verso il basso e di lato.”

*Difetti:*

La citazione proviene da un vecchio libro di fisica per i licei in molti volumi, ma esprime un problema che incontriamo anche in molti libri moderni, anche se non in forma così concisa.

La difficoltà sta nel fatto che abbiamo un bel daffare per distinguere tra le due grandezze forza e pressione.

Generalmente di solito si introduce prima la forza e poi la pressione come forza per unità di superficie. Il problema è come ricavare dal vettore forza e dal vettore superficie lo scalare pressione. Si sarebbe potuto introdurre la pressione come variazione di energia per variazione di volume:

$$dE = p dV .$$

In seguito non avremmo avuto problemi, mentre così invece li abbiamo. Se avessimo voluto coerentemente continuare con la forza per superficie, avremmo dovuto scrivere:

$$\vec{F} = \vec{\sigma} \cdot \vec{A} .$$

Qui  $\vec{\sigma}$  è il tensore degli sforzi meccanici. Nei liquidi e nei gas a riposo le uniche componenti diverse da zero del tensore sono le tre sulla diagonale che sono anche uguali tra loro, e si può quindi caratterizzarlo con un solo numero che viene chiamato pressione idrostatica.

Il tensore degli sforzi in generale non ha una forma così semplice, e questo dipende da un fatto familiare ad ogni persona comune: un oggetto solido può essere sottoposto a sforzi meccanici diversi e tra loro indipendenti lungo tre direzioni ortogonali. Ma quando questo non viene sottolineato diventa difficile rendere plausibile l’affermazione che la pressione nei fluidi sia omnidirezionale. Questa omnidirezionalità viene rappresentata come una cosa sorprendente. Ovviamente qui si è partiti dal presupposto che, come avremmo potuto immaginare, la pressione non fosse uguale in tutte le direzioni. Poi viene dimostrato che invece è così, e allora nasce l’impressione che questa aspettativa fosse illegittima, forse addirittura insensata /1/. Come sarebbe stato facile dire che in generale la pressione dipende dalla direzione! Ovviamente l’autore della nostra citazione si è ritrovato intrappolato tra vettori, tensori e scalari. La pressione uguale “verso l’alto” e “verso il basso” è una frase senza senso: un tensore distingue direzioni differenti, ma per ogni direzione non distingue i due sensi opposti. Non c’è una pressione verso l’alto e una verso il basso, ma una sola in direzione verticale. Questa potrebbe essere diversa da una in direzione orizzontale, ma questo non capita nei fluidi. Ovviamente “pressione verso il basso” e “pressione verso l’alto” vengono confuse con “forza verso l’alto” e “forza verso il basso”.

*Origine:*

La risposta è nella vecchia rappresentazione newtoniana delle forze che agiscono sui corpi. Quando si spiega la pressione attraverso la forza, si cerca anche un corpo su cui esercitare la pressione. L'aspettativa che la pressione abbia una orientazione è poi ovvia.

*Eliminazione:*

Si introduca la forza come una grandezza che si riferisce non ad un punto o ad un corpo, ma ad una superficie, quella appunto che limita il corpo /2/. Prima della pressione nei liquidi e nei gas si introducano gli sforzi meccanici nei materiali solidi, e si mostri che questi dipendono dalla direzione: cioè si possono assegnare in modo indipendente i valori degli sforzi lungo tre direzioni ortogonali. I liquidi e i gas sono casi particolari in cui i tre sforzi sono uguali tra loro e positivi /3/.

Si eviti la formulazione “la pressione su ...”. Si dica invece: la pressione in direzione verticale o orizzontale.

*Friedrich Herrmann*

/1/ A conferma di questo si può notare che nei libri italiani la citazione iniziale correttamente formulata come “la pressione in ogni punto all'interno di un liquido è uguale in tutte le direzioni” diventa il “principio di Pascal” NdT.

/2/ F. Herrmann: *Einige Vorschläge zur Einführung des Drucks* [Alcune proposte sull'introduzione della pressione]. *Praxis der Naturwissenschaften* 46, 1997, p. 37.

/3/ Un altro caso particolare importante è costituito dai campi elettrici e magnetici: qui i tre sforzi “principali” hanno tutti lo stesso valore, ma in direzione del vettore del campo lo sforzo è negativo, in direzione ortogonale positivo.

## Campi di forza

*Tema:*

“Solo l’esperienza ci può dire come sono fatte le forze che compaiono in natura, cioè da quali grandezze dipendono e come si esprime questa dipendenza. L’esperienza ci insegna che le forze importanti per la meccanica, quelle che agiscono sui punti materiali, possono dipendere dalla distanza e/o dalla velocità e anche dal tempo. In generale una forza sarà del tipo  $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r}, \dot{\vec{r}}, t)$ .” /1/

“In fisica il concetto di forza indica la capacità di cambiare il movimento di un corpo (la sua direzione o la sua accelerazione) oppure la capacità di deformato. Essa è una grandezza di campo.” /2/

“La forza è una grandezza vettoriale che dipende dalla posizione, cioè  $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r})$ .” /3/

*Difetti:*

Ognuno di noi fisici per forza deve passare attraverso la meccanica analitica. Lì impariamo tra le altre cose ciò che viene espresso dalla prima citazione: la forza dipende dalla posizione, dalla velocità e dal tempo. Inoltre questa frase contiene un’affermazione maggiormente precisata nelle altre due citazioni da Wikipedia: la forza è una grandezza di campo. Ma generalizzata in questo modo l’affermazione non è corretta. Perché?

Il valore di una grandezza fisica si riferisce sempre a qualcosa, cioè quando si dà un valore deve essere chiaro a che cosa si riferisce. Così ci sono grandezze che si riferiscono ad un punto, come la temperatura, la pressione o l’intensità del campo elettrico. Per altre grandezze i valori si riferiscono ad una superficie. A queste appartengono tutte le correnti e i flussi: l’intensità della corrente elettrica, la potenza (l’intensità della corrente di energia), il flusso magnetico e la forza stessa (la corrente della quantità di moto). Per altre ancora i valori si riferiscono ad una regione di spazio. Queste sono le grandezze estensive: massa, energia, carica elettrica, entropia eccetera. Inoltre per altre grandezze il riferimento può non essere semplice da stabilire, come per esempio per la resistenza elettrica.

Consideriamo ora la forza. In generale vale la relazione seguente tra le forze e gli sforzi meccanici (tra l’intensità della corrente di quantità di moto e la sua densità di corrente):

$$\vec{F} = \iint_S \vec{\sigma} d\vec{A}.$$

Lo sforzo meccanico è un tensore, l’elemento di superficie un vettore. Nel caso di una sbarra sottoposta ad un puro sforzo di tensione o pressione la relazione si semplifica in:

$$|\vec{F}| = \sigma \cdot A.$$

Qui  $\sigma$  è lo sforzo nella direzione della sbarra (l’unica componente non nulla del tensore degli sforzi). Abbiamo supposto che sia costante in tutta la sezione della sbarra.  $A$  è l’area di tale sezione.

Nei liquidi e nei gas in quiete le componenti del tensore degli sforzi sono uguali in tutte le direzioni e identiche a ciò che indichiamo con pressione. Vale la ben nota uguaglianza:

$$\vec{F} = p \cdot \vec{A} .$$

In questo caso la superficie di riferimento può essere orientata come si vuole. La forza ha sempre la stessa direzione della normale alla superficie.

Anche le forze mediate dai campi si possono calcolare come integrali sugli sforzi meccanici. Scegliendo la superficie di riferimento in modo tale da circondare completamente un corpo, otteniamo la cosiddetta forza “che agisce sul corpo”. Nel caso del campo elettromagnetico si parla del tensore degli sforzi di *Maxwell*. Queste considerazioni mostrano che quando si dà una forza bisogna dare sempre anche una superficie di riferimento. Questa constatazione è però in contraddizione con le precedenti citazioni che sostengono che le forze si riferiscono a punti. Il contesto delle definizioni che abbiamo citato è la meccanica analitica. Come fa essa ad introdurre i campi di forza? Di solito si comincia a descrivere i processi meccanici con il modello delle masse puntiformi. La meccanica del punto viene ampiamente trattata fino a perdere di vista che si tratta di un modello certamente molto utile, ma concettualmente abbastanza strano. Perché strano? Perché alcune grandezze della “normale” meccanica diventano infinite, o più precisamente, queste grandezze non ci sono più nella meccanica del punto: densità, densità di correnti e sforzi meccanici. La forza, il cui valore nella meccanica “normale” si riferisce ad una superficie che circonda completamente il corpo, ora agisce su di un punto. In conseguenza di ciò si può attribuire una forza ad ogni punto dello spazio con l’aiuto di un corpo di prova puntiforme. Si ottiene la funzione  $\vec{F} = \vec{F}(\vec{r})$  nota come “campo di forza”.

La forza che nella meccanica normale è una grandezza globale, diventa nella meccanica del punto una grandezza locale.

Ogni fisico sa che i campi di forza hanno un importante ruolo nelle teorie di *Hamilton* e di *Lagrange*, e che molti sistemi reali si possono descrivere con buona approssimazione come sistemi di masse puntiformi. Per questo si dimentica facilmente che definizioni come quelle citate in precedenza, non valgono in generale, ma sono fatte su misura per il concetto di forza della meccanica del punto. Dal punto di vista della meccanica normale, in cui la distribuzione delle masse è continua, sembrano piuttosto costruzioni patologiche, e ci si può chiedere come questi due concetti di forza possano indicare la stessa grandezza fisica.

#### *Origine:*

Per *Newton* la forza veniva ancora riferita ad un corpo. Il concetto di massa puntiforme ancora non esisteva. E dal momento che non c’erano ancora i campi *Newton* non poteva riferire la forza ad una sezione. Senza campi, niente da sezionare. Invece di riferire la forza ad una superficie, *Newton* la riferisce al corpo all’interno di questa. Nella impostazione delle correnti di quantità di moto potremmo esprimerlo così: invece di parlare del flusso in sé lo si riferisce alla sorgente.

La meccanica del punto, che raggiunse il culmine con *Lagrange*, *Hamilton* e *Jacobi*, e più tardi servì da quadro di riferimento per la meccanica quantistica, venne insegnata con tale naturalezza come la vera meccanica, da non accorgersi delle strane conseguenze del modello di corpo puntiforme.

#### *Eliminazione:*

Quando si introduce una nuova grandezza fisica, si deve indicare chiaramente a cosa si riferiscono i suoi valori. Un semplice esperimento fa vedere quanto ciò sia necessario: date agli studenti una lista di grandezze fisiche che essi abbiano imparato a conoscere, e chiedete di dire a che cosa ciascuna di queste grandezze si riferisce. Certamente riceverete parecchie risposte sbagliate.

Quando si ha a che fare con la meccanica hamiltoniana è meglio evitare di parlare di “campi di forza”. Il ben noto esempio della relazione

$$\vec{F} = Q \cdot \vec{E} \tag{1}$$

spiega per bene come ci si deve comportare con la forza. L'intensità del campo elettrico  $\vec{E}$  in questo caso è proprio una grandezza di campo, cioè i suoi valori sono distribuiti nello spazio. Possiamo quindi scrivere  $\vec{E} = \vec{E}(\vec{r})$ . Il “corpo di prova” con la carica  $Q$  ha però una estensione. Per poter applicare l'equazione (1) questa estensione deve essere piccola in modo da poter considerare l'intensità del campo omogenea in quella regione di spazio in cui verrà introdotto il corpo di prova. In tal caso  $\vec{F}$  è la forza esercitata sul corpo di prova. Il suo valore si riferisce ad una superficie che circonda il corpo, o nel linguaggio newtoniano al corpo medesimo.

*Friedrich Herrmann*

/1/ C. Schaefer, M. Päsler: *Introduzione alla fisica Teorica*. Verlag Walter de Gruyter & Co, 1970, S. 92.

/2/ Wikipedia: Parola chiave “forza”, dicembre 2006.

/3/ Wikipedia: Parola chiave “campi di forza”, dicembre 2006.



## La forza di richiamo

### Tema:

Per un oscillatore armonico meccanico, in cui un corpo si muove di qua e di là, la forza che agisce sul corpo è proporzionale all'allungamento. Dal momento che a questa affermazione viene data una grande importanza, spesso e, soprattutto nei libri di scuola, essa viene formulata come una regola da memorizzare. Ecco due esempi:

(1) “Una oscillazione meccanica libera è armonica *quando e solamente quando* la forza obbedisce alla legge lineare  $\vec{F} = -k \cdot \vec{s}$ , dove  $\vec{s}$  rappresenta lo spostamento dalla posizione di equilibrio.”

(2) “Definizione: un movimento periodico prodotto da una forza di richiamo per la quale vale una legge lineare della forma  $\vec{F} = -k \cdot \vec{s}$  si chiama oscillazione armonica.”

### Difetti:

1. Queste regole mettano in mostra una generalità a cui non hanno diritto: per quanto riguarda (1) ci sono anche oscillazioni armoniche libere per le quali la forza non è proporzionale all'allungamento ma invece il momento della forza all'angolo. Ma se non fosse per il “*quando e solamente quando*” questo difetto sarebbe del tutto trascurabile. Per quanto riguarda (2) una forza che è approssimativamente lineare agisce anche su di un pistone, che viene messo in moto avanti e indietro con una biella da un volano o da un motore.

2. Un teorema si presenta sempre con grande sussiego: “Quello che affermo è importante!”. Ma le affermazioni sopra citate non meritano questo riconoscimento di importanza. Osserviamo in primo luogo che per lo stesso oscillatore anche altre due grandezze sono tra loro proporzionali: la quantità di moto e la velocità. Le due relazioni  $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$  e  $\vec{F} = -k \cdot \vec{s}$  hanno dal punto di vista matematico un significato analogo. Esse caratterizzano completamente dal punto di vista fisico le due parti di cui è fatto il sistema: la prima il corpo e la seconda la molla. Per scrivere l'equazione differenziale non manca altro che la conservazione della quantità di moto.

Il fatto che ad una delle due proporzionalità viene dedicata una regola e all'altra no, può essere spiegato assumendo che la validità della prima relazione sia del tutto ovvia. Infatti, perché siano osservabili delle deviazioni da essa il corpo deve muoversi con velocità relativistica. Sarebbe quindi una pignoleria richiedere questa proporzionalità come condizione perché il moto sia armonico. E l'altra relazione? Quando presentiamo l'oscillatore come un sistema fatto di un corpo e di una molla, diventa ovvia anche l'altra relazione, perché a chi verrebbe in mente di tirare troppo la molla? Un buon metodo per considerare dalla giusta distanza un problema meccanico è tradurlo in un problema elettrico.

Di fatto anche un circuito elettrico oscilla in modo armonico solo quando per entrambi gli elementi costitutivi del circuito, il condensatore e la bobina, valgono due relazioni lineari:

$$Q = C \cdot U$$

e

$$n\Phi = L \cdot I.$$

Per ottenere l'equazione differenziale abbiamo bisogno, oltre a queste due, solo della conservazione della carica elettrica. In questo caso è particolarmente facile danneggiare la proporzionalità: Basta usare, o un condensatore elettrolitico o una bobina con il nucleo di ferro che la saturi. Ciononostante a nessuno viene l'idea di affermare: "Una oscillazione elettrica è armonica *quando e solamente quando* ..." E perché no? Perché tali affermazioni non meritano di essere chiamate "regole da memorizzare".

3. C'è proprio bisogno di un nome proprio per la forza che agisce su di un oscillatore? Non dovremmo di conseguenza usare un nome proprio dedicato anche per la tensione del condensatore di un circuito, per esempio "la tensione di scarica"?

*Origine:*

Queste affermazioni sono solo uno dei tanti esempi che dimostrano come la meccanica riceve sempre un trattamento speciale. La sua antica supremazia è sempre indiscussa.

*Eliminazione:*

In generale: si fa bene a non simulare rigore dove non se ne trova affatto. È bene sottolineare le affermazioni importanti, ma i "teoremi" che si danno solo delle arie sono disonesti.

In concreto: si faccia del teorema un corollario.

*Friedrich Herrmann*

## Frequenza propria e frequenza di risonanza

*Tema:*

Quando si trattano le oscillazioni forzate si fa notare che la frequenza di risonanza coincide solo approssimativamente e non esattamente con la frequenza propria del sistema risonante.

*Difetti:*

Non è troppo chiaro che cosa fare con questa affermazione. Sembra che la natura non sia riuscita ad organizzare le oscillazioni come sarebbe stato ragionevole. Inizialmente impariamo che si ha risonanza quando l'oscillatore va a tempo con l'eccitatore. Quello che si vede è che l'oscillatore oscilla con forza insieme all'eccitatore. Come per guastare il giocattolo viene fuori che la frequenza di risonanza e la frequenza propria non sono perfettamente accordate. Ma allora la rappresentazione che ci siamo fatti del fenomeno è ancora giusta? Si crea una situazione di disagio.

Questa discrepanza si risolve facilmente: risonanza significa sempre che l'energia assorbita e dissipata dall'oscillatore ha il suo massimo valore. Poiché

$$P = \vec{v} \cdot \vec{F}_0$$

questo massimo si trova nello stesso punto dell'asse della frequenza dove si trova anche il massimo della velocità (supponendo che l'eccitatore fornisca una forza di ampiezza costante; il ragionamento si svolge in maniera del tutto analoga quando l'eccitatore genera una velocità di ampiezza costante). Quindi il massimo dell'ampiezza della velocità si trova esattamente nel punto della frequenza propria  $\omega_0$ . E naturalmente il massimo dell'ampiezza della posizione si trova in un altro punto e il massimo del modulo dell'accelerazione ancora in un altro punto.

Da

$$x(t) = x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t)$$

segue

$$\dot{x}(t) = \omega \cdot x_0(\omega) \cdot \cos(\omega t) = v_0(\omega) \cdot \cos(\omega t)$$

e

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) = a_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) .$$

Quando il massimo del modulo della velocità  $v_0(\omega) = \omega \cdot x_0(\omega)$  si trova in  $\omega_0$ , in generale né il modulo della posizione  $x_0(\omega)$  né il modulo dell'accelerazione  $a_0(\omega) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega)$  hanno un massimo nello stesso punto. L'apparente posizione sbagliata del massimo di risonanza è dovuta al fatto di considerare la grandezza sbagliata. Possiamo rappresentare molte altre grandezze funzioni della frequenza e trovare che hanno il massimo in posizioni differenti. Ma sicuramente non si potrebbe concludere da ciò che il processo di risonanza avviene per una frequenza diversa a seconda della grandezza considerata.

*Origine:*

Siamo troppo abituati a considerare risolto un problema di meccanica quando abbiamo calcolato la traiettoria del corpo, cioè la posizione in funzione del tempo. Probabilmente è la nostra tendenza a porre in primo piano quello che vediamo con gli occhi.

*Eliminazione:*

Dobbiamo sempre ricordarci che in meccanica le grandezze più importanti sono quelle dinamiche, la quantità di moto e l'energia.

Non si definisca la risonanza per mezzo dell'ampiezza della posizione, cioè da quello che salta agli occhi. Non è il massimo dell'ampiezza della posizione a dirci che cosa è la risonanza, ma il massimo dell'energia assorbita dall'oscillatore.

*Friedrich Herrmann*

## Differenze di fase nelle oscillazioni forzate

### *Tema:*

Quando si trattano le oscillazioni forzate in meccanica si impara che in caso di risonanza la differenza di fase tra le coordinate spaziali del sistema forzante e del sistema oscillante vale  $\pi/2$ . Questo risultato viene considerato così importante da essere presentato come “teorema” o regola da ricordare, per esempio: “In caso di risonanza si instaura una differenza di fase di  $\pi/2$ ” oppure “in caso di risonanza il pendolo segue le oscillazioni del sistema forzante con un ritardo di un quarto di periodo”.

### *Difetti:*

1. Una differenza di fase si riferisce sempre a due grandezze che mostrano una dipendenza sinusoidale dal tempo. Nella regola non si dice che in questo caso una è la coordinata di posizione dell'eccitatore e l'altra quella dell'oscillatore. Si parla solo di coordinate di posizione, così che non ci viene neanche in mente di interrogarci sulla differenza di fase fra altre grandezze. Eppure ci sarebbero molte possibilità di farci domande su altre differenze di fase. Una di queste grandezze potrebbe essere, invece della posizione, la velocità o l'accelerazione o la quantità di moto dell'oscillatore, o anche la forza che agisce su di esso. Possiamo metterle assieme due a piacere e chiederci della corrispondente differenza di fase. Però la maggior parte di queste differenze di fase sono difficili da interpretare. Questo vale anche per la differenza di fase dei “teoremi” citati. Che cosa significa infatti che in caso di risonanza la differenza di fase tra le coordinate spaziali dell'eccitatore e dell'oscillatore vale  $\pi/2$ ?

2. Un oscillatore a molla nel quale vengono eccitate oscillazioni forzate è formato dalle seguenti parti: primo il corpo che oscilla, secondo la molla e terzo l'eccitatore. Dal momento che le oscillazioni sono smorzate, vogliamo dire chiaramente che introduciamo anche uno smorzatore come quarto elemento (nell'analogo sistema elettrico questo sarebbe la resistenza ohmica). Questi quattro elementi costitutivi possono essere combinati in vari modi, cioè il “circuito” meccanico può avere differenti topologie, come il suo corrispondente elettrico. Per precisare senza dubbi il comportamento dell'oscillatore bisogna anche decidere quali proprietà abbia la sorgente di energia, cioè l'eccitatore. Non basta dire che l'eccitazione è sinusoidale. Bisogna inoltre distinguere se, “girando la manopola della frequenza”, viene mantenuta costante l'ampiezza della posizione, della velocità o della forza o anche della corrente di energia, dal momento che a seconda di quale grandezza viene tenuta costante la curva di risonanza risulta differente. Tra tutte queste combinazioni possibili solo due fanno sì che il problema diventi particolarmente chiaro. Potremmo chiamarle le forme fondamentali dell'oscillatore:

- si collegano tutti e quattro gli elementi costitutivi in parallelo e, durante la scansione della curva di risonanza, si mantiene costante l'ampiezza della forza dell'eccitatore;
- si collegano i quattro elementi costitutivi in serie e si mantiene costante l'ampiezza della velocità dell'eccitatore.

(Anche nei circuiti elettrici oscillanti ci sono queste forme fondamentali. Nei circuiti in parallelo si mantiene costante l'ampiezza della corrente, in quelli in serie l'ampiezza della tensione.)

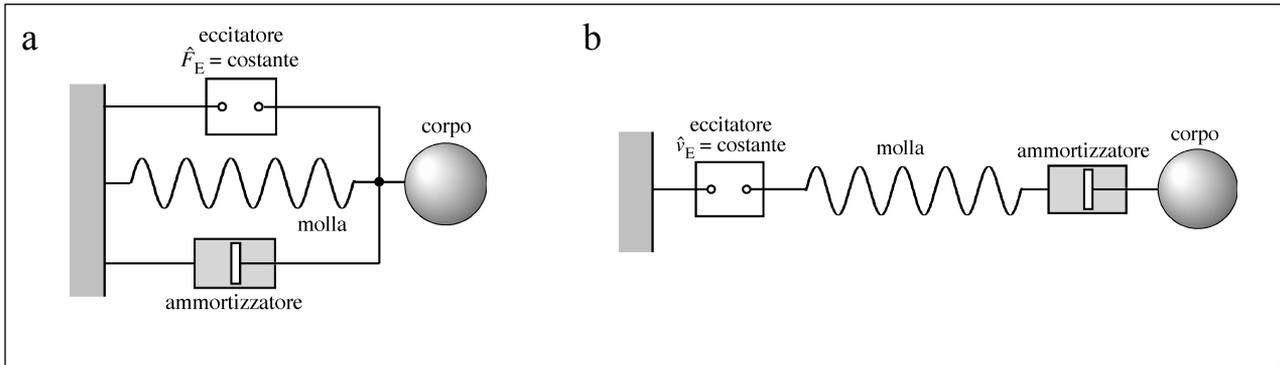


Figura 1. Gli oscillatori possono avere diverse forme topologiche: (a) oscillatore in parallelo con ampiezza di eccitazione costante; (b) oscillatore in serie con velocità di eccitazione costante.

Il “teorema” sulle differenze di fase che abbiamo citato non vale né per l’una né per l’altra di queste due forme fondamentali, ma per una forma mista di serie e parallelo. Di conseguenza anche l’interpretazione sulle differenze di fase è piuttosto difficile. Nel caso delle due forme fondamentali invece essa è facile. La discuteremo nel caso dell’oscillatore in parallelo.

Risonanza significa che la corrente di energia che fluisce dall’eccitatore all’oscillatore mediata nel tempo è massima:

$$P = \overline{v_E F_E}$$

con

$$v_E = \hat{v}_E \cos(\omega t)$$

e

$$F_E = \hat{F}_E \cos(\omega t - \varphi)$$

sarà

$$P = \frac{\hat{v}_E \cdot \hat{F}_E}{2} \cdot \cos \varphi .$$

In questa espressione in linea di principio tutti e tre i fattori, cioè  $\hat{v}_E$ ,  $\hat{F}_E$  e  $\cos \varphi$  possono dipendere dalla frequenza. Per l’oscillatore in parallelo (figura 1a) l’ampiezza della forza è costante, cioè indipendente dalla frequenza. Ciascuno degli altri due fattori ha un massimo per la frequenza di risonanza. In particolare per la

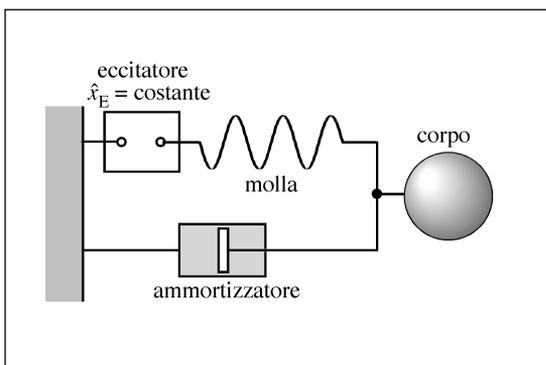


Figura 2. Forma mista di oscillatore, in parte in serie ed in parte in parallelo.

frequenza di risonanza è  $\cos\varphi = 1$  ovvero  $\varphi = 0$ . La velocità e la forza dell'eccitatore sono in fase. Questa affermazione è illuminante. Se si vuole eccitare un oscillatore nel modo migliore, cioè metterlo in risonanza, bisogna tirare o premere al massimo quando questo si muove più in fretta. Per l'oscillatore in serie (figura 1b) l'ampiezza della velocità non dipende dalla frequenza. L'ampiezza della forza  $\cos\varphi$  hanno un massimo per la frequenza di risonanza, e come per l'oscillatore in parallelo è  $\varphi = 0$ .

La topologia del circuito oscillante più spesso trattato in meccanica è quella della figura 2. Essa mostra che questo oscillatore è matematicamente equivalente ad un oscillatore in parallelo. In questo caso si prende una forza del tipo  $k \cdot \hat{x}_E \cdot \sin(\omega t)$ . In caso di risonanza questa forza e la velocità sono in fase come stabilito dal fatto che per l'oscillatore in parallelo la differenza di fase è nulla. Dal momento che la posizione dell'oscillatore è sfasata di  $\pi/2$  rispetto alla velocità ritroviamo l'affermazione citata all'inizio.

#### *Origine:*

Si veda il precedente articolo. Mettere al centro della trattazione le posizioni dell'oscillatore e dell'eccitatore rientra nella tradizione della meccanica, che considera risolto un problema quando si sia calcolata la dipendenza dello spostamento dal tempo, cioè quello che si vede con gli occhi. Ma si capisce meglio la meccanica quando si mettono in primo piano le variabili quantità di moto ed energia e i loro flussi. Che si dia la priorità all'oscillatore della figura 2 è forse giustificato dal fatto che esso è facilmente realizzabile in esperimenti quantitativi. La versione rotazionale di questo apparato è la popolarissima ruota di *Pohl*.

#### *Eliminazione:*

Vale la pena di considerare la relazione tra differenza di fase e frequenza dell'eccitatore soltanto quando questa venga anche interpretata. La differenza di fase tra forza e velocità è facilmente interpretabile. Il prodotto delle due è la corrente di energia dissipata nell'oscillatore. La differenza di fase uguale a zero garantisce che questo prodotto sia massimo per la frequenza propria dell'oscillatore.

*Holger Hauptmann*  
*Friedrich Herrmann*



## La pressione dinamica

*Tema:*

Per il moto stazionario e senza attrito di un fluido incompressibile vale l'equazione di *Bernoulli*:

$$p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \text{cost.}$$

Qui  $p$  è la pressione,  $\rho$  la densità del liquido,  $g$  l'intensità locale del campo gravitazionale,  $h$  l'altezza (positiva verso l'alto) e  $v$  la velocità. Con "cost" si intende che la somma a sinistra nell'equazione non cambia lungo una linea di flusso all'interno della corrente. Nel caso in cui i valori delle grandezze locali non cambino in una sezione della corrente, si può tralasciare la limitazione alle linee di flusso. Allora "cost" significa: ha lo stesso valore in ogni sezione.

L'equazione di solito viene interpretata nel modo seguente. Ci sono più tipi di pressione: la pressione statica  $p$ , la pressione del peso  $\rho gh$  e la pressione dinamica o pressione d'arresto  $(\rho/2)v^2$ . L'equazione di *Bernoulli* ci dice che la somma di queste tre pressioni è costante (nelle condizioni indicate).

*Difetti:*

In modo qualitativo ed espresso con parole questo è quanto afferma l'equazione di *Bernoulli*:

- la pressione è più piccola lì dove il liquido scorre più rapidamente piuttosto che là dove scorre più lentamente;
- la pressione aumenta verso il basso.

In queste affermazioni si parla di una sola pressione, e questa è la grandezza  $p$  che compare nell'equazione di *Bernoulli*. I termini  $\rho gh$  e  $(\rho/2)v^2$  hanno entrambi le dimensioni fisiche di una pressione, ma non sono ciò che intendiamo quando parliamo di una pressione. Non sempre i termini di una somma rappresentano la stessa grandezza fisica. Che  $\rho gh$  non possa essere la pressione dovuta al peso, lo si vede dal segno. Notoriamente questa aumenta verso il basso mentre il termine  $\rho gh$  al contrario aumenta con l'aumentare di  $h$ .

*Origine:*

Forse non c'è mai stata una situazione storica in cui fosse giustificata questa interpretazione dell'equazione di *Bernoulli*. Probabilmente l'interpretazione incriminata deriva dal desiderio o dal tentativo di rappresentare la pressione come una grandezza per la quale valga una specie di teorema di conservazione. Infatti la formulazione: "la pressione totale ... rimane costante" ci fa ricordare un certo modo di formulare i teoremi di conservazione: "In un sistema isolato la carica elettrica (oppure l'energia, la quantità di moto, il momento angolare) rimane costante." Tali teoremi sono molto eleganti, poiché da una parte sono facili da formulare e dall'altra hanno una validità molto generale. Anche la pressione, grazie a *Bernoulli*, potrebbe far parte della ristretta cerchia delle grandezze conservate. Inoltre ci potrebbe incoraggiare verso questo punto di vista il fatto che il teorema di *Bernoulli* può venir derivato dalla conservazione dell'energia.

Pensiamo che qui si tratta abbastanza male la pressione. In nessun caso possiamo farla diventare una grandezza conservata, dal momento che essa non soddisfa ad una condizione necessaria perché si possa parlare di conservazione o di non conservazione, cioè che si tratti di una grandezza estensiva, e la pressione certamente non lo è.

Si potrebbe obiettare che nessuno mi può proibire di chiamare il termine  $(\rho/2)v^2$  pressione dinamica, perché in linea di principio dare un nome non può essere né vero né falso. D'accordo, in linea di principio sì. Ma comunque la scelta di un nome può essere più o meno opportuna. E io penso che chiamare pressione quel termine sia un modo non adatto. La pressione è una delle grandezze più intuitive e facili da immaginare. Chiamare  $(\rho/2)v^2$  pressione avrebbe la conseguenza di dare l'impressione che la pressione sia una grandezza non intuitiva. E ricoprirla di incenso con l'aggettivo "dinamica" non fa che rinforzare questo effetto.

*Eliminazione:*

Si legga l'equazione di *Bernoulli* nel modo seguente: la pressione diminuisce, primo: quando aumenta la velocità, secondo: quando aumenta l'altezza. Entrambe le affermazioni sono di per sé illuminanti.

*Friedrich Herrmann*

## Perché volano gli aeroplani

### Tema:

Perché volano gli aeroplani non viene discusso solamente nei libri specializzati sulla meccanica dei fluidi. Viene descritto anche nei libri di fisica per la scuola e l'università e nelle pubblicazioni divulgative. Si trovano tutta una serie di spiegazioni differenti, in certi libri le une, in altri le altre, e in alcuni le une e le altre. Le più frequenti sono:

- la velocità della corrente sopra l'ala portante è più grande che sotto. Dall'equazione di *Bernoulli* risulta che la pressione sopra è minore di quella sotto;
- le molecole di aria vengono riflesse dall'ala. Il trasferimento di quantità di moto sotto l'ala è più grande che sopra;
- attorno all'ala si forma un flusso vorticoso. Ne risulta una componente della forza verso l'alto.

Tutte queste spiegazioni non si riferiscono a meccanismi differenti, ma sono solamente diversi modi di vedere lo stesso processo.

### Difetti:

Le spiegazioni spesso non sono comprensibili. In molti testi il lettore viene sopraffatto da dettagli e dal gergo tecnico: distacco dello strato limite, resistenza di forma, numero di *Reynolds*, angolo di attacco, coefficiente di spinta, circuitazione, vortice iniziale, viscosità, legge di *Stokes*, attrito di *Newton* e *Stokes*, equazione di *Bernoulli*, flusso turbolento.

Alcuni testi suggeriscono che dei processi sopra citati diversi contribuiscano indipendentemente alla spinta. Ho anche trovato un libro in cui si dice che le molecole al di sotto trasportano quantità di moto e *inoltre* al di sopra si stabilisce una depressione.

Ma il problema più importante che vogliamo qui discutere è il seguente: quando uno studente chiede perché volano gli aeroplani, che cosa considera come una risposta soddisfacente?

Secondo noi nessuna di queste spiegazioni rappresenta una risposta soddisfacente. Per dimostrarlo consideriamo una situazione diversa, che però ha qualcosa in comune con il volo degli aeroplani. Invece di chiedere: "Perché gli aeroplani non cadono a terra?" chiediamo: "Perché non cade a terra il vaso che è lì davanti a noi?"

Immaginiamo lo stesso fisico che prima ha usato l'equazione di *Bernoulli* per spiegare il volo degli aeroplani, per coerenza ora risponderebbe così: "L'oggetto, sul quale è posato il vaso, è elastico. Esso si comporta come una molla compressa ed esercita una forza sulla superficie inferiore del vaso." L'affermazione non è sbagliata, ma probabilmente è poco interessante per lo studente sapere chi esercita una forza sotto al vaso e perché. Analogamente per l'aereo. Quando uno sa come riesce l'aria a premere l'ala verso l'alto, probabilmente non ha l'impressione di aver capito la causa fondamentale del volo.

Adesso immaginiamo l'altro fisico, quello che ha usato l'urto delle molecole, ora potrebbe rispondere: "Il vaso non cade per terra poiché tra le molecole della superficie d'appoggio e quelle del vaso si stabilisce una interazione elettrostatica repulsiva". Anche questa risposta non sarebbe molto soddisfacente per lo studente. E anche la risposta basata sul trasferimento di quantità di moto non fornisce il tipo di conoscenza desiderata. Dobbiamo dunque ricorrere alla fisica atomica per capire il volo?

Apparentemente i fisici che abbiamo immaginato non hanno ben capito la domanda. Essi hanno tradotto la domanda originaria in un'altra, che permettesse loro di mostrare tutto quello che sanno. Cioè l'hanno trasformata in un esempio di applicazione di fisica atomica o del principio di sovrapposizione delle forze. Ma la vera critica a queste risposte sta nel fatto che non fanno alcuna affermazione sul ruolo del tavolo e delle gambe del tavolo. Quanto spesso noi insegnanti cerchiamo di sovrapporre un'altra domanda a quella che gli studenti hanno fatto; sia una domanda per la quale abbiamo la risposta pronta, sia una domanda che ci permette di dimostrare la nostra superiorità.

Prima di tornare al nostro aeroplano: perché non cade per terra un elicottero? A questa domanda la fisica dà di solito una risposta di tipo completamente diverso. Non dice niente di più di quello che direbbe una qualsiasi persona comune. La spiegazione di questo dilettante sarebbe molto semplice: l'elicottero vola perché soffia l'aria verso il basso. La fisica completa questa affermazione: l'aria deve essere spinta verso il basso poiché all'elicottero viene continuamente fornita quantità di moto dal campo gravitazionale, e il senso di questo vettore è verso il basso. Non dovendo accumulare questa quantità di moto (e di conseguenza cadere), l'unica possibilità che ha l'elicottero di sbarazzarsene è quella di trasmetterla all'aria.

Non è diverso per gli aeroplani. Essi devono perdere quantità di moto, e possono darla solo all'aria. Devono mettere l'aria in moto verso il basso. Proprio questo fanno la superfici portanti quando gli aeroplani volano orizzontali. La ragione per cui volano gli aeroplani non solo è la stessa per cui volano gli elicotteri, ma è anche la medesima per cui i paracadute non accelerano e scendono con velocità costante, nonché la ragione per cui soffiano i ventilatori. Si possono spiegare tutti questi apparecchi con *Bernoulli*, oppure con gli urti delle molecole o con la circuitazione. Tutti spingono l'aria verso il basso o in avanti e in questo modo trasferiscono la quantità di moto all'aria. Questa secondo noi è una spiegazione soddisfacente per chi non desidera diventare uno specialista in meccanica del volo.

#### *Origine:*

Quello che si trova in molti libri e testi scolastici per non specialisti sono pezzi mal digeriti del sapere specialistico degli ingegneri. Naturalmente è importante conoscere bene il campo aerodinamico quando si tratta di ottimizzare i profili d'ala. Naturalmente è importante separare un flusso in una parte priva di vortici e una priva di sorgenti per poter utilizzare la teoria del potenziale per il calcolo dei profili. Ma certamente questi temi non sono importanti per una formazione generale.

#### *Eliminazione:*

Ci si limiti alla seguente spiegazione: gli aeroplani devono mettere in moto l'aria verso il basso, come gli uccelli, gli insetti, gli elicotteri, i dischi del frisbee e i boomerang, e perfino come i paracadute, che devono sbarazzarsi della quantità di moto che continuamente ricevono dal campo di gravità. Questa quantità di moto viene presa con sé dall'aria che fluisce verso il basso e alla fine restituita alla Terra.

*Friedrich Herrmann*

## Scale provvisorie di temperatura

### *Tema:*

Quasi sempre si introduce la temperatura provvisoriamente attraverso la dilatazione termica delle sostanze, specialmente dei gas. Soltanto in seguito, e non sempre, viene definita una temperatura “assoluta”, cioè una grandezza  $T$  indipendente dalla sostanza termometrica. Questo per esempio si può fare esigendo che il rendimento di un ciclo di *Carnot*  $\eta$  tra le due temperature di lavoro  $T_+$  e  $T_-$  sia dato da  $\eta = (T_+ - T_-) / T_+$ .

### *Difetti:*

Osserviamo che, dal momento che tutti i gas rarefatti si dilatano nello stesso modo, possiamo definire una unica scala termometrica  $\Theta$  e dimenticarci di tutte le altre sostanze. Ora abbiamo a che fare con la definizione, l'uso e la mutua dipendenza di soltanto due temperature  $\Theta$  e  $T$ . Il risultato è  $\Theta \sim T$ , e, se si richiede che coincidano in un punto, per esempio nel punto triplo dell'acqua,  $\Theta \equiv T$ . La derivazione non è difficile, ma viene quasi sempre taciuta.

Ancora più facile è rinunciare del tutto alle scale provvisorie e ai cicli di *Carnot*, mettrizzare direttamente la grandezza entropia  $S$  e definire la temperatura  $T$  attraverso il flusso combinato di entropia  $I_S$  ed energia  $P$  attraverso un corpo:

$$P = T \cdot I_S.$$

Si dimostra senza alcuno sforzo che la grandezza  $T$  introdotta in questo modo ha tutte le proprietà abituali di una temperatura e la si misura con i soliti termometri. Per tarare la graduazione si può usare la proprietà, anche questa semplice da derivare, che per le sostanze la cui energia interna dipende solo dalla temperatura (i gas perfetti per esempio) la pressione deve essere proporzionale alla temperatura a volume costante, così che con tali sostanze termometriche si può misurare  $T$  attraverso  $p$ . La fisica delle macchine termiche e delle pompe di calore, quelle più semplici, si ricava come piovesse dal cielo. Bastano due, tre righe, le quattro operazioni, per fare quello che di solito richiede diagrammi di lavoro e calore, calcoli differenziali e integrali per funzioni di più variabili.

### *Origine:*

In questo caso i testi (anche quelli per le scuole) ripetono lo sviluppo storico della scienza. Il fatto che i termometri con il liquido sono sempre in uso dappertutto fa sembrare naturale l'introduzione attraverso la dilatazione termica. Nel caso della legge dei gas, che certamente rimane un importante obiettivo didattico, è ovvio che si tratti la scala termometrica ad essi relativa. Secondo l'opinione generale l'entropia è al di là degli orizzonti scolastici, e pertanto fuori dagli interessi e dal campo visuale di un insegnante.

*Eliminazione:*

Può funzionare soltanto se si abbandonano i pregiudizi contro l'entropia che sono stati coltivati per un secolo e mezzo e l'hanno ridotta al calcolo astratto di una complicata grandezza di stato, e le hanno tolto senza alcuna ragione tutte le proprietà che possiamo afferrare con i nostri sensi.

*Georg Job*

## La dilatazione termica

### *Tema:*

La dilatazione termica dei liquidi e dei solidi.

### *Difetti:*

Per variazioni di temperatura intorno a dieci gradi l'effetto è dell'ordine di grandezza del per mille. Di effetti di questo ordine di grandezza ce ne sono innumerevoli. In generale non ci si può permettere di trattarli nei corsi per principianti.

Un motivo per trattare questo tema potrebbe essere che ci sono fenomeni della vita quotidiana che si possono spiegare con la dilatazione termica dei liquidi e dei solidi. Effettivamente il funzionamento del termometro a mercurio si basa su questo fenomeno. Ma ci sono anche altri importanti modi di misurare la temperatura ai quali non dedichiamo tanto tempo.

Spesso la dilatazione di ponti e binari ferroviari viene citata come esempio della dilatazione termica dei corpi solidi. La trattazione di questi fenomeni ci sembra alquanto discutibile. Quando si spiega la dilatazione dei ponti, si dovrebbe seriamente spiegare anche perché la maggior parte degli altri oggetti non si dilata: le case, le strade, e sì l'intera Terra. E rispetto ai binari ferroviari si dovrebbe anche spiegare perché una volta fossero necessari gli intervalli tra elementi successivi dei binari e adesso non più, cioè perché una volta i binari si dilatavano e ora non più.

C'è un fenomeno che facilmente viene confuso con la dilatazione termica a pressione costante: la variazione termica della pressione a volume costante. Questo al contrario della dilatazione termica è un fenomeno grande e appariscente. Ma di fatto le variazioni di volume a pressione costante e quelle di pressione a volume costante vengono descritte da due costanti del materiale tra loro indipendenti. Anche se la variazione di pressione a volume costante è molto grande consigliamo di non trattarla nelle lezioni per i principianti per il semplice motivo della sua scarsa importanza nella vita quotidiana. Infatti per ogni tema di lezione dobbiamo giudicare se non ci sia qualcosa di più importante. E ce ne sono tanti di fenomeni importanti che non vengono trattati nelle lezioni. Per fare un esempio dalla termologia: il fenomeno molto significativo e ben noto ad ogni bambino che in alta montagna fa più freddo che nella bassa valle.

### *Origine:*

Il fatto che questo effetto così piccolo è diventato argomento delle lezioni ha una spiegazione molto semplice: si tratta di un residuo fossile del passato. Prima la dilatazione termica del mercurio era alla base della definizione della scala di temperature. Ma questa definizione ha da tempo lasciato il posto ad un'altra.

*Eliminazione:*

Si dedichi molto meno tempo a questo argomento. Anche se lo si eliminasse non sarebbe un danno.

*Friedrich Herrmann*

## L'equivalenza tra calore e lavoro

### Tema:

Il calore è energia disordinata dicono gli uni /1/, gli altri lo considerano energia cinetica del moto disordinato delle molecole /2/, i terzi energia cinetica e potenziale dell'agitazione termica delle molecole /3/, i quarti energia che si può fornire ad un oggetto attraverso il contatto termico /4/, i quinti una abbreviazione per l'espressione  $\Delta U - W$  /5/, i sestimi l'energia legata  $TS$  /6/, i settimi l'integrale  $\int TdS$  /7/, gli ottavi un concetto pieno di dubbi e superfluo /8/. Che cosa è veramente il calore?

### Difetti:

*Clausius* stesso usava due grandezze  $H$  e  $Q$  per il calore.  $H$  per il "calore contenuto" in un oggetto, che immaginava come energia del movimento delle molecole.  $Q$  per il "calore fornito" ad un oggetto, ma sottolineando che la relazione  $Q = \Delta H$  vale solo in casi eccezionali. Nelle precedenti definizioni di calore non è difficile riconoscere i discendenti di questi due genitori. La molteplicità delle opinioni proviene dal fatto sgradevole che non esiste una grandezza energetica, tale da rappresentare contemporaneamente tutti gli aspetti desiderabili del concetto di calore. Come nel caso di una coperta troppo corta, si è costretti a rinunciare all'una o all'altra proprietà. Il tipo di compromesso dipende da ciò che si vuole sottolineare. Il fatto che malgrado la molteplicità delle interpretazioni i calcoli risultanti sono sempre gli stessi permette di concludere che l'equivalenza formulata da *Clausius* è del tutto inutile per i calcoli termodinamici.

A che cosa serve dunque?

### Origine:

La domanda è antica come la fisica. La risposta data da *R. Clausius* nel 1850 con il suo primo principio della termodinamica, nel quale postula l'equivalenza tra calore e lavoro, è essenzialmente valida fino ad oggi, ma ovviamente si presta a molte interpretazioni.

### Eliminazione:

Rinunciando al primo principio della termodinamica, acquistiamo una nuova libertà. Non ne abbiamo bisogno per enunciare il teorema di conservazione dell'energia. E neppure per definire il calore. Il concetto di calore può essere facilmente "metrizzato" in modo diretto e fondamentale come si dice nella filosofia della scienza. Questa procedura viene per lo più utilizzata in fisica per la definizione delle grandezze di base come lunghezza, tempo, massa. Si fissa come viene stabilita l'uguaglianza dei valori e la scelta dell'unità e dei multipli. Inoltre in molti altri casi possiamo usare questa procedura e passare direttamente dal concetto alla rappresentazione della grandezza fisica. Come per esempio per la definizione di carica elettrica, quantità di sostanza, entropia, quantità di moto, momento angolare, oppure la metrizzazione di concetti come quantità di calore, quantità di dati, disordine o casualità.

Il risultato strabiliante è che il comune e ingenuo concetto di calore trattato con questa procedura non conduce ad una grandezza energetica ma direttamente alla entropia  $S$  di *Clausius*.

Le ipotesi seguenti e la scelta di una unità di calore sono sufficienti per metrizzare in modo univoco il concetto di calore:

1. ogni oggetto contiene calore, la cui quantità non può diminuire se lo teniamo ben isolato;
2. oggetti di ugual tipo e nello stesso stato fisico contengono la stessa quantità di calore;
3. il calore contenuto nell'oggetto composto da altri oggetti è la somma del contenuto di calore delle sue parti.

Arrivare quasi per gioco alla più importante grandezza della termodinamica (insieme alla temperatura) ci permette di sgombrare il campo da molti concetti inadeguati. Anche concetti come entalpia, energia libera, degrado dell'energia, grandezze di processo, funzioni di stato possono essere eliminati. Il fatto che un errore non nei calcoli di una scienza ma nella sua semantica abbia conseguenze così rilevanti, dovrebbe mettere in guardia i fisici teorici che si preoccupano solo dei calcoli, e preoccupare gli insegnanti di fisica che dovranno dannarsi l'anima occupandosi delle conseguenze.

*Georg Job*

/1/ F. J. Dyson: *What is heat?* Scientific American, 1954, p. 58.

/2/ R. W. Pohl: *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*. Springer, Berlin, 1962, p. 248.

/3/ C. Gerthsen, O. H. Kneser, H. Vogel: *Physik*. Springer, Berlin, 1986, p. 193.

/4/ C. Kittel: *Physik der Wärme*. Wiley, Frankfurt, 1973, p. 133.

/5/ M. Born: *Critical examination of the traditional production of the thermodynamics*. Physikalische Zeitschrift 22, 192, p. 218.

/6/ H. H. Steinour: *Heat and Entropy*. Journal of Chemical Education 25, 1948, p. 15.

/7/ G. Falk, W. Ruppel: *Energie und Entropie*. Springer, Berlin, 1976, p. 92.

/8/ G. M. Barrow: *Thermodynamics should be built on energy - not on heat and work*. Journal of Chemical Education 65, 1988, p. 122.

## Grandezze di stato

### Tema:

Quando si introduce la prima legge della termodinamica, spesso si sottolinea che l'energia interna è una grandezza di stato. Nel caso in cui si introduce l'entropia, di nuovo si insiste sul fatto che essa è una grandezza di stato. Più di recente, il termine grandezza di stato viene anche usato per la pressione, soprattutto nei testi scolastici.

### Difetti:

Il termine grandezza di stato venne introdotto per esprimere il fatto che una grandezza fisica in un certo stato ha un determinato valore. Però questo è vero per tutte le grandezze fisiche, con due sole eccezioni: calore e lavoro. Se si sottolinea solo per poche quantità il fatto che esse sono grandezze di stato, ne deriva l'impressione che l'essere delle grandezze di stato non è la situazione normale, ma bensì l'eccezione. Il fatto che una quantità in uno stato ben definito abbia un valore determinato è una proprietà che comunque ci aspettiamo soddisfatta. Se proprio vogliamo enfatizzare qualcosa, dovremmo invece sottolineare che ci sono due quantità, calore e lavoro, che non corrispondono alle ragionevoli aspettative.

### Origine:

Ci sono delle differenze tra l'energia interna, l'entropia e la pressione.

La prima formulazione matematica della conservazione dell'energia compare nella prima legge della termodinamica, che mette in relazione le grandezze di processo calore e lavoro con l'energia interna. Gli scienziati erano soddisfatti di far vedere che l'energia interna è una grandezza di stato, sottolineando che uno dei termini è una grandezza con proprietà normali. Sembrava veramente degno di nota il fatto che la somma di due grandezze non di stato risultasse invece una grandezza di stato.

Veniamo adesso all'entropia. Fin dagli inizi della termodinamica era sentita l'esigenza di introdurre una misura quantitativa per ciò che nel linguaggio comune viene chiamato calore. Era sottinteso che avrebbe dovuto essere una grandezza di stato. Alla fine del XVIII secolo *Joseph Black* introdusse tale quantità. Dal punto di vista contemporaneo la migliore interpretazione del calore di *Black* è l'entropia. Tuttavia, dalla metà del XIX secolo, venne ridefinito il termine calore come una delle così dette forme di energia, cioè come una grandezza di processo e non di stato. Da allora il calore di *Black* scomparì dalla fisica, fino a quando non venne reintrodotta da *Clausius* con il nome di entropia. Dal momento che *Clausius* definì l'entropia attraverso la grandezza non di stato calore, diventò importante enfatizzare che l'entropia è una grandezza di stato. Solo molto più tardi ci si rese conto che questa nuova grandezza entropia era essenzialmente identica al concetto di calore dei tempi di *Black* e *Carnot* [1, 2].

Il fatto che anche la pressione venga chiamata grandezza di stato ha ancora un'altra ragione. La pressione viene quasi sempre introdotta attraverso la forza. Una forza è sempre esercitata da un corpo su di un altro. La forza è chiaramente un concetto dei tempi in cui le interazioni meccaniche venivano interpretate come azioni a distanza. È del tutto naturale che gli studenti cerchino un corpo che eserciti la pressione, e un corpo sul quale la pressione sia esercitata. Per distoglierli da questa falsa aspettativa, si sottolinea che la pressione è

una grandezza di stato. Questa spiegazione è necessaria solo perché la pressione è stata introdotta in modo inadeguato fin dall'inizio /3/.

#### *Eliminazione:*

Soluzione minimalista: non si dica che l'energia interna e l'entropia sono grandezze di stato – questo dovrebbe risultare chiaro comunque – ma si sottolinei che calore e lavoro sono due costruzioni anomale, che non rientrano nello schema delle altre grandezze fisiche.

Soluzione massimalista: non si introducano affatto simboli e termini specifici per ciò che abitualmente chiamiamo calore e lavoro. La reazione iniziale di un insegnante è di sentire la mancanza di qualcosa di importante. Ma molto presto si scopre che non solo non manca niente, ma che allo stesso tempo si evitano alcuni problemi concettuali.

Si può tranquillamente omettere il termine “grandezza di stato” per la pressione. Invece di introdurre la pressione, che è una grandezza semplice da capire, attraverso una grandezza difficile come la forza, la si introduce come una grandezza a sé, per esempio cominciando con le differenze di pressione: una differenza di pressione è la causa di un flusso di aria o di acqua. Non c'è più alcun bisogno di ricordare che la pressione è una grandezza del tutto normale, una grandezza di stato. Il sospetto che essa possa essere differente non nasce proprio.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ H. L. Callendar: *The caloric theory of heat and Carnot's principle*. Proc. Phys. Soc., London, 23, 1911, p. 153:

*“Finalmente, nel 1865 quando la sua importanza (l'importanza del calorico) fu più completamente riconosciuta, Clausius gli diede il nome di “entropia” e lo definì come l'integrale di  $dQ/T$ . Questa definizione è buona solo per un matematico. Per rendere giustizia a Carnot dovrebbe essere chiamato calorico e definito direttamente dalla sua equazione..., che ogni studente può capire. Anche per un matematico sarebbe più utile pensare al calorico come un fluido, allo stesso modo dell'elettricità, capace però di essere prodotto per attrito o altri processi irreversibili.”*

/2/ G. Job: *Neudarstellung der Wärmelehre – Die Entropie als Wärme* [Nuova rappresentazione della Termodinamica – l'entropia come calore]. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main, 1972.

/3/ F. Herrmann: *Einige Vorschläge zur Einführung des Druckes* [Alcune cautele da prendere quando si introduce la pressione]. Praxis der Naturwissenschaften 5, 1997, p. 37.

## Entropia

### *Tema:*

Come entropia  $S$  si indica una grandezza che in termodinamica classica viene introdotta come una funzione astratta, definita attraverso un integrale. Il modo in cui viene introdotta conferisce alla grandezza  $S$  un carattere talmente avanzato, che gli stessi specialisti del settore fanno fatica nel trattare questo concetto. Nel frattempo si sono conosciuti altri modi più facili, che hanno avvicinato l'entropia alla portata delle lezioni scolastiche. Attualmente l'interpretazione di  $S$  come misura del disordine è l'impostazione più amata, in particolare tra i chimici, che per lo meno offre una comprensione approssimativa del suo significato.

### *Difetti:*

Che l'entropia diventi qualitativamente comprensibile è certamente un progresso, non però sufficiente alle esigenze di un fisico. Per lui la definizione di una grandezza è valida solo quando può dare un procedimento diretto o indiretto per la sua quantificazione. Disturba anche il fatto che alla grandezza definita in modo microscopico non può essere assegnata, a quanto pare, alcuna semplice proprietà macroscopica.

### *Origine:*

Nella prima metà del XIX secolo divenne, con crescente esperienza, sempre più chiaro che la conservazione del calore ipotizzata da  $S. Carnot$  e da altri non era più sostenibile. Ciò spinse  $R. Clausius$ , nell'anno 1850, a tentare una nuova sistemazione della terminologia basata sulla supposizione che calore e lavoro siano tra loro interscambiabili. Nel quadro di questa riformulazione  $Clausius$  costruì anche la grandezza  $S$ , per poter descrivere le restrizioni alle quali è soggetta questa reciproca trasformazione (di calore in lavoro e viceversa).

### *Eliminazione:*

In una conferenza solenne della Physical Society di Londra nell'anno 1911, il suo allora presidente  $H. Callendar$  /1/ fece notare che  $S$  non era altro che una complicata, astratta ricostruzione di quella grandezza che da  $Carnot$  era chiamata calore. L'unica differenza era che il calore poteva ora essere prodotto, ma non poteva mai, come già precedentemente, essere distrutto. Questa conoscenza arrivò però mezzo secolo troppo tardi per poterne correggere lo sviluppo. Si può però da ciò concludere che la grandezza  $S$  non soltanto debba possedere un analogo significato evidente, come prima il calore, ma che debba anche essere facilmente quantificabile.

In tal modo si ridurrebbe il fantasma formale  $S$  della termodinamica classica a un concetto comprensibile e maneggevole, adatto a studenti della scuola media e allo stesso tempo con questo diverrebbe possibile eliminare il conseguente superfluo arsenale di strumenti matematici. Questa aspettativa è stata confermata nel frattempo da molte esperienze scolastiche. Il ruolo del calore viene preso da  $S$ , che, anche con l'innominabile nome di entropia, diventa una grandezza appena un poco più esigente di lunghezza, durata, massa. Il suo ruolo come calore nella fisica macroscopica non è in nessun modo d'ostacolo, anche se tale grandezza si

presenta in informatica, in fisica statistica o nelle idee atomistiche di un chimico con una veste apparentemente piuttosto diversa.

*Georg Job*

/1/ H. L. Callendar: *The caloric theory of heat and Carnot's principle*. Proc. Phys. Soc. London, 23, 1991, p. 153.

## Microscopico e macroscopico

### *Tema:*

L'entropia viene generalmente considerata una grandezza fisica difficile. Essa diventa veramente comprensibile soltanto quando si sia fatta chiarezza sul suo significato microscopico. Cioè sia come una certa proprietà caratteristica di una distribuzione di probabilità, oppure, in modo un poco più efficace, come misura del disordine in cui avviene l'occupazione dei microstati di un sistema, oppure ancora come misura dell'informazione contenuta nei microstati.

### *Difetti:*

1. La termodinamica fenomenologica è una teoria, la termodinamica statistica è un'altra teoria.\* In fisica una teoria è una formulazione matematica di un determinato insieme di fenomeni naturali. Essa è un modello matematico di questo campo. Si possono inventare parecchie teorie per ogni gruppo di fenomeni naturali, che si distinguono per quali aspetti dei fenomeni ci restituiscono, e per la precisione con la quale li descrivono. In generale non capita che una teoria sia vera e l'altra falsa. Un esempio molto conosciuto riguarda le differenti teorie per la descrizione della luce. Una è l'ottica geometrica, l'altra l'ottica ondulatoria, una terza la termodinamica della luce, una quarta l'elettrodinamica quantistica. Ciascuna di queste teorie ha una sua legittimità. A nessuno verrebbe l'idea che non abbiamo più bisogno dell'ottica geometrica dal momento che abbiamo l'elettrodinamica quantistica. Può capitare che una teoria diventi del tutto inutile per la descrizione di un fenomeno. Non serve l'elettrodinamica quantistica per calcolare una lente. Ma anche l'ottica ondulatoria viene utilizzata in modo marginale nel progetto di una lente. Da questo punto di vista la termodinamica fenomenologica non è peggio della termodinamica statistica. È del tutto normale che per certi problemi serve la termodinamica fenomenologica mentre quella statistica no, e viceversa.

2. Si possono descrivere i fenomeni naturali secondo ordini di grandezza e livelli di complessità molto diversi. Ci si potrebbe aspettare che più si va verso il piccolo, più le cose diventino semplici. Si cerca l'indivisibile (l'atomo), l'elementare, le particelle puntiformi, ma poi si scopre sempre che il punto di arrivo si allontana sempre di un passo per ogni passo avanti verso il microscopico. Viceversa nella direzione del macroscopico non si trova maggiore confusione e minore visibilità come si potrebbe temere, ma dalla complessità nascono sempre nuove leggi semplici. Da queste considerazioni si può concludere che non è vero che la descrizione microscopica sia più fondamentale di quella macroscopica. Anche da questo punto di vista la termodinamica fenomenologica non è peggio o meno fondamentale della termodinamica statistica.

3. La termodinamica fenomenologica è molto più adatta della trattazione microscopica per introdurre i fenomeni termici che vengono trattati nelle scuole, o che almeno dovrebbero esserlo. L'entropia è una grandezza fisica molto intuitiva, purché venga introdotta in modo opportuno. Tenerne conto nelle applicazioni è così facile che anche un bambino ci riesce. E rapidamente si arriva ad una descrizione senza complicazioni, addirittura quantitativa dei più importanti fenomeni termici: capacità termica, conduzione del calore, cam-

---

\* Nel caso dell'interpretazione orientata verso la teoria dell'informazione, si tratta solamente di usare un altro linguaggio. La teoria essenzialmente è la stessa della termodinamica statistica.

biamenti di stato, macchine termiche e il loro rendimento. I tre cosiddetti principi della termodinamica diventano proprietà del tutto naturali.

4. A nessuno sarebbe venuto mai in mente di sostenere che si possono capire i processi fisici che avvengono in un circuito elettrico con una resistenza solo dopo aver capito il significato microscopico della resistenza specifica, vale a dire il meccanismo di interazione elettrone- fonone. A nessuno sarebbe venuto mai in mente di cominciare la meccanica trattando l'interpretazione microscopica e l'origine della massa, vale a dire il bosone di *Higgs*. La ragione microscopica per cui la massa di elettroni, dei quark e quindi dei protoni ha il valore che misuriamo non è ancora del tutto chiarita; e si potrebbe dire che lo stato della fisica è ancora del tutto provvisorio, fino a quando non ci sia una spiegazione per questi strani valori. Questo non ci impedisce di applicare la meccanica di *Newton* e rappresentarci la massa come una misura per l'inerzia e la pesantezza. Il valore della massa dell'elettrone viene semplicemente misurato, oppure lo si cerca in una tabella, senza chiedersi da dove viene e perché.

#### *Origine:*

Per molti ricercatori del XIX secolo l'idea di ricondurre tutto alla meccanica e al microscopico fu il programma scientifico, e allora c'erano buoni motivi per credere ragionevole questo programma. Tutto sembrava subordinarsi a ciò. La meccanica venne perfezionata e la sua teoria acquistò un vantaggio di cento anni sul resto della fisica. Così si andava a cercare la meccanica in tutte le manifestazioni della natura, e all'inizio questa ricerca ebbe grande successo. *Maxwell* considerava la sua elettrodinamica una teoria meccanica dell'etere. Con la teoria cinetica dei gas e la meccanica statistica i fenomeni termici vennero ricondotti alla meccanica. Sembrava che tutti i processi fisici potessero essere ricondotti alla meccanica, cioè al movimento e alle interazioni di piccole particelle elementari, e che questa fosse la spiegazione definitiva di tutti i processi naturali. Soltanto dopo il 1900 si vide che le teorie non meccaniche erano le più solide e che le descrizioni meccaniche contenevano molti aspetti fittizi.

#### *Eliminazione:*

Si introduca l'entropia nella terminologia allo stesso modo in cui si introduce la massa in meccanica: come una grandezza fisica direttamente misurabile, alla quale si collega un'idea molto semplice. Come la massa è una misura per l'inerzia e il peso, l'entropia è una misura per il calore contenuto nei corpi. Il concetto di massa così introdotto è una grandezza portante per tutta la meccanica classica fino al livello dell'università e di ampie parti della meccanica applicata. Ugualmente l'entropia introdotta in questo modo è una grandezza portante per tutta quanta la termodinamica classica fino al livello della fisica universitaria e di vaste aree di termodinamica applicata.

#### *Friedrich Herrmann*

## Calore ed energia interna

### *Tema:*

Se si fornisce calore ad un corpo allora il corpo conterrà più calore. Se è il corpo a fornire calore, alla fine ne avrà di meno. Una persona che non abbia studiato fisica certamente non farà obiezioni a queste affermazioni. Tuttavia la fisica ci insegna che esse sono scorrette: si può fornire calore ad un corpo, ma dopo esso non è contenuto nel corpo, e anche se il corpo non ne possiede, si può estrarre da esso calore. Sembra pura magia. Il cappello a cilindro è vuoto, ma da esso esce un coniglio. La fisica ci dice che fornire o estrarre calore non cambia il contenuto di calore di un sistema, cambia solamente l'energia interna o l'entalpia, a seconda di come viene fornito questo calore. Il fatto che l'energia non deve essere più chiamata calore non appena arriva nel corpo è molto di più di una semplice convenzione. Non esiste infatti alcun modo di dire quanto calore è contenuto in un corpo.

Questo sgradevole stato di cose viene espresso nei libri di testo in modi molto diversi. Alcuni autori lo dicono apertamente /1/. Altri rischiano dubbie giustificazioni, sostenendo che l'energia interna si può dividere in parti, tesi che però neppure loro sarebbero in grado di mantenere qualora venisse richiesto di quantificare tali parti /2, 3/. Talvolta calore ed energia interna vengono considerati identici /4/.

### *Difetti:*

Non riesco ad immaginare che anche un solo studente capisca perché è sbagliato dire che il calore fornito ad un corpo è contenuto in esso. Non riesco a ricordare neppure uno degli aspiranti insegnanti che fosse in grado di giustificarlo. Anche molti studenti universitari non saprebbero dare una spiegazione. Questa affermazione agli occhi degli studenti appare solo come un sofisma, oppure viene memorizzata come uno dei tanti argomenti che non si capiscono e che non è nemmeno necessario capire.

### *Origine:*

Il problema è la descrizione di processi per i quali è necessaria una misura della quantità di calore. Il "calore" dei fisici, essendo una "grandezza di processo", è poco adatto a questo scopo, così come lo sono l'energia interna e l'ancor più amata entalpia dei chimici.

### *Eliminazione:*

Essa è particolarmente semplice. Si descrivano i processi considerati con l'entropia. L'entropia corrisponde esattamente all'idea di calore di un non fisico. Se si riscalda qualcosa, si fornisce entropia, e dopo che l'entropia è stata fornita, essa rimane dentro. E' facile dare un valore alla quantità di entropia contenuta in un corpo, ed è ancora più facile valutare di quanto cambia l'entropia durante il riscaldamento del corpo.

*Friedrich Herrmann*

/1/ Galileo 9. Oldenbourg, 2000, p. 98: “Attenzione! Distinguate con cura tra calore, energia interna e temperatura. Un oggetto non possiede calore, ma energia interna!”

/2/ Spektrum Physik. Schroedel Verlag, Hannover, 2000, p. 17: “Sotto il titolo le parti di energia interna vengono specificate l’energia cinetica delle particelle, l’energia di interazione delle particelle, l’energia chimica e l’energia nucleare.”

/3/ Galileo 9. Oldenbourg, 2000, p. 93: “L’energia di un corpo che non si può descrivere come energia meccanica (cinetica e potenziale), viene chiamata energia interna. L’energia atomica, quella chimica e biologica appartengono tutte all’energia interna. Una porzione essenziale è anche l’energia legata alla temperatura del corpo.”

/4/ Metzler Physik. Metzlersche Verlagbuchhandlung, Stuttgart, 1988, p. 60: “I corpi fanno anche un lavoro d’attrito; quindi una parte di energia meccanica viene trasformata in un’altra forma di energia, dalla quale non può più essere riottenuta come tale, ma viene ceduta ad altre parti del sistema o all’ambiente circostante.”

## Misura dell'entropia

### *Tema:*

L'entropia, quando non viene addirittura tralasciata, viene introdotta in modo tale da dare l'impressione che si tratti di una grandezza i cui valori si possono ottenere solamente attraverso complicati calcoli matematici.

### *Difetti:*

L'entropia è, insieme alla temperatura, la più importante grandezza della termodinamica. Essa è la grandezza estensiva coniugata alla grandezza intensiva temperatura. Entropia e temperatura vanno insieme come carica elettrica e potenziale elettrico o quantità di moto e velocità. Le correnti di entropia dovrebbero avere lo stesso ruolo delle correnti elettriche in elettricità o delle forze in meccanica. Ma il modo tradizionale di introdurre l'entropia la priva di questo importante ruolo.

La prima volta viene spesso presentata come “funzione di stato” /1/. Perché si sottolinea addirittura che l'entropia è una funzione? Essa prima di tutto è una grandezza fisica e diventa funzione soltanto quando viene rappresentata la dipendenza dalle altre grandezze. Quindi questa dipendenza funzionale cambia a seconda della scelta delle variabili.

E perché viene sottolineato che sia una funzione di stato o una grandezza di stato? Tutte le grandezze fisiche estensive (e anche molte altre) sono grandezze di stato, ma questo fatto è così ovvio che normalmente non viene nemmeno accennato. È la mancanza di una rappresentazione intuitiva nel modo tradizionale di introdurre l'entropia che ci fa aggrappare a questa proprietà, che è proprio quella che non la distingue dalla maggior parte delle altre grandezze.

Il difetto più grande nell'introduzione abituale dell'entropia è appunto che non viene fornita alcuna procedura di misura. La complicata introduzione dell'entropia lascia l'impressione che la sua misura sia difficile, forse anche impossibile.

Di fatto l'entropia è una delle grandezze più facili da misurare. Si può misurare l'entropia con buona precisione con apparecchiature che si trovano in ogni cucina.

### *Origine:*

Nella prima metà del XIX secolo divenne, con crescente esperienza, sempre più chiaro che la conservazione del calore ipotizzata da *S. Carnot* e da altri non era più sostenibile. Ciò spinse *R. Clausius*, nell'anno 1850, a tentare una nuova sistemazione della termologia basata sulla supposizione che calore e lavoro siano tra loro interscambiabili. Nel quadro di questa riformulazione *Clausius* costruì anche la grandezza *S*, per poter descrivere le restrizioni alle quali è soggetta questa reciproca trasformazione (di calore in lavoro e viceversa).

### *Eliminazione:*

Non si tratta naturalmente di eliminare l'entropia o la sua misura, ma piuttosto il pregiudizio che essa sia difficile da misurare. Come si misurano le entropie? Formuliamo prima esattamente il compito della misura: vogliamo determinare la differenza di entropia tra 5 litri di acqua a 60 °C e la stessa quantità a 20 °C.

Cominciamo con l'acqua a 20 °C e riscaldiamola con un riscaldatore elettrico ad immersione fino alla temperatura di 60 °C. Rimescoliamo con cura in modo che la temperatura sia uniforme dappertutto, e misuriamo durante il riscaldamento la temperatura in funzione del tempo. La corrente di energia che fluisce dal riscaldatore all'acqua (la potenza) è nota.

Da  $dE = TdS$  segue

$$dS = \frac{dE}{T} = \frac{Pdt}{T} .$$

Un piccolo aumento di entropia  $dS$  lo si ottiene quindi semplicemente determinando il quoziente tra l'energia fornita  $dE = Pdt$  e la temperatura  $T$ . Dal momento che la temperatura varia durante il riscaldamento, per ottenere il valore di tutta l'entropia fornita, dobbiamo sommare o integrare i contributi parziali dalla temperatura più bassa a quella più alta.

Tuttavia se l'aumento della temperatura derivante dal riscaldamento è piccolo rispetto alla temperatura assoluta media  $\bar{T}$ , si può con buona approssimazione usare questo valore medio della temperatura, e ottenere:

$$\Delta S = \frac{P\Delta t}{\bar{T}} ,$$

vale a dire: l'aumento di entropia è dato dalla corrente d'energia del riscaldatore moltiplicata per il tempo e divisa per la temperatura media.

*Friedrich Herrmann*

/1/ Gerthsen, Kneser e Vogel: *Physik*. Springer Verlag, Berlin, 1977, p.183.

## La tendenza verso il minimo dell'energia

### *Tema:*

Quando si chiede il perché di un processo fisico, una risposta comunemente data è che attraverso tale processo il sistema raggiunge uno stato di energia minore. Ecco alcuni esempi:

- un pendolo si ferma nel punto più basso;
- una tavola galleggia piatta;
- la forma di una bolla di sapone è sferica;
- una spugna si riempie di acqua;
- la carica elettrica si distribuisce su di un conduttore;
- atomi eccitati di un gas emettono fotoni;
- ioni positivi e negativi si ordinano in un reticolo cristallino;
- i nuclei pesanti decadono.

### *Difetti:*

Tutte queste affermazioni, senza dirlo esplicitamente, partono dall'assunto che ogni sistema tende verso lo stato di energia minima, e anche lo raggiunge, se non intervengono circostanze che glielo impediscono. Detta però in questo modo l'affermazione è insensata. Se un sistema raggiunge uno stato di energia minima, allora il sistema complementare, l'ambiente circostante deve raggiungere uno stato di energia massima, a causa della conservazione dell'energia. Lo stesso ragionamento applicato all'ambiente porterebbe quindi a un risultato contrario. Perciò l'affermazione precedente non può essere valida in generale. Per quali sistemi è dunque valida? La risposta viene dalla termodinamica. Come ha dimostrato *W. Gibbs* nel 1873, il sistema per cui essa vale deve essere completamente isolato, eccetto che per la cessione dell'energia necessaria per mantenere costante l'entropia. L'entropia  $S_p$  prodotta durante i processi dissipativi all'interno del sistema, compare solo nell'ambiente circostante insieme all'energia  $T \cdot S_p$  che proviene dal sistema, dove  $T$  è la temperatura dell'ambiente. Dal momento che  $T$  e  $S_p$  sono sempre positivi, il sistema perde energia con continuità, poiché gli scambi che potrebbero compensare le perdite sono proibiti. Vista in questo modo, la tendenza verso lo stato di energia minima non è niente di più di una conseguenza del principio che l'entropia può essere prodotta ma non distrutta, applicato alla particolare classe di sistemi descritta in precedenza.

### *Origine:*

In meccanica è normale ignorare le proprietà termiche degli oggetti. Leve, carrucole, funi, molle e blocchi sono considerati cose che non si riscaldano, cioè la cui entropia e temperatura non possono cambiare. Infatti, senza dirlo, attribuiamo all'ambiente l'entropia prodotta dagli attriti, sia quella lì prodotta che quella là trasferita. In queste condizioni è consentito parlare di tendenza verso lo stato di energia minima. Lo stesso avviene in altre parti della fisica, nei sistemi idraulici, elettrici, e nella fisica atomica e dello stato solido. Il fatto di non menzionare la produzione di entropia come causa di questi processi, ci lascia con l'impressione di un principio naturale a sé stante.

*Eliminazione:*

Basta parlare esplicitamente della produzione di entropia. Come accade spesso, il nostro difficile rapporto con l'entropia ci induce erroneamente alla ricerca di discutibili surrogati. Il problema didattico fondamentale, dal quale derivano difficoltà senza fine e che si oppone ad ogni tentativo di rimediare, è la concezione di calore come una speciale forma di energia, che è stata accuratamente preservata per secoli e indissolubilmente ancorata al primo principio della termodinamica. Solo nella misura in cui siamo pronti ad una revisione del concetto di entropia potremo ottenere un miglioramento sostanziale.

*Georg Job*

## Il degrado dell'energia

### *Tema:*

L'opinione che il calore sia una forma di energia di valore inferiore è molto diffusa. La ragione è che, per la seconda legge della termodinamica, il calore si può trasformare solo in parte in lavoro. In confronto l'energia potenziale, cinetica ed elettrica conservano pienamente il loro valore, perché non hanno questa limitazione. La trasformazione di un'altra forma di energia in calore, dicono, ha come conseguenza una perdita di capacità di compiere lavoro e pertanto significa una svalutazione dell'energia.

### *Difetti:*

L'energia esiste in quantità sovrabbondanti, ma incontriamo grandi difficoltà a spremere queste ingenti riserve e rendere l'energia utile per i nostri scopi.

Uno dei 320 trilioni di chilogrammi di acqua contenuti nell'oceano Atlantico ha, per esempio:

- all'equatore circa 100 kJ di energia cinetica a causa della rotazione terrestre;
- rispetto allo zero della temperatura circa 700 kJ di energia termica;
- rispetto al centro della Terra circa 20 000 kJ di energia potenziale;
- circa 80 000 000 000 kJ di energia di fusione nucleare per la possibile trasformazione di idrogeno in ossigeno;
- circa 90 000 000 000 000 kJ di energia di riposo  $mc^2$ .

Tutte queste quantità di energia sono per noi inarrivabili e quindi senza valore. Le ragioni sono diverse. Per poter utilizzare l'energia cinetica dovremmo fermare il chilo di acqua rispetto alla rotazione terrestre. Quindi dovremmo estrarre la quantità di moto lineare o angolare, che sono indistruttibili, e trasferirle ad un corpo che non ruoti insieme alla Terra. Poiché un tale corpo non è disponibile, l'accesso a questa energia ci è precluso.

Per motivi analoghi non possiamo usare i 700 kJ di energia termica e i 20 000 kJ di energia potenziale. Per riuscirci dovremmo, come nel caso precedente, estrarre dall'acqua l'entropia, che è anch'essa indistruttibile, e trasferirla in un luogo alla temperatura dello zero assoluto e privo di entropia. Oppure portare la massa, sempre indistruttibile, dell'acqua nel punto assolutamente più basso possibile, cioè al centro della Terra. Entrambi sono in linea di principio immaginabili, ma falliscono poiché questi luoghi non sono disponibili o accessibili.

Non riusciamo ad ottenere i 80 000 000 000 kJ di energia di fusione perché non riusciamo a mettere in moto il processo di fusione dei nuclei. E neppure riusciamo a liberare i 90 000 000 000 000 kJ di energia di riposo, poiché la conservazione delle cariche barionica e leptonica ce lo impediscono.

Non c'è nessuna differenza fondamentale tra energia cinetica, potenziale e termica per quanto riguarda la loro utilizzabilità. Le prime due ci sembrano di maggior valore soltanto perché trascuriamo senza pensarci quelle parti che per noi sono inutilizzabili, mentre nel caso dell'energia termica siamo abituati proprio al contrario, a portarci sempre dietro questa zavorra della parte inutilizzabile nelle considerazioni e nei calcoli.

Un esempio: in un impianto per sfruttare l'energia delle maree l'energia fornita alle turbine è la differenza di energia potenziale tra l'acqua che fluisce dentro e fuori:

$$E = mgh_2 - mgh_1 .$$

In questo modo trascuriamo per ogni chilogrammo di acqua l'importante contributo di 20 000 kJ di energia potenziale non utilizzabili. Per le centrali termiche si fa diversamente. Invece della differenza tra l'energia trasportata dall'entropia che fluisce dentro e fuori,

$$E = ST_2 - ST_1$$

in questo caso consideriamo  $E = ST_2$  come energia disponibile per lo sfruttamento, anche se sappiamo già che il contributo  $ST_1$  non è utilizzabile nel caso che  $T_1$  sia la temperatura dell'ambiente. Questa doppia morale crea differenze dove in natura non ne esistono. Insomma, che la trasformazione di una qualsiasi forma di energia in calore sia l'origine della perdita di capacità di compiere lavoro, è una idea che non centra il punto essenziale. Per esempio il lavoro  $W$  che viene fornito a una macchina di *Carnot* fatta funzionare al contrario, per pompare la quantità di calore  $Q_1$  da un contenitore più freddo ad uno più caldo, compare insieme a  $Q_1$  come il calore  $Q_2$  nel secondo contenitore,  $Q_2 = W + Q_1$ . Il lavoro  $W$  viene completamente trasformato in calore, ma ciò nonostante può essere riottenuto senza perdite semplicemente invertendo il processo. Quale è dunque la vera ragione per cui dobbiamo mettere sempre a disposizione nuova energia, mentre la vecchia, che noi sappiamo che non può scomparire nel nulla, ci viene continuamente tolta? Che cosa fa diminuire il valore di utilizzo dell'energia, la cui quantità deve sempre rimanere la stessa?

La colpevole di questa apparente perdita di valore dell'energia è solamente l'entropia. Il fatto che essa può essere prodotta ma mai distrutta fornisce immediatamente un fondamento logico per questo stato di cose, senza che dobbiamo attribuire all'energia nessun altro tipo di valore se non il suo proprio in joule. L'entropia prodotta  $S$  in tutti i processi spontanei si accumula come una inevitabile "spazzatura", la cui raccolta e immagazzinamento nelle discariche alla temperatura  $T$  costa l'energia  $TS$ . Questa quantità di energia non è più a disposizione per altri scopi, e in questo senso rappresenta un'autentica perdita. Il trasferimento dell'entropia  $S$  dalla discarica in un deposito di stoccaggio definitivo alla temperatura quasi zero, renderebbe la quantità di energia  $TS$ , che prima abbiamo contato tra le perdite, di nuovo disponibile per qualsiasi scopo, e quindi del tutto in grado di produrre lavoro. Non è proprio il caso di parlare di certi cambiamenti nelle qualità dell'energia che ne diminuiscano il valore.

#### *Origine:*

Prima della dimostrazione della conservazione dell'energia attorno al 1850 si credeva ancora che il lavoro non potesse essere creato ma invece potesse essere distrutto (per esempio per attrito), e quindi le perdite di lavoro apparivano ovvie. Dopo invece non si riusciva più a capire questa esperienza quotidiana senza ulteriori spiegazioni. Il concetto di degrado dell'energia, interpretato da *W. Thomson* attorno al 1850 come diffusione dell'energia a livello atomico, contribuì a riempire questa lacuna alla meno peggio.

#### *Eliminazione:*

La nostra relazione ambigua con l'entropia fa in modo di possibilmente evitarla, e di descrivere con qualche costruzione *ad hoc* i fenomeni che cadono nel suo raggio di azione. Soltanto quando riusciremo a capire e adoperare l'entropia come una normale grandezza fisica, potremo sperare in un miglioramento permanente. La grandezza entropia da sola ci offrirebbe al meglio queste possibilità, se non ce le fossimo giocate per imperizia e cecità da addetti ai lavori.

*Georg Job*

## Il rendimento di *Carnot*

### *Tema:*

La causa del rendimento relativamente basso delle macchine termiche sta nel fatto che, in linea di principio, il calore può essere solo parzialmente trasformato in lavoro. La frazione di calore che nel caso ideale si può utilizzare come lavoro si chiama rendimento di *Carnot*. Se le temperature dei contenitori del calore in ingresso e in uscita sono  $T_2$  e  $T_1$ , questo vale  $\eta = (T_2 - T_1)/T_2$ .

### *Difetti:*

Ciò che qui compare come una peculiarità delle macchine termiche, non è altro che l'espressione di una particolare doppia morale. Per confronto consideriamo un esempio meccanico già usato dallo stesso *Carnot*: in un mulino, forse nella Foresta Nera, con una ruota di dislivello  $h_2 - h_1 = 5$  m e situata all'altezza sul livello del mare  $h_2 = 1000$  m, fluisce con ogni kg di acqua una energia  $m \cdot g \cdot h = 10$  kJ. Di questa quantità, in condizioni ideali, si può usarne solamente  $m \cdot g \cdot (h_2 - h_1) = 50$  J. Così il suo "rendimento di *Carnot*" diventa  $\eta = (h_2 - h_1)/h_2 = 0,005$ .

Lo stesso mulino alla foce del Reno, diciamo a un'altezza di 20 m sul livello del mare, avrebbe un rendimento di 0,25. Qui abbiamo calcolato l'energia potenziale generosamente rispetto al livello del mare. Paragonati ai circa 20 MJ di energia potenziale se la calcoliamo rispetto al centro della Terra, il risultato per il rendimento di entrambi i mulini risulta ancora più deprimente:  $\eta = 2,5 \cdot 10^{-6}$ .

Ci accorgiamo subito che qui qualcosa non va. Chiaramente il rendimento di *Carnot* non ha niente a che vedere con il mulino e neanche con la macchina a vapore, ma con la posizione effettiva dei due livelli rispetto ad un qualsiasi livello di riferimento fittizio. Viene attribuito all'oggetto sbagliato. Siamo così abituati a misurare i fenomeni termici e non termici con due tipi di grandezze diverse che non facciamo più caso alle contraddizioni.

### *Origine:*

*S. Carnot*, che mise nero su bianco le sue idee prima che venisse formulato il principio dell'energia, non sapeva ancora niente della grandezza  $\eta$ . Egli paragonò la macchina a vapore con il mulino ad acqua. Per lui il lavoro deriva proprio, come nel caso del mulino ad acqua, dalla differenza di "energia potenziale" del calore nei contenitori in ingresso e in uscita della macchina. Solo l'esigenza da parte di *R. Clausius* della parziale equivalenza tra calore e lavoro creò il bisogno di una tale grandezza.

### *Eliminazione:*

Questo concetto è tanto superfluo in termodinamica come lo è in meccanica. Una macchina termica, descritta come un "mulino ad entropia", è altrettanto banale come un "mulino ad acqua".

*Georg Job*



## Rendimento e fattore di *Carnot*

*Tema:*

Il rendimento di una macchina viene definito come il quoziente tra l'energia utile fornita dalla macchina e l'energia spesa per ottenerla:

$$\eta = \frac{\text{energia utile}}{\text{energia spesa}} .$$

Per una normale termoresistenza con questa formula si ottiene un rendimento di  $\eta = 1$ . Per una macchina termica si mette al numeratore di questa espressione proprio l'energia che proviene dalla sorgente di calore e fluisce dentro la macchina vera e propria. Nel caso della macchina ideale, cioè nel caso in cui non si produce entropia, otteniamo per rendimento il fattore di *Carnot*:

$$\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2} .$$

Per una pompa di calore si mette per l'energia ceduta nella forma desiderata proprio l'energia che lascia la pompa di calore alla temperatura alta  $T_2$ , e si ottiene:

$$\eta = \frac{T_2}{T_2 - T_1} .$$

*Difetti:*

Il rendimento viene definito in modo poco adatto, poiché da una definizione ragionevole del rendimento uno si aspetta che:

1. i suoi valori siano compresi tra 0 e 1;
2. una macchina ideale abbia rendimento uguale ad 1 (una macchina è ideale quando lavora in modo reversibile o in altre parole, quando in essa non viene prodotta entropia);
3. una macchina non ideale abbia rendimento minore di 1.

Nessuna di queste tre condizioni è soddisfatta dalla definizione del rendimento. La pompa di calore ha un rendimento maggiore di uno e questo viola la prima condizione. La macchina ideale di *Carnot* ha un rendimento minore di uno e questo viola la seconda condizione. La termoresistenza, un apparato totalmente irreversibile ed estremamente dissipativo, ha un rendimento uguale ad uno e questo viola la terza condizione.

*Origine:*

La definizione di *rendimento*, *efficienza* o *coefficiente di prestazione* accompagna il tortuoso processo di differenziare tra energia ed entropia, durato quasi cento anni. Non se ne trova traccia nel lavoro di *Carnot*, e probabilmente *Carnot* non avrebbe apprezzato la definizione che oggi è diventata comune. Ma l'abbiamo trovata già nel lavoro di *Helmholtz*, anche se non sappiamo con certezza se sia stato proprio *Helmholtz* ad introdurla.

Anche in passato la definizione è stata certamente una scelta infelice, ma si capisce perché è avvenuta. Da una parte non c'erano ancora le pompe di calore, cioè uno strumento che secondo la definizione fornisce un

rendimento maggiore di 1. Dall'altra non c'erano ancora le celle combustibili, e sembrava che in linea di principio l'unica possibilità di rendere utilizzabile l'energia della reazione tra carbone e ossigeno fosse di bruciarlo, cosicché non importava se il responsabile del basso rendimento delle macchine a vapore fosse la combustione o proprio la macchina stessa.

*Eliminazione:*

Si usi per il rendimento la seguente definizione:

$$\eta = \frac{P_{\text{ideale}}}{P_{\text{reale}}} .$$

$P_{\text{reale}}$  è il consumo di energia della macchina reale di cui si vuole valutare il rendimento,  $P_{\text{ideale}}$  è il consumo di energia della macchina o dell'apparato che ha le stesse prestazioni, ma lavora in modo reversibile, cioè senza produzione di entropia.

Per la macchina di *Carnot* che lavora in modo reversibile si ottiene  $\eta = 1$ , poiché essa è identica alla macchina ideale che ha le stesse prestazioni. Per la pompa di calore si ottiene sempre un valore di  $\eta$  che è minore o uguale a 1. Se la macchina lavora senza perdite, cioè senza perdite per attriti o nei conduttori elettrici e senza perdite di calore, allora è ideale e il suo rendimento sarà uguale ad uno. Nel caso in cui vi siano tali perdite,  $\eta$  sarà minore di uno.

Una termoresistenza fornisce una certa corrente di entropia (corrente di calore)  $I_S$  alla temperatura alta  $T_2$ . La macchina ideale corrispondente è una pompa di calore che fornisce la stessa corrente di entropia  $I_S$  alla stessa temperatura  $T_2$ . Essa riceve questa entropia dall'ambiente a temperatura  $T_1$ . Quindi il consumo di energia è

$$P_{\text{reale}} = T_2 \cdot I_S .$$

Il consumo di energia della pompa di calore che fornisce la stessa corrente di calore  $T_2 \cdot I_S$  è

$$P_{\text{ideale}} = (T_2 - T_1) \cdot I_S .$$

Per il rendimento otteniamo:

$$\eta = \frac{P_{\text{ideale}}}{P_{\text{reale}}} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} .$$

i.e.  $\eta$  è uguale al fattore di *Carnot*.

La termoresistenza spreca tanta più energia quanto più alta è la temperatura ambiente  $T_1$ . Infatti, quanto più alta è  $T_1$ , tanto minore sarà l'energia spesa per portare l'entropia dalla temperatura ambiente a quella desiderata, usando una pompa di calore. Sulla base delle stesse considerazioni, otteniamo come rendimento il fattore di *Carnot* per ogni altro riscaldatore che funziona in modo irreversibile, per esempio la fornace di un impianto a carbone. Così il "punto debole" di questo impianto non è la turbina, che è quasi reversibile, ma il funzionamento irreversibile della fornace.

La definizione che abbiamo usato è nota in termodinamica come "rendimento exergetico" /1/ o "rendimento di secondo principio". Esso viene introdotto come se si trattasse di un concetto avanzato. Proponiamo di usarlo fin dall'inizio e di chiamarlo semplicemente "rendimento".

*Friedrich Herrmann*

/1/ H. D. Baehr: *Thermodynamik*. Springer Verlag, Berlin, 1981, p. 142.

## Capacità termica e quantità di calore

### Tema:

La grandezza di processo che nel primo principio della termodinamica viene indicata con  $Q$  si chiama quantità di calore, oppure energia termica, o semplicemente calore. La capacità termica viene definita come il rapporto tra il calore fornito e il conseguente aumento di temperatura:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} .$$

Abitualmente si usa il “calore specifico”, ossia la capacità termica riferita all’unità di massa. Ma per i nostri scopi è sufficiente considerare la capacità termica non riferita all’unità di massa.

### Difetti:

Il problema si rivela già nel nome di questa “grandezza” della quale qui trattiamo l’accumulo. Quando si parla di quantità di calore o di energia termica nasce l’aspettativa che  $Q$  per qualunque oggetto si consideri, per esempio una tazza di tè bollente, abbia un valore determinato. Inoltre ci si aspetta che questo valore sia tanto più grande quanto più tè bollente c’è nella tazza, in altre parole che  $Q$  sia una grandezza di tipo sostanza. Di fatto il calore  $Q$ , come è definito in fisica, non ha queste proprietà.  $Q$  non è una normale grandezza fisica, ma una cosiddetta forma differenziale. Perciò è impossibile assegnare il calore contenuto anche se si conosce molto bene lo stato (per esempio nel caso di un gas). Quando si fornisce ad un sistema la quantità di calore  $\Delta Q$  non si può neanche dire che il contenuto di calore cambia della stessa quantità, ma bisogna limitarsi ad una formulazione abbastanza ermetica: fornire la quantità di calore  $\Delta Q$  ha come conseguenza l’aumento, di una quantità corrispondente, dell’energia interna. Sarebbe come se uno non potesse fare la seguente affermazione: “Io verso mezzo litro d’acqua in una bottiglia, perciò il contenuto di acqua della bottiglia aumenta di mezzo litro”, e invece sarebbe giusto dire: “Verso mezzo litro d’acqua nella bottiglia, perciò il contenuto di *liquido* della bottiglia aumenta di mezzo litro”. Sembra che si tratti di un sofisma, ma non è così. Il problema è avergli dato un nome non adatto: a  $\Delta Q$  non va bene un nome che suggerisce che la grandezza ha un carattere estensivo di tipo sostanza. Tutto sarebbe più facile se la forma differenziale non avesse né un proprio simbolo né un proprio nome. Non nascerebbero delle aspettative che poi non possono essere soddisfatte.

Dal momento che in linea di principio non si può assegnare alcun contenuto di calore, naturalmente non può essere definita alcuna capacità di contenere il calore. Perciò la grandezza  $C$  non può avere il significato di capacità termica.

Chi ha insegnato termodinamica sa quanto è difficile fare capire che  $Q$  non è una grandezza di stato. Attraverso l’imperizia di aver dato il nome di quantità di calore a  $Q$  e di capacità termica a  $C$  questi sforzi vengono annullati.

### *Origine:*

Come il nome *calore* anche la denominazione capacità termica viene dal XVIII secolo, cioè da un periodo in cui la grandezza di processo  $Q$  non esisteva ancora. Il nome veniva adoperato per una grandezza di stato estensiva che esprimeva proprio ciò che nel linguaggio comune si intende per calore. Quando fece il suo ingresso nella fisica l'energia, circa a metà del XIX secolo, la vecchia grandezza di stato venne privata del suo nome, e da allora per calore si intende una cosiddetta forma di energia. Poiché questa "non grandezza" ha la brutta proprietà di non avere un valore ben determinato in uno stato invece ben determinato, eufemisticamente si parla di una grandezza di processo.

### *Eliminazione:*

Si adoperi fin dall'inizio della termodinamica l'entropia. La si introduca come ciò che nella vita quotidiana viene chiamato quantità di calore. Di essa si può dire sempre quanta ne è contenuta in un sistema, e a questa si può assegnare una capacità /1/, cioè  $dS/dT$ .

Questa capacità di contenere entropia è collegata in modo semplice alla tradizionale "capacità termica":  $C = T dS/dT$ .

In questo modo la non grandezza  $Q$  diventa superflua.

### *Friedrich Herrmann*

/1/ La capacità entropica compare fuggevolmente in alcuni libri di fisica dello stato solido con il nome di costante di Sommerfeld: R. Kubo e T. Nagamiya: *Solid State Physics*. McGraw-Hill, New York, 1969, p. 94.

## Evaporare e bollire

### *Tema:*

L'acqua (come ogni altro liquido) può diventare vapore in due modi: può evaporare e può bollire.

Se si fornisce calore all'acqua, la temperatura aumenta. Quando viene raggiunta la temperatura di ebollizione, la temperatura non aumenta più. Non esiste un'analogia distinzione per il processo della liquefazione.

Ecco qualche commento tratto dai libri di scuola:

“Quando la pressione del vapore diventa uguale alla pressione di un altro gas che grava sul liquido, allora il liquido bolle. Poi il vapore non si sviluppa solo sulla superficie del liquido, ma anche all'interno; si formano le bolle di vapore.” /1/

“Un liquido bolle quando la sua pressione di vapore diventa uguale a quella dell'aria che grava sul liquido. La temperatura di ebollizione dipende quindi dalla pressione dell'aria.” /2/

“Bollire: durante l'ebollizione all'interno del liquido si formano delle bolle di vapore. Mentre il liquido bolle la temperatura non cambia.... Evaporare: anche con temperature sotto la temperatura di ebollizione continua a formarsi del vapore alla superficie del liquido.” /3/

### *Difetti:*

Non si trova alcuna risposta convincente alle seguenti domande ovvie:

1. perché il cambiamento di stato è lento per l'evaporazione ed invece rapido per l'ebollizione?
2. perché la temperatura dell'acqua non aumenta più dopo aver raggiunto la temperatura di ebollizione?

Però le risposte non sono difficili: la velocità del processo di evaporazione è determinata dalla rapidità con cui il vapore, che si è formato sulla superficie del liquido, si allontana verso luoghi in cui la pressione parziale è più bassa. Questo è un processo di diffusione e si sa che i processi di diffusione sono lenti. È ben noto che per accelerare il processo di trasportar via il vapore basta soffiare, cioè con l'aiuto della convezione. Nel caso dell'ebollizione, la velocità di formazione del vapore non è più limitata dalla diffusione. Poiché la pressione del vapore sulla superficie dell'acqua è uguale alla pressione atmosferica, il gas che si trova qui è puro vapore d'acqua, così che il trasporto non è più un processo di diffusione, ma diventa una corrente praticamente senza resistenza. Il vapore fluisce via senza impedimenti. Il rifornimento dipende soltanto dalla rapidità con cui l'acqua liquida viene riscaldata. Se forniamo entropia abbastanza in fretta al liquido, che ha una temperatura inferiore a quella di ebollizione, il vapore che si forma non è in grado di trasportarla via. L'entropia si accumula e la temperatura dell'acqua aumenta. Quando si raggiunge la temperatura di ebollizione questo collo di bottiglia non c'è più. Si forma vapore nella misura in cui riusciamo a fornire l'entropia necessaria a questa trasformazione. Questo vale anche quando la pressione atmosferica non è uguale ad 1 bar, cioè quando la temperatura di ebollizione non vale 100°C.

La formazione di bolle è un fenomeno molto appariscente, ma non è necessario per il processo di ebollizione. Infatti se si scalda il liquido dall'alto con una lampada infrarossa, esso comincia a bollire in superficie non appena viene raggiunta la temperatura di ebollizione, ma senza la formazione di bolle.

È certamente anche inadatto parlare della pressione che *grava* sul liquido. La pressione è una grandezza locale e non si può dire che la pressione di un sistema grava su di un altro. Quando si intende la pressione del gas che si trova sopra il liquido, sarebbe meglio non chiamarla pressione dell'aria. Più ci si avvicina alla temperatura di ebollizione meno ossigeno ed azoto troviamo nel gas sovrastante il liquido, fino a quando si raggiunge la temperatura di ebollizione ed il gas è composto di puro vapore d'acqua.

*Origine:*

Sembra che l'apparenza, cioè le bolle, impedisca di vedere la sostanza.

*Eliminazione:*

Non si può sperare di evitare di considerare la pressione parziale del vapore sulla superficie dell'acqua. Durante l'evaporazione essa è più piccola della pressione atmosferica. L'acqua che evapora può sfuggire solo attraverso il lento processo di diffusione. Durante l'ebollizione il gas sopra la superficie dell'acqua è puro vapore. Per questo trasporto non c'è più alcuna resistenza. Si spieghi la formazione di bolle, ma nello stesso tempo si spieghi anche che queste sono soltanto un indizio dell'ebollizione quando l'acqua viene riscaldata da sotto. La spiegazione diventa ancora più comoda quando si introduce il potenziale chimico, perché non soltanto il cambiamento di stato ma anche il processo di trasporto che ne consegue avviene a causa della spinta di una differenza di potenziale chimico.

*Friedrich Herrmann*

/1/ Gerthsen, Kneser, Vogel: *Physik*. Springer-Verlag, Berlin. 1977, p.189.

/2/ Sexl, Raab, Streeruwitz: *Das mechanische Universum*, Vol I. Moritz Diesterweg Verlag, Frankfurt, 1980, p. 205.

/3/ Gross-Berhag: *Physik*. Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart. 1996, p. 92.

## Il terzo principio della termodinamica

### *Tema:*

“Non esiste un processo che in un numero finito di passi riesca a raffreddare un corpo fino allo zero assoluto.” Questa è una delle possibili formulazioni del terzo principio della termodinamica.

### *Difetti:*

Perché ci sembra che questo principio sia degno di essere menzionato? Affermazioni di impossibilità di questo tipo ce ne sono moltissime. “Non esiste un processo che in un numero finito di passi riesca a vuotare completamente con una pompa una tanica piena d’aria”, “è impossibile vuotare completamente un piatto di minestra con un cucchiaino”.

Affermazioni di questo tipo le consideriamo banali e certamente non leggi di natura. Tutto diverso quando si tratta di entropia. Noi la impariamo normalmente soltanto in un travestimento così esoterico che diventa straordinariamente difficile comportarci con essa in modo disinvolto. Alle affermazioni sull’entropia viene dato un valore che non ha alcuna relazione con le sue semplici proprietà fisiche. Noi ci comportiamo con l’entropia con tale rispetto e ci mettiamo tanta metafisica dentro, che il paragone del terzo principio con il piatto di minestra da vuotare ci sembra irriverente. Ma le due affermazioni sono dello stesso tipo. La semplice analogia descrive il fatto molto più chiaramente di tutte le correnti formulazioni di questo principio.

### *Origine:*

Il principio risale a *W. Nerst*. La formulazione: “è impossibile privare una sostanza di tutta quanta la sua entropia” è del suo allievo *F. Simon*. Il principio riempie uno spazio lasciato vuoto dal secondo principio, precisando nel calcolo dell’entropia il valore della costante di integrazione.

### *Eliminazione:*

La stima per i creatori di questi principi non ci deve impedire di vedere le cose in modo prosaico. Il principio non va messo su un altare, ma nella cassetta degli strumenti di lavoro quotidiani.

*Georg Job*



## Entropia negativa e negentropia

### Tema:

In alcuni manuali di biologia o di altre discipline simili si trovano affermazioni in cui si parla dei valori negativi dell'entropia. "Gli organismi viventi producono in continuazione entropia positiva. Per evitare il degrado verso l'equilibrio termodinamico, essi hanno bisogno di rifornirsi continuamente di entropia negativa. L'unica fonte di entropia negativa a disposizione degli organismi viventi deriva dall'eccitazione dei pigmenti. Questa avviene attraverso quanti di luce. L'unica sorgente naturale di quanti di luce è il Sole."

Talvolta l'entropia negativa viene anche chiamata negentropia, ed essa, così dicono, è identica alla quantità di dati secondo *Shannon* (informazione).

### Difetti:

Tali affermazioni sono in parte contrarie a ciò a cui siamo abituati in fisica, in parte addirittura sbagliate.

1. Quando il valore di una quantità  $X$  in un sistema A aumenta e nel sistema B diminuisce, a causa di una corrente di  $X$  che fluisce fra A e B, possiamo esprimere questo fatto in due modi diversi: o si dice che una corrente di  $X$  positiva fluisce da A a B, oppure che una corrente di  $X$  negativa fluisce da B ad A. La teoria (più precisamente l'equazione di continuità) non ci permette di fare distinzioni tra questi due modi di dire. Solo nel caso particolare in cui al flusso possiamo associare senza equivoci una velocità, vale a dire quando possiamo scrivere la densità di corrente  $\vec{j}_X$  come prodotto della densità  $\rho_X$  per la velocità, cioè

$$\vec{j}_X = \rho_X \cdot \vec{v}$$

allora è consentito fare una tale distinzione.

Se infatti in qualche punto dove scorre la corrente la densità è negativa, allora possiamo ragionevolmente dire che della  $X$  negativa fluisce da B ad A. Se invece è positiva possiamo dire che fluisce  $X$  positiva da A a B. Ma questa distinzione non è veramente necessaria.

Ma se la grandezza  $X$  può assumere solo valori positivi, come avviene per la massa e per l'entropia, allora dire che fluisce  $X$  negativo da B ad A è semplicemente fuori luogo, poiché farebbe pensare a densità di massa o di entropia negative.

Quando si parla di entropia negativa come nella citazione iniziale, si ha naturalmente uno scopo preciso: voler attribuire al Sole il merito del non aumento dell'entropia. E qui si commette l'errore. Poiché, se si trascura il fatto che l'entropia negativa non esiste, allora si deve ammettere che il flusso di entropia negativa percorra le stesse vie, ma in direzione opposta, del flusso di entropia positiva, il quale certamente esce dal corpo. Poiché non c'è dubbio che dell'entropia positiva fluisca nell'ambiente, si potrebbe al massimo dire che dell'entropia negativa fluisce dall'ambiente negli organismi viventi. Quindi l'affermazione che dal Sole provenga entropia negativa è sicuramente sbagliata. Ma, poiché il sistema considerato è molto complesso, è molto facile che questo errore non venga notato.

Per rendere ancora più chiara la natura di tale sbaglio, trasferiamo l'affermazione ad un sistema il cui comportamento è più trasparente: al filo che porta corrente di un riscaldatore elettrico. La descrizione normale (e

giusta) del bilancio di entropia è la seguente: nel filo viene prodotta entropia. Questa lascia il filo e va nell'ambiente circostante. La spiegazione analoga secondo la citazione iniziale sarebbe: insieme all'energia elettrica viene fornita al filo anche entropia negativa. Questa viene compensata dalla produzione di entropia nel filo. Ma quest'ultima affermazione non è sicuramente corretta.

2. Quando si identifica la negentropia o l'entropia negativa con l'informazione o la quantità di dati, si commette un diverso tipo di errore. Ricordiamo che l'entropia  $S$  e la quantità di dati  $H$  vengono calcolate con la stessa formula:

$$S = -k \sum_i p_i \ln p_i \qquad H = -f \sum_i p_i \ln p_i .$$

Qui  $p_i$  è la probabilità di trovare il sistema nel microstato indicato dall'indice  $i$ ,  $k$  è la costante di *Boltzmann* e  $f$  un fattore numerico costante scelto in modo da misurare la  $H$  con l'unità di misura nota come bit. Tutte le grandezze, a parte il fattore costante, vengono valutate con lo stesso procedimento. Pertanto deve trattarsi della stessa medesima grandezza fisica. L'entropia di un sistema e la quantità di dati immagazzinata nei suoi microstati sono identiche a meno di un fattore costante.

Talvolta accade la seguente inversione che porta confusione: invece di dire che i dati sono contenuti o immagazzinati nel sistema considerato, si dice che  $H$  è il valore della quantità di dati che mancano all'osservatore. E si va anche un passo più in là: si dice non solo che *manca* la quantità di dati  $H$ , ma anche che l'osservatore *possiede* la negentropia  $N = -H$ .

Invece di attribuire al sistema il valore di  $H$  che abbiamo calcolato, prendiamo il valore negativo e lo assegniamo al sistema complementare, cioè all'ambiente oppure all'osservatore, che naturalmente è una parte di esso. Sarebbe come descrivere la massa di un oggetto nel modo seguente: l'ambiente circostante di questo oggetto ha la massa di  $-m$ . Si può portare avanti un tale modo di descrivere le cose, ma non c'è dubbio che sia molto scomodo.

#### *Origine:*

L'entropia negativa ha una lunga tradizione. Già *Peter Guthrie Tait*, studioso di termodinamica e amico di Lord *Kelvin* aveva pensato di introdurre l'entropia negativa ma poi rinunciò /1/.

Ma l'entropia negativa è veramente entrata in fisica con *Schrödinger*. Nel suo libretto quasi privo di formule del 1944: *Che cosa è la vita?* scrive: *“Che cosa è questa cosa preziosa nei nostri alimenti che ci protegge dalla morte? È facile rispondere. Ogni processo, ogni evento, ogni avvenimento, dategli il nome che volete, insomma tutto ciò che accade in natura significa aumento dell'entropia di quella parte del mondo in cui accade. Perciò gli organismi viventi aumentano continuamente la loro entropia – o, come potremmo anche dire producono una quantità positiva di entropia – e tendono allo stato ben temibile di massima entropia, che sarebbe poi la morte. Possono solo allontanarlo, cioè continuare a vivere, togliendo continuamente entropia negativa al proprio ambiente, un risultato molto positivo come vedremo subito. Il vero nutrimento dell'organismo è quindi l'entropia negativa. Oppure espresso in modo meno paradossale, l'essenziale del ricambio è che l'organismo riesca a liberarsi dell'entropia che, per restare vivo, deve produrre.”*

Queste affermazioni suscitarono resistenze tra i colleghi fisici. *Schrödinger* replicò in sua difesa, ma in modo abbastanza tiepido.

La denominazione negentropia fu introdotta da *Brillouin* nel 1956 /2/. Era il periodo in cui si pubblicava molto sui legami tra la grandezza termodinamica entropia e la quantità di dati da poco introdotta da *Shannon*. *Brillouin* considerava la sua idea così importante da chiamarla “Il principio della negentropia dell'informazione”. La confusione di *Brillouin*, come già spiegato, è quella di assegnare l'informazione all'osservatore e non al sistema per il quale l'abbiamo calcolata. Forse parte della responsabilità di questa sistemazione inadeguata è proprio il nome utilizzato per indicare questa grandezza: informazione.

Supponiamo di aver calcolato  $H$  per una memoria di computer (o per i microstati di un gas perfetto) e di aver trovato il valore  $H = x$  Mbit. Se chiamiamo informazione la grandezza  $H$  sicuramente ci viene da dire: “mi mancano  $x$  Mbit di informazione sulla memoria del computer o sui microstati del gas perfetto. Se invece chiamiamo  $H$  quantità di dati, diventa più adeguato un altro modo di dire: la quantità di dati contenuta nel computer o nel gas perfetto vale  $x$  Mbit. Usando il nome quantità di dati si attribuisce automaticamente il valore al sistema giusto.

*Eliminazione:*

1. Non c'è alcun bisogno dell'entropia negativa. Tutto è più chiaro quando ci si accontenta dei valori positivi.
2. Si assegni l'informazione al contenitore di dati o ai microstati termodinamici e non all'osservatore.

*Friedrich Herrmann*

/1/ P. G. Tait: *Sketch of thermodynamics*. Edmonston & Douglas, Edinburgh. 1868. p.100: “Sarebbe molto desiderabile avere una parola per esprimere il lavoro utilizzabile del calore contenuto in un dato termostato; un termine che indichi il possesso di ciò che, se viene sprecato, si chiama dissipazione. Sfortunatamente l'ottimo termine di entropia, introdotto da Clausius a questo proposito, viene da lui attribuito all'idea contraria a quella molto naturale che noi vorremmo esprimere.”

/2/ L. Brillouin: *Science and Information Theory*. Academic Press, New York. 1962. p. 152.



## Entropia e organismi viventi

### *Tema:*

I sistemi biologici sono sistemi nei quali si instaura spontaneamente un ordine elevato. Questo spesso viene considerato come un problema. Si potrebbe pensare, così dicono, che la nascita di organismi viventi contraddica il secondo principio della termodinamica, per il quale l'entropia di un sistema isolato non può diminuire. Di fatto, così poi spiegano, il secondo principio non viene violato, dal momento che i sistemi biologici sono sistemi aperti. La loro entropia può quindi diminuire se nel contempo l'entropia dell'ambiente aumenta.

### *Difetti:*

Il fatto che l'ordine di un sistema biologico aumenti spontaneamente viene prima considerato un problema, talvolta un paradosso, e poi l'enigma viene risolto: possiamo stare tranquilli tutto è a posto.

Il punto è che questo tema andava affrontato in uno stadio precedente, prima che diventasse un problema o un paradosso.

In effetti, per quanto riguarda il contenuto di entropia, i sistemi biologici non sono in nessun modo eccezionali. Per esempio un essere umano consiste per circa il 60% di acqua. A 25 °C l'acqua ha una entropia specifica di 3,9 J/(K·g), alla temperatura media del corpo qualcosa in più. Il resto è fatto essenzialmente da proteine, lipidi e carboidrati, la cui entropia per unità di massa non è molto diversa dagli altri composti organici condensati. Il suo valore è compreso tra 1 e 3 J/(K·g). Non è perciò difficile costruire un sistema di confronto non biologico, il quale però sia paragonabile agli esseri umani non solo per la massa, il volume e la temperatura, ma anche per l'entropia. In definitiva per quello che riguarda l'entropia i sistemi biologici non sono in alcun modo speciali.

Confrontando l'essere umano con un sacco di sabbia della stessa massa e temperatura media, per quanto riguarda l'entropia esso ottiene un risultato piuttosto mediocre. L'entropia della sabbia, che ha una struttura cristallina, vale solo circa 1/4 di quella dell'essere umano.

Inoltre durante la crescita di un sistema biologico l'entropia non diminuisce ma invece aumenta, poiché aumenta la massa del sistema. Quando un essere umano aumenta di 2 kg la sua entropia aumenta all'incirca di 4 kJ/K.

Perciò i valori dell'entropia non mostrano deviazioni significative per gli esseri viventi, come per altro avviene per i valori della massa e del volume.

### *Origine:*

Sono molte le ragioni che concorrono alla formazione di questo luogo comune. La prima è la connotazione non scientifica dell'entropia. Ovviamente si pensa, in relazione ai complicati processi degli esseri viventi, a comportamenti in qualche modo caratteristici anche dell'entropia. La seconda è l'ignoranza riguardo ai valori dell'entropia (che poi si trovano facilmente sulle tabelle o in rete). La terza è il tentativo di rendere intuiti-

va l'entropia attraverso il disordine, il che in linea di principio è giusto, ma che ovviamente non fornisce nessun metodo pratico per valutare l'ordine di grandezza dei suoi valori.

*Eliminazione:*

Si introduca l'entropia come la misura del calore, in modo che chi deve imparare possa avere una chiara rappresentazione dei valori di questa grandezza. Di conseguenza l'opinione che l'entropia dei sistemi biologici abbia qualcosa di particolare non si formerà neppure.

*Friedrich Herrmann*

## Radiazione termica

### Tema:

Ci occupiamo di tre affermazioni sulla radiazione termica che si trovano nei libri di testo e che da una parte sono contraddittorie e dall'altra semplicemente non corrette. Non necessariamente tutte e tre le affermazioni si trovano nello stesso libro.

1. La propagazione del calore avviene per irraggiamento, conduzione e convezione.
2. Al di là dell'estremo rosso dello spettro visibile si trova la regione della radiazione termica.
3. Il calore arriva dal Sole alla Terra con la luce del Sole, e l'effetto è l'aumento della temperatura del corpo dal quale viene assorbita.

### Difetti:

La radiazione elettromagnetica, perché è di questo che stiamo trattando, viene anche chiamata radiazione termica o radiazione infrarossa o calore radiante. Con questi nomi viene caratterizzato un ben determinato processo di produzione di radiazione elettromagnetica: quella emessa da un corpo che ha una temperatura diversa da zero. Ci sono anche altri processi di produzione di radiazione elettromagnetica. La radiazione corrispondente verrà chiamata non termica. Così le microonde di un klystron, la radiazione luminescente di un diodo semiconduttore o la luce di un laser non sono chiamate radiazione termica.

Per prima facciamo un'obiezione un po' banale, ma nonostante ciò importante contro una delle formulazioni citate in precedenza: la radiazione termica non è limitata alla regione infrarossa. La luce del Sole è radiazione termica, ma la maggior parte dell'energia viene trasportata nella regione visibile dello spettro. La radiazione cosmica di fondo è radiazione termica. Il massimo della sua energia si trova per una lunghezza d'onda di 1 mm nella regione delle microonde. All'interno di una stella troviamo radiazione termica nella regione dei raggi *Röntgen*.

Un difetto più grave ma più sottile ha a che fare con l'affermazione che la radiazione elettromagnetica trasporta calore. Per analizzare questa affermazione dobbiamo prima chiarire soprattutto che cosa intendiamo quando diciamo che in un certo processo viene trasportato calore, o energia in forma di calore. Con il nome di trasporto di calore in generale intendiamo un trasporto di energia che è accompagnato da un trasporto di entropia. La corrente di energia  $P$  e la corrente di entropia  $I_S$  dipendono l'una dall'altra attraverso la temperatura  $T$ :

$$P = T \cdot I_S . \quad (1)$$

In generale una corrente di energia avrà parecchie parti o sarà costituita da parecchie forme di energia: calore, lavoro, energia elettrica e chimica. Con calore indichiamo solamente quella parte che viene descritta dalla equazione (1).

Per decidere se la radiazione elettromagnetica è calore (o se lo è almeno in parte), si deve da una parte considerare le correnti di entropia, dall'altra bisogna conoscere la temperatura della radiazione. Per la radiazione nera da questo punto di vista non ci sono problemi. Diventa però sempre più difficile quanto più è selettivo il

radiatore, poiché diventa sempre più irriconoscibile la temperatura della radiazione. La situazione è più semplice per la radiazione emessa da radiatori non termici, come le microonde di un klystron o le onde elettromagnetiche di un'emittente radio. Qui la corrente di entropia è praticamente nulla e queste radiazioni non vengono chiamate trasporto di energia in forma di calore. Quando ci si occupa solo dell'effetto delle onde elettromagnetiche sul corpo che le assorbe, facilmente non si tiene conto del fatto che le cose sono così complicate. Esso viene semplicemente riscaldato.

Con questo arriviamo ad un errore evidente nelle formulazioni sopra citate. Il riscaldamento dell'assorbitore è del tutto indipendente dal fatto che la radiazione elettromagnetica trasporti calore oppure no. Esso si basa in primo luogo sul fatto che la radiazione trasporta energia, non importa in quale forma, e poi che questa energia viene dissipata nel corpo che l'assorbe. Una radiazione del tutto "priva di entropia" emessa da un radiatore non termico, ha come conseguenza lo stesso riscaldamento di un radiatore nero, a condizione che entrambe trasportino la stessa quantità di energia, e che questa venga completamente dissipata.

La situazione è in linea di principio la stessa, ma forse un po' più chiara per altri tipi di radiazione. Per esempio consideriamo il suono. Anche l'oggetto che assorbe il suono si riscalda, e questo riscaldamento dipende solo dall'energia trasportata, ma non dal fatto che il suono trasporti calore oppure no. Infatti per il suono entrambe le situazioni sono possibili. Un'onda sonora piana "monocromatica" non trasporta alcuna entropia, e quindi nessun calore. Invece il suono termico, cioè i fononi che vengono emessi da un corpo caldo e assorbiti da uno più freddo, trasportano calore. Questo è il meccanismo della conduzione termica.

Concludendo possiamo dire che dal riscaldamento per assorbimento di radiazione non si può desumere un trasporto di calore da parte della radiazione.

Di fatto, proprio nei casi che vengono usati a favore della tesi del riscaldamento (la luce solare o la radiazione infrarossa emessa da un corpo incandescente), molta più entropia viene prodotta nel processo di assorbimento di quella trasportata dalla radiazione.

Se il diventare caldo dell'assorbitore non è una prova che la radiazione trasporta calore, esiste un altro semplice indicatore del fatto che la radiazione elettromagnetica trasporta entropia: il diventare freddo della sorgente. Quando un corpo caldo, che non ha nessun collegamento con l'ambiente, si raffredda, anzi quando la sua entropia diminuisce, questo corpo deve aver ceduto entropia. Poiché per il secondo principio l'entropia non può essere distrutta, l'unica possibilità per una diminuzione di entropia rimane cedere l'entropia con la radiazione elettromagnetica. Tuttavia questa esperienza non viene fatta così spesso e in modo così significativo come il riscaldamento di un corpo per assorbimento di radiazione elettromagnetica.

#### *Origine:*

L'irraggiamento è stato studiato molto prima che si fosse in grado di riconoscere che la natura della radiazione era la stessa della luce, e prima di aver capito la relazione tra energia e calore. Il termine "calore irraggiato" proviene probabilmente da *Scheele* /1/. *Pictet* /2/ sosteneva ancora nel 1790 che non solo la luce ma anche il calore compare da solo. In particolare credeva di aver dimostrato che la luce della Luna non era accompagnata da calore. Nei primi decenni del XIX secolo si formò la convinzione della identità tra radiazione luminosa e termica. Per una risposta definitiva c'era ancora bisogno di due grandi teorie: l'elettrodinamica di *Maxwell* e la termodinamica statistica della luce di *Planck* /3/.

#### *Eliminazione:*

Non si dica che il trasporto di calore è caratteristico della radiazione infrarossa.

Della radiazione elettromagnetica, per esempio quella del Sole, si dica che trasporta energia, ma non che trasporta calore. Con questa frase abbiamo già spiegato tutto in merito al calore prodotto per assorbimento. Però è importante parlare dell'entropia trasportata nel caso in cui vogliamo sapere l'efficienza di una mac-

china termica che produce energia elettrica dal calore solare, e può cedere l'entropia solo con il calore. Per giustificare che la radiazione elettromagnetica trasporta entropia e quindi calore, non si citi il riscaldamento dell'assorbitore, ma invece il raffreddamento del radiatore.

Il fatto che i corpi caldi emettono radiazione elettromagnetica va detto preferibilmente senza indicare con troppa precisione il tipo di radiazione (irraggiamento di calore, radiazione termica). Se proprio ci si tiene, invece che alla radiazione, si può dare un nome al radiatore: radiatore termico oppure corpo caldo radiante.

*Friedrich Herrmann, Peter Würfel*

/1/ E. Mach: *Die Prinzipien der Wärmelehre*. Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig, 1919, p. 126.

/2/ M. A. Pictet: *Essai sur le feu*, Genève, 1790.

/3/ M. Planck: *Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung*. Johann Ambrosius Barth Verlag, Leipzig, 1913, p. 126.



## Clima marittimo e calore specifico dell'acqua

*Tema:*

Appartiene alla cultura generale fisica che i miti inverni e le fresche estati dei paesi vicini alle rive del mare siano causati dal fatto che il calore specifico (ossia la capacità termica per unità massa)  $c$  dell'acqua è eccezionalmente alto, così che la temperatura non cambia molto nel corso dell'anno.

*Difetti:*

Come mai qui confrontiamo la capacità termica di 1 kg delle sostanze e non di 1 m<sup>3</sup> o di 1 mol? In questo caso non è ragionevole considerare né la capacità termica riferita alla massa  $C/m = c$ , né quella riferita al volume  $C/V = cQ$ , tutt'al più quella riferita alla superficie  $C/A = cQh$ , dove  $A$  e  $h$  indicano la superficie e lo spessore efficace dello strato in cui avviene lo scambio di calore. Potremmo considerare  $h$  uguale alla profondità a cui arrivano le variazioni di temperatura dovute alle stagioni.

Per valutare  $h$  consideriamo il calore  $Q$  che durante il mezzo anno estivo  $J/2$  viene assorbito attraverso la superficie, e cioè – in modo molto approssimativo – considerando costanti la conducibilità termica  $\lambda$  e la diminuzione di temperatura  $\Delta T/h$  nello strato:

$$Q \approx \frac{1}{2} \cdot J \cdot A \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{h} .$$

D'altra parte possiamo valutare approssimativamente  $Q$  dalla capacità termica  $C = cQhA$  e dal salto medio di temperatura  $(1/2)\Delta T$  dello strato considerato:

$$Q \approx c \cdot \rho \cdot h \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{2} .$$

Eguagliando e risolvendo rispetto ad  $h$  otteniamo:

$$h \approx \sqrt{\frac{\lambda J}{c\rho}} \quad \text{e perciò} \quad \frac{C}{A} \approx \sqrt{\lambda c\rho J} .$$

Nella tabella che segue sono riportati i valori per le sostanze rilevanti nel discorso sul clima, ed essi mostrano che l'acqua in questo confronto ottiene uno scarso risultato. L'azione dell'acqua sul clima diventa comprensibile soltanto quando pensiamo ai moti convettivi. Attraverso la circolazione dell'acqua lo scambio di calore nel mare coinvolge strati molto più grandi dei 2 m che abbiamo calcolato, e che 1 m di precipitazioni all'anno (dato non strano per l'Europa) porta uno scambio di calore in grado di cambiare di 10 K la temperatura di uno strato spesso 60 m. Il fatto che l'acqua è liquida e volatile è ovviamente la caratteristica importante, e non la sua elevata capacità termica, che a causa della bassa densità e della bassissima conducibilità non provoca un effetto significativo.

	$\rho$	$\lambda$	$C/m$	$C/V$	$C/A$	$h$
	Mg m <sup>-3</sup>	J m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	kJ kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	MJ m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	m
acqua	1,0	0,6	4,2	4,2	9	2
granito	2,8	3,6	0,8	2,3	16	7
basalto	2,9	2,1	0,9	2,5	13	5
sabbia fine <sup>1</sup>	1,6	1,1	1,0	1,7	7	5
sabbia terrosa <sup>2</sup>	2,0	2,3	1,3	2,5	14	5

<sup>1</sup> grana fine con 0,07 g/g umidità; <sup>2</sup> argillosa, dilavata, grana fine con 0,14 g/g umidità.

### *Origine:*

Noi facilmente cediamo alla tentazione di dedurre una relazione causale da una corrispondenza evidente, e questo a maggior ragione quando ci viene suggerito dagli specialisti. Una volta adottata, la spiegazione convince per la sua semplicità e sopravvive poiché è troppo difficile da confutare.

### *Eliminazione:*

Tollerare per cortesia questi modi di deduzione, che sono molto più diffusi di quanto vorrebbe la fisica, non basta per eliminarli, e quindi bisogna esigere maggiore rigore.

*Georg Job*

## La trasmissione del calore attraverso l'atmosfera

*Tema:*

L'atmosfera è quasi completamente trasparente alla luce del Sole. Perciò la luce del Sole viene assorbita quasi solo dalla superficie della Terra e non dall'atmosfera. Invece per la radiazione infrarossa emessa dalla Terra l'atmosfera è quasi completamente non trasparente. La radiazione infrarossa che proviene dalla Terra (vista dallo spazio), viene emessa soltanto dall'aria ad altezze molto grandi chiamate "altezze di emissione". L'energia corrispondente arriva dalla superficie terrestre attraverso vari meccanismi di trasporto, che sono rappresentati per mezzo dei diagrammi di flusso dell'energia nella figura 1. Non passa inosservato il fatto che tra l'atmosfera e la superficie terrestre fluiscono due correnti di energia radiante di importo maggiore di quella che proviene dal Sole.

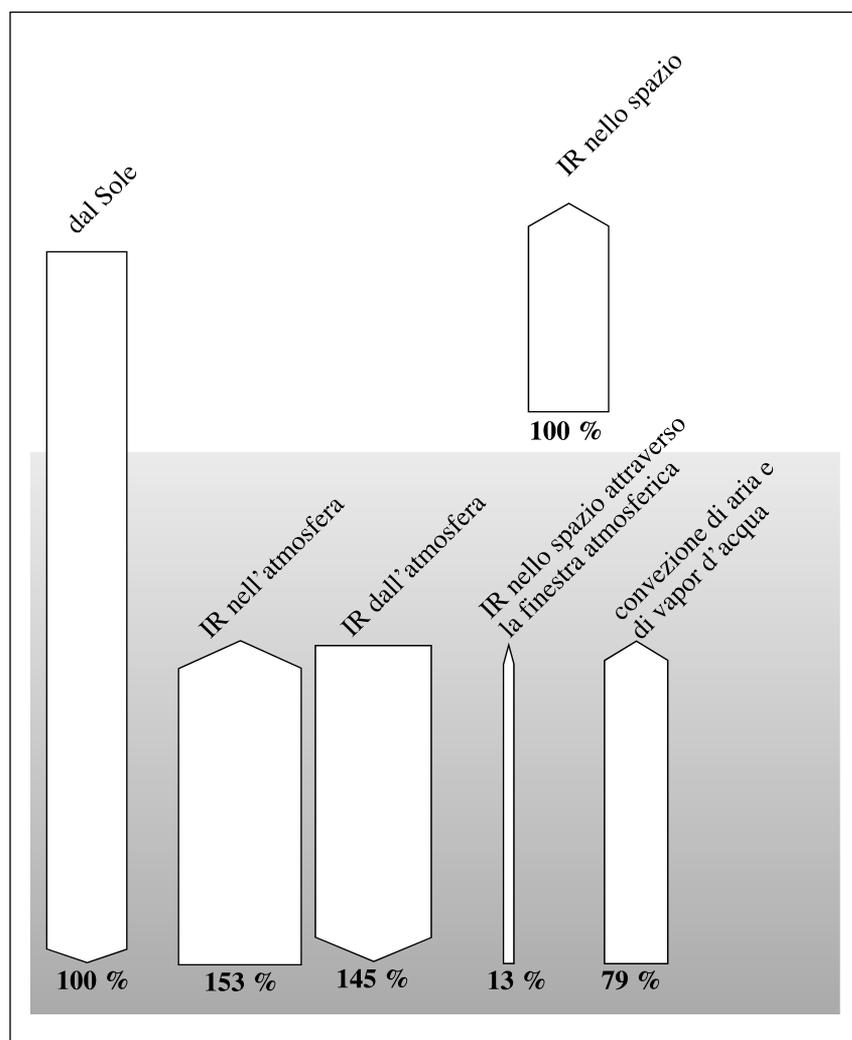


Figura 1.

### Difetti:

Una rappresentazione come quella della figura 1 suggerisce che la radiazione sia il più importante meccanismo di trasporto dell'energia dalla superficie terrestre alla troposfera superiore. Le corrispondenti frecce di flusso sono le più larghe e i valori della densità della corrente di energia sono i più grandi. Anche i testi che descrivono generalmente tali figure confermano questa impressione.

Questa rappresentazione è però ingannevole. Il flusso netto di energia radiante dalla Terra alla troposfera superiore risulta dalla somma di entrambi i due flussi maggiori. Il risultato è solo l'8% del flusso di energia assorbito dalla Terra. La figura 2 mostra il corrispondente diagramma di flusso. Adesso si vede che è la convezione, non la radiazione, il meccanismo dominante della trasmissione, anzi per una trattazione approssimata si può addirittura trascurare del tutto la radiazione.

Si potrebbe difendere la rappresentazione della figura 1 dicendo che contiene più informazione della figura 2. Ma questa informazione qui non è importante, e confonde, come dimostra l'esperienza, sia degli studenti di scuola che di università.

Infatti qualsiasi corrente si può scomporre in parti, e questo si può anche fare in infiniti modi. Per esempio possiamo pensare di scomporre l'aria ferma di una stanza in due metà. Una consiste delle molecole che si muovono verso destra, l'altra di quelle che si muovono verso sinistra. Così otteniamo due grandi correnti d'aria che fluiscono l'una contro l'altra. Analogamente potremmo procedere con gli elettroni di un condotto-

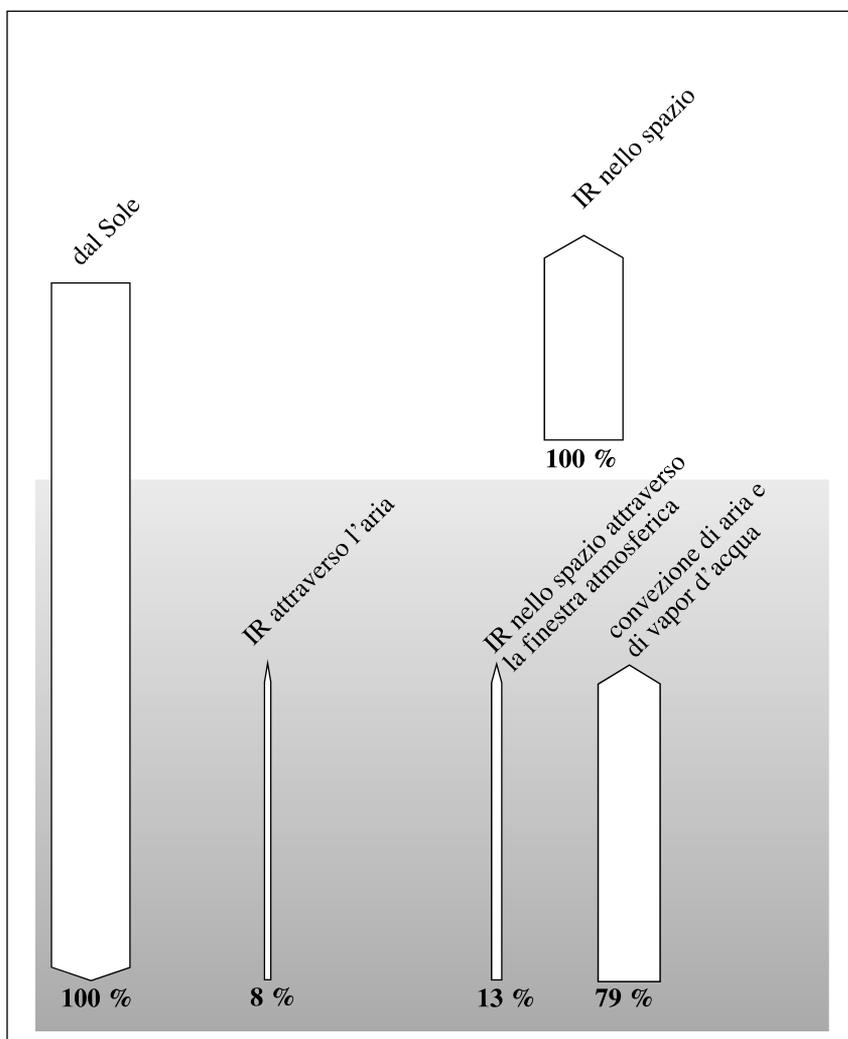


Figura 2.

re in cui non passa corrente: così otteniamo due correnti molto intense in senso opposto. Potremmo anche scomporre in questo modo la componente orizzontale della radiazione infrarossa dell'atmosfera.

Ancora un esempio che rappresenta molto bene il flusso di radiazione verticale nell'atmosfera: il flusso di calore in un solido, per esempio una sbarra di rame che viene riscaldata ad una estremità e raffreddata all'altra. Ciò che nell'atmosfera e per la radiazione sono i fotoni, nella sbarra e per la conduzione sono i fononi. Ciò che nell'atmosfera è la velocità della luce, nella sbarra è la velocità del suono. A nessuno verrebbe in mente di scomporre il flusso di calore in due correnti di fononi che fluiscono l'una contro l'altra, se si tratta soltanto di fare il bilancio termico della sbarra.

Naturalmente nessuna delle due descrizioni è sbagliata: né quella con i flussi netti né quella con i flussi parziali. Solamente questi ultimi non solo sono, appunto, più complicati ma creano anche confusione.

#### *Origine:*

Probabilmente il fatto è che i flussi parziali si misurano comodamente, al contrario di quelli netti.

#### *Eliminazione:*

Si rappresentino i flussi di energia nell'atmosfera con la densità di corrente di energia complessiva. Questa grandezza ha in ogni punto di un campo di radiazione un unico valore. In questo modo sarà evidente che è la convezione il meccanismo di trasporto del calore dominante nella bassa atmosfera.

*Friedrich Herrmann*



## Stratificazione in temperatura dell'atmosfera

### *Tema:*

In alto fa freddo. Sulle montagne si fanno gli sport invernali mentre nelle valli fioriscono già i crochi. Conosciamo tutti le cime alpine coperte di neve anche d'estate. Aria afosa e surriscaldata, salendo riesce a formare nubi di tempesta alte chilometri e le conseguenze sono pioggia gelida e grandine. Nubi, neve e pioggia grazie al freddo delle altitudini, un freddo che si conserva nonostante il continuo mescolamento dell'aria. Perché?

### *Difetti:*

Cercheremmo inutilmente la risposta nei libri di scuola. Anche se grande attenzione viene dedicata ad effetti dell'ordine di grandezza del per mille, come per esempio la dilatazione termica dei solidi, non ci si accorge dello spettacolo quotidiano dell'atmosfera. Eppure il fenomeno di cui parliamo è facile da descrivere, dimostrare e rendere chiaro, e poi a parte lo sport e le previsioni meteorologiche, è importante per tanti altri campi: lo usano frigoriferi, pompe di calore, turbine a vapore, motori per auto, accendini pneumatici. Altre conseguenze spettacolari di questo fenomeno sono le stelle cadenti e i meteoriti, gli scudi termici delle capsule spaziali al rientro nell'atmosfera, il cosiddetto muro di fuoco, che limita la velocità degli aeroplani. I gas, ma anche i liquidi e i solidi, si riscaldano se compressi e si raffreddano quando si espandono, senza che si debba fornire o sottrarre calore. L'effetto è drastico. Le stelle cadenti e le astronavi si disintegrano per l'accumulo e la compressione di aria rovente davanti alla prora. Nei motori diesel si innesca l'accensione della miscela di gasolio vaporizzato e aria nel cilindro. Anche l'involucro d'aria della Terra deve a questo fenomeno la stratificazione stabile della temperatura, da  $15^{\circ}\text{C}$  al suolo fino a  $-50^{\circ}\text{C}$  a 10 km di altezza. La causa è che l'aria salendo, per il diminuire della pressione, si dilata e si raffredda e forma nubi quando è abbastanza umida, mentre quando scende per l'aumento della pressione si riscalda. Perfino quando ci sono fitte nubi e tempo tempestoso, troviamo che al suolo la visibilità è perfetta, poiché le turbolenze discendenti si dissolvono nell'aria più calda. La circolazione dell'aria non impedisce la stratificazione dell'atmosfera, anzi al contrario la provoca.

### *Origine:*

Nelle bolle di gas del diametro di 1 cm le differenze di temperatura si livellano entro 1 s. Il tempo di decadimento aumenta però con il quadrato del raggio, per cui per 100 m otteniamo tempi di rilassamento dell'ordine di  $10^8$  s. Con l'aumentare delle dimensioni lo scambio termico con l'ambiente va sempre di più sullo sfondo. I fenomeni che dominano la scena nelle grandi dimensioni dell'atmosfera sono quelli adiabatici, o meglio detto sono quelli isoentropici, mentre nei piccoli spazi del laboratorio sono protagonisti i fenomeni isotermi. La descrizione fisica delle esperienze di laboratorio è indirizzata verso la temperatura  $T$  come grandezza dominante, mentre l'entropia  $S$ , a causa della sua introduzione tardiva e delle difficoltà nel maneggiarla, viene il più possibile messa tra parentesi e con essa una serie di fenomeni e concetti che sono difficili da trattare senza l'entropia. Infatti una curva a temperatura costante si chiama isoterma, ma invece una curva a entropia costante adiabatica. Le singole isoterme vengono caratterizzate dalle loro temperature  $T_1$  e  $T_2$ , mentre con le adiabatiche siamo costretti a servirci di circonlocuzioni. La distribuzione della pressione

viene discussa attraverso la formula ipsometrica (detta anche formula barometrica) solo nel caso non realistico di atmosfera isoterma.

*Eliminazione:*

Siamo male equipaggiati per trattare i processi isoentropici, se ci mettiamo sul piede di guerra contro l'entropia. Questo è l'ostacolo più grave e lo eliminiamo solo se riusciamo a pensare che la parola del linguaggio comune calore (nel senso di qualcosa che scalda) corrisponde molto bene alle osservazioni che in fisica vengono quantificate attraverso la grandezza entropia. Quando parliamo dell'entropia come del calore nel linguaggio quotidiano, otteniamo una descrizione abbastanza giusta e nello stesso tempo intuitiva.

*Georg Job*

## Stelle cadenti e capsule spaziali

### Tema:

Le alte temperature che si sviluppano quando un meteorite, una capsula spaziale o uno shuttle entrano nell'atmosfera terrestre vengono spesso spiegate con l'attrito; e questo non solo accade nei testi di divulgazione scientifica, ma anche nei libri di scuola e di università:

“In questa fase la temperatura del rivestimento esterno del veicolo spaziale aumenta a causa dell'attrito fino a 1600 gradi *Celsius*, e a questa temperatura anche la roccia diventerebbe liquida.” /1/

“A causa dell'attrito per l'ingresso nell'atmosfera, piccoli frammenti di materia si riscaldano talmente da evaporare come meteoriti incandescenti.” /2/

“Essi [i meteoriti] entrano nell'atmosfera terrestre con una velocità di circa 30 km/s ed evaporano a causa dell'attrito con le particelle dell'aria.” /3/

### Difetti:

Per attrito si sviluppa calore, e calore significa aumento della temperatura. Tutti hanno fatto questa esperienza. I freni si scaldano, è facile portare al calore rosso una punta di trapano consumata, così come la vecchia lama di una sega circolare fa carbonizzare il legno che vuoi tagliare. Cosa c'è di più naturale che spiegare con l'attrito le alte temperature che si sviluppano negli shuttle e nei meteoriti quando entrano nell'atmosfera? Eppure questa spiegazione non è corretta.

Un corpo che si muove molto velocemente nell'aria, la comprime davanti a sé. Se la velocità è più grande della velocità del suono si forma davanti all'oggetto volante un “urto di compressione”: un salto a valori più alti di densità, pressione e temperatura, e valori più bassi per la velocità nel sistema di riferimento del corpo in volo. Questo salto è tanto più grande quanto più alta è la velocità del corpo in volo. Per una capsula spaziale che rientra nell'atmosfera la temperatura raggiunge 20 000 K, e lo scudo termico protettivo si riscalda fino a 2000 K. La temperatura diminuisce per la successiva espansione e per i processi vorticosi e di attrito che si sviluppano. Le alte temperature allora si instaurano davanti al “naso” del veicolo e non dove ci sono i fenomeni di attrito.

Due domande si impongono:

- perché la temperatura aumenta in un “urto di compressione”?
- perché la temperatura non aumenta più quando comincia l'attrito?

Troviamo la risposta ad entrambe le domande, se chiariamo che cosa succede all'entropia. Ricordiamo che l'entropia di una certa quantità di gas dipende dalla temperatura e dal volume: quanto maggiore è la temperatura, a volume fissato e quanto più grande è il volume a temperatura fissata, tanta più entropia è contenuta nel gas.

Torniamo allo shuttle e consideriamo una determinata porzione di aria. Durante l'urto di compressione essa viene compressa molto rapidamente e perciò praticamente in modo isoentropico (adiabatico). Cioè la sua

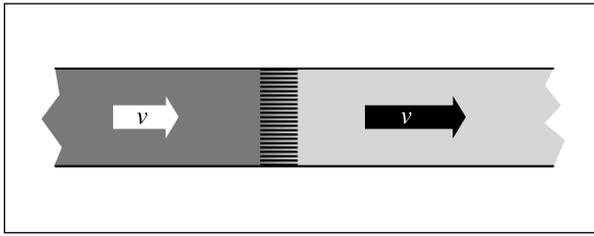


Figura 1. L'aria fluisce attraverso una resistenza alla corrente. Poiché la sua velocità aumenta la sua temperatura diminuisce.

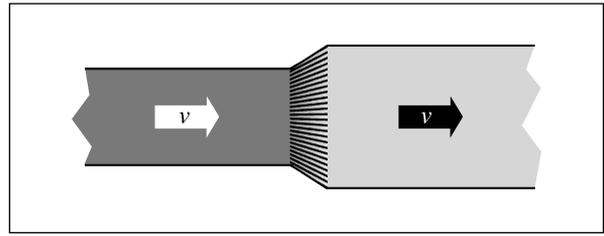


Figura 2. Le velocità prima e dopo la resistenza alla corrente sono uguali. Perciò anche le temperature sono uguali.

entropia non cambia. Ma poiché il volume diminuisce, la temperatura deve aumentare. Per lo stesso effetto l'aria atmosferica che scende si riscalda.

Per capire il secondo, e del tutto inaspettato effetto, cioè che nonostante l'attrito la temperatura non aumenta, consideriamo un modello delle correnti d'aria intorno alla capsula o al meteorite, che è più semplice dal punto di vista geometrico, ma che essenzialmente rappresenta lo stesso processo: un flusso stazionario di un gas in un tubo che offre resistenza al passaggio della corrente, come nella figura 1.

Dal momento che l'aria si espande quando passa attraverso la resistenza, la corrente di volume (i "litri al secondo") a destra della resistenza è più grande che a sinistra. Per questo processo, nel caso si tratti di un gas perfetto, vale la formula sorprendentemente semplice /4, 5/:

$$c_p T + \frac{1}{2} M v^2 = \text{costante}.$$

Qui  $c_p$  è il calore specifico molare a pressione costante,  $T$  la temperatura assoluta,  $M$  la massa molare e  $v$  la velocità. L'equazione dice che l'espressione ha lo stesso valore per tutti i punti di una linea di flusso. A parole: dove la velocità è alta la temperatura è bassa e viceversa (a condizione che il gas non scambi energia con le pareti del tubo tra i due punti che stiamo confrontando).<sup>†</sup> L'equazione continua a valere anche quando nel tubo c'è una resistenza al flusso della corrente. Nel caso della figura 1 l'equazione dice che la temperatura del gas dietro la resistenza è più piccola che davanti, poiché il gas dietro alla resistenza ha una densità più piccola e quindi una velocità più grande che davanti. Allargando la sezione del tubo dietro la resistenza, possiamo ottenere che le velocità prima e dopo siano uguali, come illustrato nella figura 2. Adesso possiamo anche capire come mai la resistenza non riesce a far aumentare la temperatura del gas. Con l'attrito viene fornita entropia al gas. Questa entropia non si manifesta nell'aumento della temperatura del gas che si è espanso a destra della resistenza, ma causa appunto l'aumento del volume. La temperatura costante della figura 2 ha pertanto la stessa spiegazione della ben nota espansione libera di *Gay-Lussac*.

Torniamo di nuovo allo shuttle. Anche qui abbiamo un'espansione con processi di attrito. Tuttavia qui la velocità aumenta e l'aria si mescola con quella dell'ambiente. Entrambi i processi concorrono a far diminuire la temperatura.<sup>‡</sup>

Concludendo: la temperatura di un gas sale per una compressione (con l'entropia mantenuta costante), e per una espansione la sua temperatura scende di nuovo. O in modo ancora più conciso: un gas non si riscalda per

<sup>†</sup> Un esempio è l'aria che esce dagli pneumatici di un'auto quando si apre la valvola. All'interno la velocità è nulla, e certamente dopo l'uscita essa è alta. Perciò la temperatura dell'aria diminuisce.

<sup>‡</sup> Di fatto i fenomeni dello shuttle sono ancora più complicati, poiché a causa delle alte temperature si innescano eccitazioni elettroniche, dissociazioni ed altre reazioni chimiche. Ma tutto questo ha come conseguenza un'ulteriore diminuzione della temperatura.

attrito ma invece per compressione. La spiegazione intuitiva, cioè moto che provoca attrito che provoca calore, che è giusta per solidi e liquidi, è sbagliata per i gas. Perché? Cosa hanno di speciale i gas? Perché seguono la legge dei gas perfetti, o qualitativamente perché sono comprimibili.

#### *Origine:*

Cambiamenti di temperatura per compressioni o espansioni isoentropiche sono fenomeni che si trovano dappertutto. L'esempio più appariscente e meglio conosciuto è la neve sulla cima delle montagne. Il fisico dilettante ha per molti fenomeni termici delle spiegazioni che senz'altro resistono ad un'analisi fisica professionale. In questo caso invece no, poiché nella neve sulle montagne vede solo la dipendenza della temperatura dall'altezza, non la dipendenza dalla pressione. Invece gli effetti dell'attrito sulla temperatura li conosce e li spiega correttamente. Cosa c'è di più naturale che attribuire all'attrito le alte temperature davanti allo shuttle? Ma anche qualche professionista non sembra essere molto avvantaggiato rispetto al dilettante. Il problema è tutto nel non saper usare bene lo strumento che consente semplici spiegazioni, l'entropia.

#### *Eliminazione:*

Si mostra che la compressione e l'espansione isoentropica sono la causa di molti effetti termici appariscenti. L'alta temperatura, che è responsabile della fusione degli strati esterni dei meteoriti e della loro luminosità, e che mette in pericolo lo shuttle, è solo uno di questi effetti.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ [www.wissenschaft-online.de](http://www.wissenschaft-online.de)

/2/ Sexl, Raab, Streeruwitz: *Eine Einführung in die Physik*. Diesterweg, Frankfurt am Main, p. 121.

/3/ G. H. Liljequist, K. Cihak: *Allgemeine Meteorologie [Meteorologia Generale]*. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1984, p. 378.

/4/ H. Oertel: *Aerothermodynamik*. Springer Verlag, Berlin 1994, p. 8.

/5/ F. Herrmann: *Skripten zur Experimentalphysik, Thermodynamik*. [www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de](http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de), p. 86.



## Il Sole e le lampade spettrali

### *Tema:*

Da studenti impariamo a riconoscere due categorie di sorgenti di luce, che si distinguono nel loro modo di funzionare. Alla prima appartengono i corpi incandescenti, come il Sole o la fiamma bianco giallastra delle candele, alla seconda le lampade spettrali, i laser, i diodi semiconduttori e le fiamme colorate. Per quanto riguarda le sorgenti di luce della prima categoria, ci spiegano che i corpi neri caldi emettono radiazione elettromagnetica a causa della loro temperatura, la radiazione termica o radiazione di corpo nero. Lo spettro dipende solo dalla temperatura del corpo radiante. La funzione corrispondente si chiama legge di *Planck* della radiazione.

Per le sorgenti della seconda categoria, impariamo che l'emissione avviene perché gli elettroni, sia quelli degli atomi, delle molecole o dei reticoli cristallini dei solidi, passando da uno stato eccitato ad uno stato di energia più bassa, emettono fotoni. La frequenza dipende dalla differenza di energia degli stati, l'intensità dalla probabilità della transizione. L'eccitazione può avvenire in modi molto diversi: elettricamente, utilizzando il pompaggio ottico, o anche termicamente.

### *Difetti:*

Le sorgenti di luce vengono spiegate a livelli concettuali diversi: le une con la termodinamica e le altre con la fisica atomica. In questo modo facilmente rimane l'impressione che l'emissione di una lampada ad incandescenza non abbia niente a che fare con la fisica atomica, o che per l'emissione di una fiamma a gas non valga più la termodinamica. Di fatto entrambi i tipi di sorgenti di luce si basano sul fatto che un sistema eccitato torna in uno stato di energia più basso, e in entrambi i casi l'intensità viene determinata anche dalle leggi della termodinamica. Questo modo di procedere diventa forse comprensibile se vogliamo spiegare soltanto come sono fatti gli spettri: otteniamo lo spettro del corpo nero da considerazioni di fisica statistica. Il meccanismo microscopico non gioca alcun ruolo. Invece la termodinamica ha ben poco da dire su come sono fatti gli spettri.

Ma se non diciamo come sono collegati i due modi di spiegare, resta soltanto la speranza che gli studenti non facciano quello che noi normalmente desideriamo, cioè che facciano domande quando non capiscono.

Una di tali domande potrebbe essere: perché il Sole non ha uno spettro a righe come una lampada spettrale? Esso è fatto praticamente solo di idrogeno ed elio, e tali gas non emettono mica radiazione di corpo nero.

### *Origine:*

Le teorie o le spiegazioni della radiazione di corpo nero e quelle degli spettri a righe si sono sviluppate in modo indipendente l'una dall'altra, e hanno conservato fino ai nostri giorni questa indipendenza anche nella letteratura scientifica. In questo esempio vediamo inoltre quanta poca chiarezza ci sia nella definizione di ciò che vorremmo chiamare "una spiegazione soddisfacente". In questo campo una volta si dà la spiegazione seguendo a ritroso il cammino fino al meccanismo microscopico, l'altra descrivendo il processo di produzione e le proprietà spettrali della radiazione.

*Eliminazione:*

Ogni corpo la cui temperatura non è uguale a 0 K emette radiazione elettromagnetica. Quando il fattore di emissione del corpo  $e(f)$  (che è sempre compreso tra 0 e 1) è uguale ad 1 per tutte le frequenze allora la densità della corrente di energia  $j_E$  per intervallo di frequenza  $df$  è data dalla legge di *Planck* :

$$dj_E = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{kf} - 1} df.$$

Ora il fattore di emissione di un corpo è per tutte le  $f$  uguale al fattore di assorbimento  $e(f) = a(f)$ . Quando  $e$  per tutte le frequenze è uguale ad 1 anche  $a$  lo è, e il corpo è completamente non trasparente e non riflettente, esso è nero. (Questo è facile da capire: quando un corpo emette alla frequenza  $f$ , in corrispondenza di questa ha una transizione atomica permessa, e quindi deve anche assorbire a tale frequenza).

Se  $e(f)$  e  $a(f)$  non sono più sempre uguali ad 1, allora la formula di *Planck* diventa:

$$dj_E = e(f) \cdot \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{kf} - 1} df.$$

Poiché  $e$  per tutte le  $f$  è più piccolo o uguale ad 1, la densità di corrente spettrale dell'energia per un corpo non nero è sempre più piccola o uguale a quella dello spettro di *Planck*. La luce delle fiamme colorate ha uno spettro di emissione che giace al disotto di quello di *Planck*: per esempio la luce azzurrognola del metano o quella giallognola del gas in cui è stato messo un pizzico di sale da cucina.

Il fatto di poter descrivere con la termodinamica gli spettri dei corpi incandescenti, non vuole però dire che il meccanismo microscopico di emissione sia diverso da quello di una lampada spettrale. Ciascun fotone che lascia il corpo incandescente proviene da una transizione atomica: per i fotoni della luce visibile si tratta di una transizione di livelli elettronici, per quelli infrarossi di lunghezza d'onda maggiore, di una transizione anche dei livelli rotazionali e vibrazionali. Nei solidi si trovano spesso transizioni di tutti i valori dell'energia, e perciò si realizza di frequente il caso limite dell'irraggiamento secondo *Planck*. (Ma anche corpi solidi macroscopici o addirittura di grandi dimensioni non sempre irraggiano uno spettro di *Planck*. Si riscaldino alla fiamma di un becco *Bunsen* due pezzi di materiali differenti, per esempio uno di ferro e l'altro di quarzo o zaffiro, o anche un ciottolo bianco. Mentre il ferro si riscalda prima al color rosso e poi fino al bianco incandescente, i pezzi di quarzo o di zaffiro o il ciottolo non emettono quasi nessuna luce visibile).

Il Sole rappresenta un caso di irraggiamento termico particolarmente interessante. Da una parte noi sappiamo che è praticamente costituito solo da idrogeno ed elio. Ci dovremmo quindi aspettare che il suo spettro fosse uno spettro a righe, come quello di una "lampada spettrale a idrogeno ed elio" (la quale però venga eccitata termicamente e non elettricamente). D'altra parte sappiamo che la luce solare ha uno spettro continuo, molto vicino a quello di *Planck*.

Come mettiamo insieme queste due affermazioni?

La spiegazione viene dal fattore  $e$  nella relazione di *Planck*:

$$e(f) = a(f).$$

In un esperimento di laboratorio, nel quale l'idrogeno viene eccitato termicamente, questo fattore è praticamente nullo per tutte le frequenze. Fatta eccezione per alcune frequenze molto precise nell'ultravioletto il gas rimane praticamente del tutto trasparente. Lo spettro di emissione della lampada è perciò fortemente diverso dallo spettro di *Planck*. Ma il coefficiente di assorbimento, e quindi anche quello di emissione diventa sempre più grande quanto più aumenta lo spessore del corpo. Quando la luce penetra in un corpo e qui il suo cammino è abbastanza lungo, troverà da qualche parte una transizione adatta. La lunghezza di questo cammino dipende naturalmente dalla frequenza della luce. Per il Sole nei casi più sfavorevoli essa è di alcune

centinaia di chilometri. Paragonata con le dimensioni di una lampada spettrale essa è molto grande, ma paragonata con il raggio del Sole è molto piccola. Uno strato dello spessore di 10 cm di materia solare (nella fotosfera) è del tutto trasparente: essa praticamente non assorbe nulla e non emette nulla (in direzione ortogonale allo strato). Con l'aumentare dello spessore dello strato aumentano l'assorbimento e l'emissione e lo spettro è all'incirca lo stesso di quello di una lampada spettrale /1, 2/. Aumentando ulteriormente lo spessore il gas emette sempre più negli intervalli tra le righe spettrali. Uno strato spesso 1000 km, che assorbe completamente tutta la luce, emette più o meno come un corpo nero alla temperatura di 6000 K.

Ora quali sono le transizioni responsabili di questi processi di emissione/assorbimento? Perfino se avessimo solo una miscela solo di idrogeno e di elio, e, se trascurassimo la (debole) ionizzazione, otterremmo il completo assorbimento per tutte le frequenze nello spettro visibile solo sulla base della "larghezza" naturale delle righe spettrali, già con uno spessore di alcune centinaia di chilometri. Ma si aggiungono altri meccanismi di assorbimento: il gas idrogeno-elio è debolmente ionizzato e gli elettroni liberi assorbono. Inoltre la materia solare contiene in piccole concentrazioni anche tutti gli altri elementi che in parte assorbono nello spettro visibile.

Quando si tratta solo dello spettro, non abbiamo bisogno di crearci grandi problemi su quale di questi meccanismi sia dominante, perché sappiamo bene che il cammino nella luce all'interno del Sole per i nostri scopi può essere considerato lungo a piacere. È come con una scatola nella quale è stato fatto un piccolo foro. Il buco appare nero, sia che le pareti interne riflettano o diffondano, sia che siano nere, bianche o gialle o blu. Il meccanismo di assorbimento non gioca più alcun ruolo per spiegare il fatto che il buco è nero.

*Friedrich Herrmann*

/1/ M. Vollmer: *Emittiert ein heißes gas ein Linien oder ein Schwarzkörperspektrum?* [Un gas caldo emette uno spettro a righe o uno di corpo nero?]. Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Düsseldorf 2004.

/2/ M. Vollmer: *Hot Gases: Transition from line spectra to incandescent radiation*. American Journal of Physics, 2005, 73, p. 215.



## I molti nomi dell'equazione dei gas

*Tema:*

L'equazione  $pV = nRT$  viene introdotta con diverse denominazioni: equazione di stato dei gas perfetti, legge generale dei gas, equazione universale dei gas, equazione di stato termica dei gas perfetti e altre ancora. Poiché si tratta di una relazione tra più di due grandezze, si può considerare solo il legame tra due variabili, tenendo costanti le altre due. Le corrispondenti relazioni sono conosciute con i loro nomi propri. Così la relazione tra  $p$  e  $V$  si chiama legge di *Boyle e Mariotte*, la relazione tra  $V$  e  $T$  si chiama legge di *Gay-Lussac*, la proporzionalità tra  $p$  e  $T$  la legge di *Amontons*, quella tra  $V$  e  $n$  la legge di *Avogadro*. Nei testi in inglese la legge di *Boyle e Mariotte* si chiama solo legge di *Boyle*, e quella di *Gay-Lussac* si chiama legge di *Charles*.

*Difetti:*

Un nome proprio serve per sottolineare l'importanza di una equazione. Con il nome si può comodamente far riferimento alla relazione. L'equazione di stato dei gas (qui la chiameremo così) è importante. La sua validità è indipendente dalla natura del gas. Essa vale per la materia in un senso molto ampio, purché questa sia abbastanza diluita e/o la temperatura sia abbastanza elevata. Essa vale non soltanto per i gas in senso comune, come l'aria che ci circonda, ma anche per sostanze sciolte in soluzioni diluite o per il plasma compresso all'interno del Sole. L'equazione di stato si è guadagnata il suo nome. Un'altra domanda sarebbe se siano opportune o meno aggiunte come "generale" o "universale" al nome dell'equazione. La formula con questa precisazione si troverebbe in una serie di eccellenza, e molte altre leggi potrebbero avanzare la pretesa di essere promosse in questa serie più alta.

Certamente è una buona abitudine dare alle formule il nome degli scienziati. Ma come mostra l'equazione di stato dei gas si può anche esagerare: questo è il caso in cui una equazione rende onore a sei ricercatori. Anche nel dare nomi alle strade proviamo un certo imbarazzo quando una piccola strada secondaria diventa principale e con questo vengono tributati onori inaspettati ad una persona meno importante. D'altra parte scienziati importantissimi come *Leibniz* e *Cartesio* non hanno avuto l'onore di battezzare una equazione importante. Altri al contrario vengono onorati con risultati marginali della loro opera, come per esempio *Huygens* con il principio delle onde elementari e *Faraday* con un mingherlino effetto *Faraday* e addirittura una curiosità come il bicchiere di *Faraday*.

Torniamo all'equazione di stato dei gas. Essa è equivalente a parecchie altre relazioni che sembrano affermare cose molto diverse dalla stessa:

$$E(V) - E(V_0) = 0 \quad \text{per } T = \text{costante}$$

a parole: l'energia di un gas è indipendente dal volume, quando la temperatura viene mantenuta costante.

$$S(V) - S(V_0) = nR \ln \frac{V}{V_0} \quad \text{per } T = \text{costante}$$

a parole: a temperatura costante la dipendenza dell'entropia dal volume è logaritmica. (Questa relazione è strettamente legata all'equazione statistica  $S = k \ln W$ .)

$$\mu(V) - \mu(V_0) = RT \ln \frac{p}{p_0} \quad \text{per } T = \text{costante}$$

a parole: a temperatura costante il potenziale chimico dipende in modo logaritmico dalla pressione. (Da questa formula derivano l'equazione di stato dei gas, la legge di azione di massa e la formula ipso metrica, detta anche formula barometrica, che descrive per i gas dell'atmosfera la dipendenza della pressione dall'altezza).

Tutte e tre le relazioni possono essere derivate senza ipotesi aggiuntive dall'equazione di stato dei gas, e da ciascuna di queste si può derivare l'equazione di stato dei gas. Potremmo chiamare anche queste equazioni di stato dei gas. Ma nessuno lo fa.

Al contrario un gas non è descritto in modo completo dall'equazione di stato dei gas o da relazioni equivalenti. Essa è solo una delle tante equazioni di stato di cui abbiamo bisogno per una caratterizzazione completa di un dato gas. Infatti essa non descrive proprietà termiche essenziali di un gas perfetto: come dipende la temperatura del gas dal contenuto di calore (dal contenuto di entropia)? Questo lo riesce a fare la cosiddetta equazione di stato calorica  $S(T,p)$ . Questa ha un unico nome e gli effetti che essa descrive, come quelli descritti dall'equazione di stato dei gas sono appariscenti. Tradizionalmente essa viene considerata meno importante con la conseguenza che nelle lezioni molti processi interessanti vengono lasciati perdere, come per esempio l'espansione isoentropica (adiabatica) nella macchina a vapore e nel motore a combustione interna, oppure la diminuzione della temperatura con l'altezza.

#### *Origine:*

1. Nella comune trattazione dell'equazione di stato dei gas, cioè cominciando con le tre proporzionalità, si vedono le sedimentazioni dei vari periodi nel processo storico della sua costituzione. Naturalmente la storia può essere diversa nei diversi paesi.
2. Il fatto che l'equazione di stato termica, con le sue variabili facilmente misurabili  $p$ ,  $V$  e  $T$ , sia sopravvalutata è collegato con l'altro fatto che le grandezze entropia e potenziale chimico, altrettanto facili da misurare, non hanno incontrato un grande favore.

#### *Eliminazione:*

1. Non si esageri con i nomi delle equazioni. Per l'equazione di stato dei gas proponiamo di non dare nomi propri alle singole proporzionalità. Specialmente raccomandiamo di essere molto cauti con aggettivi come "generale" o "universale".
2. Nel caso in cui si abbiano a disposizione i logaritmi, si trattino anche la dipendenza dell'entropia dal volume, e anche la dipendenza del potenziale chimico dalla pressione e dalla concentrazione. In ogni caso si trattino anche le proprietà *caloriche* dei gas, per esempio la relazione tra la temperatura e volume quando il contenuto di calore (entropia) rimane costante, perché con questo possiamo capire il funzionamento delle macchine termiche e come avviene la distribuzione della temperatura nell'atmosfera.

#### *Friedrich Herrmann*

## Energia chimica

### *Tema:*

La nostra capacità fisica di lavorare deriva dall'energia chimica degli alimenti, mentre per far funzionare la maggior parte delle macchine abbiamo bisogno dell'energia chimica dei combustibili fossili. L'energia ha origine dalla luce del Sole. Essa viene immagazzinata in forma chimica nelle sostanze organiche prodotte attraverso la fotosintesi e può essere trasformata in calore, lavoro o mediante celle a combustibile anche direttamente in energia elettrica.

### *Difetti:*

Sentiamo quotidianamente affermazioni di questo tipo. Non ci disturba per nulla leggere o ascoltare cose dette in questo modo. Incontriamo soltanto le prime difficoltà quando cerchiamo di quantificarle. Se vogliamo precisare l'efficienza  $\eta$  di una cella combustibile o di un motore Diesel, che utilizzano energia chimica, abbiamo bisogno di numeri. Per quanto riguarda i motori ci aspettiamo una risposta professionale dagli ingegneri che li sviluppano. Il nostro principale interesse è per quella che loro considerano l'energia  $W_z$  introdotta nel motore, che dovrebbe essere energia chimica. Troviamo che  $W_z = m_C H_u$ , dove  $m_C$  è la massa del combustibile e  $H_u$  il suo specifico potere calorifico specifico, così che  $W_z$  è semplicemente il calore ceduto nella combustione, o più in generale il calore ceduto nella reazione chimica considerata. Le celle a combustibile vengono trattate nello stesso modo. Noi sappiamo che in linea di principio potremmo utilizzare una qualsiasi reazione chimica spontanea per far funzionare una tale cella, per esempio anche una reazione endotermica. In questo caso  $W_z$  sarebbe negativo, cosicché la cella fornirebbe contemporaneamente energia chimica e energia elettrica. L'energia necessaria per questa doppia prestazione viene presa sotto forma di calore dall'ambiente. Nonostante che la cella fornisca spontaneamente energia in soprappiù, il suo rendimento sarebbe negativo, poiché  $W_z < 0$ . Inoltre non possiamo fare nulla con la presunta energia chimica ricavata, che viene immagazzinata nei prodotti della reazione, poiché questa non si svolge al contrario, a meno che non la forziamo. Se chiediamo consiglio ai chimici, ai fisici chimici, o agli specialisti di termodinamica, finiamo dalla padella nella brace. Il concetto di energia non fa parte del loro repertorio professionale. Al posto di essa hanno questa o quella funzione di stato energetica, diversa a seconda delle condizioni al contorno a cui è sottoposto il sistema considerato. Una energia chimica (quella contenuta in qualsiasi sostanza) chiaramente definibile, apparentemente non esiste.

### *Origine:*

Gli ingegneri concepiscono i motori a combustione come macchine termiche non chimiche. Perciò non cercano di valutare l'energia chimica, ma piuttosto il calore fornito. Da questo punto di vista il calore di combustione sembra essere una misura appropriata per il calore fornito. Perciò sembra anche naturale trasferire la stessa impostazione alle celle a combustibile. Le reazioni endotermiche non vengono discusse per questi scopi, poiché le energie scambiate sono al confronto molto piccole e perciò poco rilevanti per il progetto tecnico, così che facilmente si trascurano le difficoltà emerse nella discussione precedente.

*Eliminazione:*

L'energia chimica appartiene alla stessa categoria delle altre forme di energia. Il concetto si rivela utile quando si tratta di orientarsi a grandi linee, ma fa resistenza quando cerchiamo di definirlo con precisione. Va bene nel gergo dei fisici, è superfluo nei calcoli fisici, è di impaccio per la comprensione della fisica.

Pensiamo bene a quale danno preferiamo fare agli studenti.

*Georg Job*

## Il potenziale chimico

### Tema:

In fisica qui si spalanca una lacuna concettuale. Il concetto del nostro titolo non compare nei libri di scuola e di università. Solo i teorici lo conoscono e compare solo in termodinamica e in fisica statistica come parte di un calcolo astratto e complicato.

### Difetti:

Al contrario della sua reputazione, il potenziale chimico è inoffensivo, più innocuo delle grandezze vettoriali forza o accelerazione della meccanica. Bastano poche proprietà, facili da capire e da far capire con esempi della vita quotidiana, per descrivere questa quantità non solo qualitativamente, ma per definirla in modo completo. Se usiamo la definizione che segue, rimane solo da scegliere l'unità e fissare alcuni punti di zero della sua scala:

a) a ciascuna sostanza B possiamo associare una grandezza  $\mu_B$ , chiamata il suo potenziale chimico, che esprime la sua tendenza a cambiare, cioè

- a reagire con qualsiasi altra sostanza;
- a trasformarsi in ogni altro tipo di stato di aggregazione;
- a ridistribuirsi nello spazio o in un'altra sostanza;

b) il potenziale chimico di una sostanza B  $\mu_B$  non dipende dalle sostanze con cui essa reagisce e neppure dai prodotti di questa reazione, ma invece dipende dall'ambiente in cui B si trova, cioè dalla temperatura, dalla pressione, dallo stato di aggregazione, dall'intensità dei campi presenti e dalle sostanze con le quali viene mescolata e dalle proporzioni delle mescolanze;

c) una trasformazione avviene spontaneamente quando la tendenza a farlo è più pronunciata, cioè quando il potenziale chimico è più grande nello stato iniziale che nello stato finale, come per esempio:

- in una reazione  $B' + B'' + \dots \rightarrow D' + D'' + \dots$ , se  $\mu_{B'} + \mu_{B''} + \dots > \mu_{D'} + \mu_{D''} + \dots$
- in una transizione di fase  $B(\alpha) \rightarrow B(\beta)$ , se  $\mu_\alpha > \mu_\beta$
- in una redistribuzione  $B(\text{luogo } 1) \rightarrow B(\text{luogo } 2)$  se  $\mu_1 > \mu_2$ .

Potremmo dirlo in modo ancora più figurato: ogni sostanza, non importa di che tipo, ha la tendenza a reagire, trasformarsi, ridistribuirsi ecc., in breve, una specie di “spinta a cambiare”. Il potenziale chimico  $\mu$  è la misura dell'intensità di questa spinta, più grande è  $\mu$  più attiva, intraprendente, dinamica è una sostanza, più piccolo è  $\mu$  più passiva, molle e fiacca la sostanza. Durante una reazione, una transizione, o una redistribuzione vince la sostanza con la spinta maggiore:

- sostanze più aggressive si trasformano in sostanze più flemmatiche;
- stati più eccitati, attivi si trasformano in stati più rilassati;
- sostanze nei luoghi più intasati e affollati si muovono verso luoghi più spaziosi e calmi.

In breve la materia tende verso una condizione di maggiore mollezza. In prima approssimazione possiamo considerare  $\mu$  costante, indipendentemente dalla pressione e dalla temperatura, in modo simile a come facciamo in meccanica con la lunghezza di una stanga, di una leva o di una corda. Il corpo rigido è una buona

analogia per la sostanza con  $\mu$  “rigido”. Inoltre, per non entrare nel campo specifico dei chimici, possiamo per ora escludere le reazioni chimiche. Sarebbe piuttosto molto più sensato fare il contrario e ampliare il concetto di reazione, dal momento che molti processi fisici possono essere descritti come reazioni chimiche:

– ionizzazione di un atomo	$B \rightarrow B^+ + e^-$
– decadimento alpha	${}^A_Z B \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} B + \alpha$
– emissione di un fotone	$B^* \rightarrow B + \gamma$
– emissione indotta	$B^* + \gamma \rightarrow B + 2\gamma$
– adsorbimento da parte di una superficie	$\square + B \rightarrow \boxed{B}$
– formazione di lacune in un reticolo	$\boxed{B} \rightarrow \square + B$ ecc.

La discussione diventa sostanzialmente più produttiva, dal punto di vista sia qualitativo che quantitativo, se si tiene conto anche della dipendenza da pressione, temperatura e concentrazione. Spesso bastano già le approssimazioni lineari a portare risultati utili, come del resto non abbiamo dubbi a farlo nelle scuole nel caso della legge di *Hooke* o della dilatazione termica. Inoltre si possono trattare allo stesso modo, con un unico modello, fenomeni così diversi come l’osmosi, la diffusione, la formazione di lacune nella banda di conduzione, le superfici di contatto nelle giunzioni tra semiconduttori, la sedimentazione nelle centrifughe, il flusso di liquidi nei tubi, la stratificazione dell’atmosfera secondo la densità, l’emissione di elettroni da un filamento caldo, la distribuzione della velocità nei gas, l’emissione laser, il congelamento delle vibrazioni molecolari, la fotosintesi, la produzione di energia nelle celle a combustibile, nonché reazioni biochimiche di ogni specie. Qui nella fisica tradizionale c’è veramente una lacuna concettuale, un buco, che quando viene rammentato con i mezzi tradizionali, ci fa dire che “è peggio la toppa del buco”.

#### *Origine:*

Una volta capita la natura benigna della grandezza  $\mu$ , ci viene da chiederci come mai abbia finito per avere un destino così avverso da portarla del tutto fuori dagli interessi dei fisici. Ci sono parecchie ragioni. Già il creatore di questo concetto, *J. W. Gibbs* nel 1876 ha fatto l’errore di pubblicare i suoi pensieri in una rivista difficilmente reperibile e di usare un linguaggio incomprensibile per i chimici, il pubblico principale per questo argomento. La fisica atomica, molecolare, nucleare, la fisica dello stato solido allora non esistevano ancora, e i fisici non si sentirono chiamati in causa, un malinteso che l’aggettivo “chimico” nel nome della grandezza  $\mu$ , ancora oggi non smette di promuovere. Inoltre *Gibbs* ha basato la definizione della quantità sulla termodinamica classica, teoria molto stimata dai fisici, ma che essi tendono ad evitare per le sue difficoltà concettuali. Per questo l’articolo di *Gibbs* divenne noto molto più tardi, cioè quando si erano già diffuse spiegazioni alternative.

#### *Eliminazione:*

Non è facile eliminare una lacuna concettuale, soprattutto non con qualche bella parola, come si fa di solito. Inoltre questa lacuna non è veramente vuota, ma ci troviamo dentro vari sostituti soprattutto in chimica, ma anche in fisica, biologia, medicina, meteorologia eccetera. Il fatto è che la lacuna può essere riempita anche a livello di scuola secondaria come è stato dimostrato in molti anni di sperimentazione didattica. Come farlo non può essere spiegato in poche parole, a causa della molteplicità delle applicazioni e dei concetti che lo sostituiscono; ma almeno una cosa si può fare subito, rinunciare al pregiudizio che il potenziale chimico sia una grandezza molto difficile e importante solo per i chimici.

*Georg Job*

## La costante di Avogadro

*Tema:*

Il numero di particelle elementari (cioè quelle che pensiamo essere le più piccole unità costitutive di una sostanza) che sono contenute in una porzione di sostanza di  $n = 1$  mol è generalmente chiamato “numero di Avogadro”. In modo più preciso, il rapporto  $N/n$  (dove  $N$  rappresenta il numero di particelle e  $n$  la quantità di sostanza della rispettiva porzione di materia) è la *costante di Avogadro*  $N_A$ .

*Difetti:*

Una grandezza fisica è una variabile che attraverso i suoi valori quantifica una proprietà osservata in natura. Chiamiamo “quantizzata” una grandezza  $G$  con valori reali, ma disposti in modo discreto e quindi numerabili con precisione, e il numero intero che ne conta il valore viene chiamato il numero quantico  $g$ . Nel caso che i valori di  $G$  siano non solo discreti, ma anche equidistanti la grandezza si dice quantizzata secondo gli interi. Nel caso più semplice i valori sono tutti  $g$  volte multipli di un quanto universale  $\gamma$ :

$$G = \gamma \cdot g.$$

La carica elettrica  $Q$ , l'azione  $H$ , il momento angolare  $L$ , il flusso magnetico  $\Phi$  sono esempi di grandezze che, quando sono nelle condizioni di avere valori precisi, mostrano un siffatto spettro di valori; invece per l'energia non esiste un quanto universale. La quantizzazione secondo gli interi della carica che sta su di una particella, uno ione,  $Q = ze$  venne riconosciuta nel XIX secolo nel corso delle ricerche sulle soluzioni elettrolitiche. All'inizio del XX secolo si capì inoltre che i diversi risultati della fisica atomica e della termodinamica si potevano interpretare attraverso l'ipotesi che, durante un moto periodico, i valori dell'azione  $H$  per ciascun grado di libertà si susseguissero come i numeri interi, mentre la costante di *Planck*  $h$  si presentava come il quanto di azione universale.<sup>§</sup>

Una conseguenza non immediata di ciò è che il momento angolare  $L$  di una particella che gira in tondo è quantizzato. Inoltre anche il valore  $L_z$  di una sua componente in una direzione qualsiasi  $z$ , ha valori discreti ed equidistanti,  $L_z = l\hbar$  (dove  $\hbar = h/2\pi$  è il quanto universale di momento angolare, e  $l$  il relativo numero quantico). Il flusso magnetico  $\Phi$  attraverso una superficie concatenata con una spira percorsa da corrente, e in certo modo imprigionato nella superficie, si dimostra anch'esso quantizzato per interi, mentre il quanto universale di flusso magnetico ha il valore  $\Phi_0 = h/(2e)$ .

Vista la struttura dei suoi possibili valori, anche la quantità di materia  $n$  rientra nella stessa categoria delle grandezze  $Q$ ,  $H$ ,  $L$  e  $\Phi$ . Per una porzione di materia in un contenitore chiuso, in modo che venga impedito ogni scambio di materia, la grandezza  $n$  può assumere solo valori discreti, e proprio solo quei valori che so-

---

<sup>§</sup> Nel caso del moto in una dimensione – per esempio una particella che oscilla o rimbalza tra due pareti elastiche – l'azione  $H$  è semplicemente l'area della superficie delimitata dalla traiettoria chiusa descritta nello spazio delle fasi della coordinata e della quantità di moto.

no multipli  $N$  volte di una unità minimale  $\tau^{**}$ . Detto in breve,  $n$  è in questo caso quantizzata per interi con  $N$  numero quantico e  $\tau=1/N_A$  come il suo quanto universale:  $n = N \cdot N_A^{-1} = N \cdot \tau$ . Ma di solito, invece di tale quanto di materia viene utilizzato il suo inverso, ossia la costante di *Avogadro*  $N_A = \tau^{-1}$ . In tal modo si mette in ombra una simmetria formale e concettuale in grado di semplificare sia l'apprendimento che l'utilizzo dei calcoli delle varie grandezze fisiche. A meno che non aggiungiamo alle proprietà matematiche conosciute del concetto di quantizzazione qualche segreto enigma, non rimangono basi ragionevoli da giustificare tale situazione speciale per la grandezza  $n$ . Al contrario viene creata una situazione curiosa nei calcoli della fisica, solo qui, senza riscontri altrove. Infatti ci accorgiamo di quanto sia strano questo modo di procedere se al posto della carica elementare  $e$  proviamo ad utilizzare il suo valore inverso  $Z_M = e^{-1}$ . La costante naturale  $Z_M$ , chiamiamola numero di *Millikan*, sarebbe definita come il numero di quanti o delle porzioni più piccole in cui possiamo suddividere la carica di 1 As. Espresso in modo leggermente diverso  $Z_M = z/Q$ , dove  $z$  rappresenta il numero di cariche e  $Q$  la quantità di carica del corpo elettrizzato di prova.

### *Origine:*

Fino a quando la quantità di materia è stata identificata con la massa, mancavano proprio le basi per separare i due concetti e introdurre misure specifiche. Molti fisici per lungo tempo considerarono il concetto di quantità di materia, quale si è formato in chimica, non solo superfluo, ma anche abbastanza sospetto. Inoltre ha contribuito la sua parte il fatto che i chimici trattano questo concetto con disinvoltura, utilizzando in vari modi unità particolari, come grammo atomo, grammo molecola, grammo equivalente, oppure la sostanza equivalente a 1 mole di idrogeno.

L'unità che oggi tutti chiamano mol viene considerata solamente una unità di massa specifica per le sostanze materiali e sentita così bizzarra come una unità di lunghezza a diffusione locale. Nella teoria meccanica del calore e nella fisica statistica è il numero di particelle  $N$  ad imporsi come concetto primario, in confronto al quale la quantità di materia  $n$  appare una misura comoda ma non indispensabile, da usare quando il numero di oggetti diventa molto grande. Tutte queste circostanze hanno contribuito ad impedire uno sviluppo simile a quello avvenuto per la carica elettrica, con la conseguenza che la grandezza  $n$  in fisica assume tutt'al più un ruolo secondario e il suo quanto elementare  $\tau$  – al contrario del quanto di carica  $e$  – si atrofizza diventando il valore inverso di una specie di unità numerica.

### *Eliminazione:*

È chiaramente evidente l'opportunità di rappresentare fatti analoghi con formule analoghe. I vantaggi si manifestano però spesso in un contesto più vasto e mai nei piccoli dettagli discussi in precedenza. La rinuncia alla grandezza  $N_A$  in favore di  $\tau$  sarebbe però un primo passo nella giusta direzione.

### *Georg Job*

---

\*\* G. Falk ha introdotto il simbolo ( $\tau$  dall'iniziale della parola *Teilchen*, particella) per indicare questa grandezza in: *Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts - Was ist eigentlich Atomistik?* [Concetti per lezioni di fisica all'altezza dei tempi - Che cosa è in realtà l'atomismo?] Sektion 5, Heft 2, Schrödel, Hannover, 1978, p. 9.

## Due tipi di carica elettrica

### *Tema:*

Esistono due tipi di carica elettrica: cariche con lo stesso nome si respingono, cariche con nome differente si attraggono.

### *Difetti:*

Questo modo di esprimersi fa pensare che i due tipi di carica elettrica siano due diverse grandezze fisiche. Chiamiamole una  $Q_A$  e l'altra  $Q_B$ . Infatti si può descrivere lo stato di carica di un corpo fornendo la quantità contenuta della grandezza  $Q_A$  e la quantità contenuta della grandezza  $Q_B$ . Però le grandezze  $Q_A$  e  $Q_B$  possiedono una proprietà indesiderata: per esse non vale alcuna legge di conservazione. Ma la creazione e l'annichilazione di  $Q_A$  e  $Q_B$  sono tra loro accoppiate: quando viene creata  $Q_A$ , contemporaneamente deve venire creata una identica quantità di  $Q_B$ . Sia dal punto di vista matematico che da quello concettuale è molto più semplice introdurre un'unica grandezza "carica elettrica", che, come molte altre grandezze fisiche, può assumere valori positivi e negativi. Per tale grandezza vale naturalmente la legge di conservazione.

La situazione è ancora più complicata nel caso dei poli magnetici. Mentre per l'elettricità almeno i nomi (positivo e negativo) esprimono la relazione tra i due "tipi" di carica, i nomi "Nord" e "Sud" con cui sono indicati i poli di un magnete non lasciano intuire quasi niente del semplice fatto che l'intensità dei poli di un magnete si può descrivere per mezzo di un'unica grandezza estensiva. I nomi fanno pensare che i poli di un magnete siano di qualità così diverse, che non si possa passare facilmente dall'una all'altra, analogamente a quanto avviene per le qualità "maschile" e "femminile" di esseri umani e animali.

### *Origine:*

Durante i primi tentativi di descrivere i fenomeni elettrostatici si pose la domanda, se si trattasse di due "fluidi elettrici" diversi oppure di uno solo. La teoria dei due fluidi si è conservata fino ad oggi nel linguaggio della fisica.

### *Eliminazione:*

Si eviti di parlare di due tipi di carica elettrica. Esiste una sola grandezza fisica carica elettrica, la quale può assumere valori positivi e negativi. I due poli di un magnete vanno indicati come polo positivo e polo negativo. Invece di cariche (poli magnetici) dello stesso tipo o di tipo opposto, si parla di cariche (poli magnetici) dello stesso segno o di segno opposto.

*Friedrich Herrmann*



## La convenzione sulla direzione della corrente

*Tema:*

La direzione della corrente elettrica si basa su di una convenzione. Prima che si sapesse degli elettroni, si era stabilito che la corrente elettrica fluiva dal polo positivo della sorgente di corrente attraverso il circuito fino al polo negativo.

*Difetti:*

Quando si parla della direzione della corrente elettrica, si parla della direzione di un vettore. Il vettore che caratterizza la corrente elettrica è il vettore densità di corrente elettrica, così come il vettore densità della corrente di energia e il vettore densità della corrente di massa fissano rispettivamente la direzione della corrente di energia e della corrente di massa.

Ma la direzione del vettore densità di corrente non si basa su di una convenzione, deriva invece dall'equazione di continuità per la carica elettrica, che mette in relazione la densità di carica  $\rho$  con la densità di corrente  $\vec{j}$  :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0 .$$

L'equazione afferma che la densità di carica  $\rho$  diminuisce in un punto in cui la divergenza di  $\vec{j}$  è positiva. In altre parole: la carica contenuta in un volume diminuisce quando da questo esce una corrente elettrica. Si vede che l'orientazione del vettore densità di corrente è fissata una volta che si è deciso il segno della carica elettrica (e quindi della densità di carica). Di fatto si può cambiare la definizione della direzione della corrente, ma soltanto se si cambia il segno della carica elettrica. Ma l'affermazione sopra citata non vuol dire questo.

*Origine:*

“La direzione della corrente” che come dicono si basa su di una convenzione, non è la direzione del vettore densità di corrente  $\vec{j}$  , ma piuttosto la direzione media del movimento dei portatori di carica, cioè la direzione della velocità di deriva  $\vec{v}$  dei portatori di carica. Queste due grandezze vettoriali sono legate dalla relazione:

$$\vec{j} = \rho \cdot \vec{v} .$$

Perciò è lo stesso se portatori di carica positivi ( $\rho > 0$ ) si muovono verso destra, o se portatori di carica negativi ( $\rho < 0$ ) si muovono verso sinistra: la direzione di  $\vec{j}$  è in entrambi i casi verso destra. La direzione di  $\vec{v}$  va insieme con la densità della corrente di massa e con la densità della corrente di materia dei portatori di

carica. Si potrebbe caratterizzare l'errore che viene commesso così: la corrente di carica viene confusa con la corrente di massa e con la corrente di materia.

### *Eliminazione:*

Si distingue con cura tra carica e portatori di carica. Si distingue quindi tra le due direzioni del "movimento": quella della carica elettrica e quella dei portatori di carica. Mentre la carica elettrica fluisce dal potenziale più alto a quello più basso, i portatori di carica si muovono in una direzione o nell'altra a seconda del segno della loro carica.

Per chiarire questa distinzione, io eseguo in classe volentieri il seguente "esperimento": faccio passare dei gettoni rossi e blu lungo una fila di banchi. Stabiliamo che ogni gettone rosso vale 10 €, e che ogni gettone blu rappresenta un debito di ugual valore, ossia vale -10 €. Ciascuno studente, con eccezione dei due alle estremità, ha un gettone rosso e un gettone blu, cioè ha una somma di denaro nulla. Ora ci proponiamo di fare degli esempi di trasporto di denaro dallo studente all'estremità sinistra della catena a quello all'estremità destra. Il primo trasporto di denaro va così: un metronomo viene posto sulla cattedra, e ad ogni battito ogni studente dà il suo gettone rosso al vicino di destra. Ciascuno studente rimane con la sua somma di denaro nulla, solo quello all'estremità sinistra diventa sempre più povero, mentre quello alla destra diventa sempre più ricco. Dopo di che realizziamo un trasporto di denaro da sinistra a destra nel modo seguente: ad ogni battito del metronomo ogni studente dà un gettone blu al suo vicino di sinistra. Di nuovo ogni studente rimane con una somma di denaro nulla, eccettuati gli estremi, e di nuovo quello di sinistra diventa povero, quello di destra ricco. Un terzo metodo consiste nel passare, ad ogni battito del metronomo, sia un gettone rosso a destra che un gettone blu a sinistra. In ciascuno dei tre casi fluisce del denaro da sinistra a destra, ma i portatori di denaro possono muoversi sia verso destra che verso sinistra.

*Friedrich Herrmann*

## La capacità elettrica

### Tema:

La capacità elettrica viene definita come quoziente tra la carica  $Q$  e la differenza di potenziale  $U$ :

$$C = Q/U .$$

### Difetti:

La parola capacità viene dal latino *capacitas*. Nel linguaggio comune essa ha essenzialmente mantenuto il suo significato originario: la capacità di contenere qualcosa. Anche nelle lingue anglosassoni e in tedesco essa viene usata in questo senso. In alcuni testi di fisica questo significato viene espressamente indicato quando si introduce la grandezza fisica “capacità elettrica”. Se però si pensa al significato comune della parola, si capisce in modo inesatto la grandezza  $C$ .

La capacità che ha un sistema di contenere una qualsiasi quantità viene infatti misurata nella stessa unità della quantità considerata: quella di un camion in tonnellate, la stessa unità del carico; quella di un contenitore di dati in bit, l’unità usata per misurare la quantità di dati immagazzinata; quella di una bottiglia in litri, l’unità di misura dei volumi di liquido; quella di una batteria in joule, l’unità per l’energia contenuta; quella di un ascensore in numero di persone. Di questo passo ci aspetteremmo che la grandezza  $C$  misuri la capacità di un condensatore di contenere la carica elettrica. Se così fosse, allora  $C$  dovrebbe essere misurata in coulomb.

La grandezza  $C$  però non dice nulla sulla capacità di contenere carica. Essa invece dice quanto è facile caricare un condensatore. Possiamo determinare una reale misura per la carica  $Q_{\max}$  che il condensatore può contenere a partire da  $C$  e dalla tensione massima  $U_{\max}$  che il condensatore può sopportare:

$$Q_{\max} = C \cdot U_{\max} .$$

Infatti, tra le caratteristiche di un condensatore, oltre alla capacità viene anche dato  $U_{\max}$ .

Ci si potrebbe chiedere se un termine inadeguato sia veramente causa di rilevanti difficoltà di apprendimento. Sicuramente non sempre. Certamente il processo di imparare non viene disturbato se non ci si rende più conto del significato originario del termine, e uno più adeguato non migliora certo le cose. Questo potrebbe essere il caso per la “permeabilità” (il termine esprime malamente il significato della grandezza  $\mu$ , che in realtà caratterizza la grandezza inversa), la “permettività” (il termine è talmente incolore da non dire quasi nulla sulla grandezza  $\epsilon$ ), oppure la “susceptibilità” (termine che invece descrive assai bene il significato di  $\chi$ ). Più il termine è comprensibile e suggestivo, più ci si deve aspettare che influenzi il processo di apprendimento.

### Origine:

Non siamo riusciti ad identificare la prima volta in cui il termine capacità è stato usato. In ogni caso *Maxwell* lo ha usato con il significato che ancora oggi ha nella fisica.

*Eliminazione:*

Non sarebbe realistico fare una proposta per un altro termine. Però si sottolinei nelle lezioni che  $C$  non è una capacità di contenere carica, ma che invece il valore di questa grandezza ci dice quanto sia facile o meno caricare un condensatore.

*Friedrich Herrmann*

## Il campo come regione di spazio con proprietà

### Tema:

In generale il concetto di campo viene considerato difficile. Leggendo i libri scolastici si ha l'impressione che si tratti di una creazione piena di misteri. Ecco alcuni esempi tipici: "L'attrazione ... è indipendente dalla materia interposta e avviene anche nello spazio vuoto, cioè senza materia! Questo conferisce un significato particolare allo spazio intorno al magnete; esso viene chiamato campo magnetico...". /1/ "Lo spazio, anche privo di materia e vuoto, diventa portatore di una proprietà fisica. Un tale spazio viene chiamato campo." /2/ "Lo spazio intorno al magnete, nel quale sono osservabili azioni magnetiche, si chiama campo magnetico." /3/ "Nello spazio attorno ad un magnete vengono esercitate forze sui materiali ferromagnetici e su altri magneti. Questa proprietà dello spazio si chiama campo magnetico." /4/ "Attorno ai magneti permanenti e ai fili percorsi da corrente esistono campi magnetici." /5/ "Se uno spazio possiede la proprietà che in ogni punto di esso un dipolo magnetico subisce delle forze, diciamo che nello spazio esiste un campo magnetico." /6/

### Difetti:

Un campo è un sistema fisico, che essenzialmente non è diverso da altri sistemi "materiali", come il gas, il corpo rigido o il sistema di elettroni di un corpo solido. Come gli altri sistemi, il campo possiede energia, quantità di moto, momento angolare e in certi stati anche entropia. Come gli altri sistemi "materiali" ha una pressione e in certi stati anche una temperatura. E come gli altri sistemi possiede anche porzioni elementari, nel caso del campo elettromagnetico i fotoni.

È quindi giustificato farsene un'idea altrettanto concreta come quella di una sostanza materiale, acqua o aria per esempio.

In alcune delle citazioni precedenti il campo viene indicato come "spazio". Ma non considera ogni studente di oggi lo spazio come qualcosa di vuoto? Però questo spazio vuoto deve possedere proprietà fisiche. Come può essere, dal momento che è vuoto? Secondo una delle definizioni il campo è perfino la proprietà stessa. Ma chi ha questa proprietà? Secondo altre definizioni nello spazio "esiste" un campo. Perché esistere, perché non semplicemente il campo "c'è" o "si trova" nello spazio? Non dobbiamo meravigliarci se il concetto di campo introdotto in questo modo non riesca ad entrare in testa agli studenti.

### Origine:

L'origine di questa difficoltà è facilmente rintracciabile. Per *Faraday*, l'inventore del concetto di campo, questo era qualcosa di molto semplice, un concetto che non esigeva grandi capacità di astrazione. Per lui e per i suoi contemporanei l'intero spazio era riempito da un mezzo, l'etere, del quale si aveva un'idea abbastanza concreta. E non meno concreti erano i campi: erano delle regioni di questo etere in determinati stati che cambiavano a seconda del campo. La differenza tra lo stato dell'etere senza campo e lo stato con il campo sono gli sforzi meccanici presenti in quest'ultimo caso.

*Maxwell*, che diede forma matematica alle idee di *Faraday*, definì il campo nel seguente modo: "Il campo elettrico è la regione di spazio nelle vicinanze dei corpi elettrizzati, considerata in riferimento ai fenomeni

elettrici. Può essere occupata da aria o da altri corpi, o può essere anche il cosiddetto vuoto, dal quale abbiamo tolto ogni sostanza su cui possiamo agire con i mezzi a nostra disposizione.”<sup>7/</sup>

Facciamo attenzione che anche per *Maxwell* l'intero spazio era riempito di etere, cioè per lui spazio ed etere erano la stessa cosa. Una conseguenza dell'esperimento di *Michelson e Morley* e della teoria della Relatività fu che l'etere non aveva quelle semplici proprietà meccaniche che fino ad allora gli erano state attribuite. La conclusione forse affrettata che molti tirarono fu che l'etere non esistesse proprio. Di fatto il concetto di etere sparì da quasi tutti i libri di fisica, con qualche eccezione. Ma con questo il concetto di campo perse il suo fondamento. Prima il campo era uno stato particolare dell'etere, ora divenne uno stato particolare di qualcosa che non esiste. La frattura logica che si venne a creare non fu notata, visto che *Maxwell* stesso aveva definito il campo come una “regione di spazio”. Di fatto però per *Maxwell* lo spazio senza etere era impensabile. Ma il periodo in cui il campo rimase senza fondamento concettuale non sarebbe dovuto durare a lungo. Infatti nello stesso tempo, all'inizio del XX secolo, diventava sempre più evidente, specialmente attraverso i lavori di *Planck* sulla radiazione, che il campo elettromagnetico era un sistema fisico come gli altri. Ma purtroppo il concetto di campo è sopravvissuto fino ad oggi nello stato bruttino in cui era finito subito dopo la pubblicazione della teoria della relatività speciale.

Un'ulteriore ragione contribuisce alla confusione sul concetto di campo, oltre al suo complicato sviluppo storico: il termine campo viene adoperato come nome sia di un sistema fisico che di un concetto matematico. Come tale indica la distribuzione dei valori di una grandezza nello spazio. Così si parla di campi di temperatura, di pressione e di densità. Ma spesso i due significati non sono tenuti ben distinti. Spesso nei libri di testo si parla semplicemente di campo elettrico  $\vec{E}$ . Bisognerebbe evitare tali affermazioni, perché non è chiaro se si intende il sistema fisico “campo elettrico” oppure la distribuzione spaziale della grandezza fisica “intensità del campo elettrico  $\vec{E}(x,y,z)$ ”.

#### *Eliminazione:*

Introducendo il concetto di campo è raccomandabile comportarsi come quando si introducono altri sistemi materiali. Volendo chiarire che cosa è un gas perfetto, potremmo cominciare così: “un gas ideale è un sistema o una sostanza o un oggetto con le seguenti proprietà...”. In modo simile si dovrebbe introdurre per esempio un campo elettrico: “il campo elettrico è un sistema fisico con le seguenti proprietà...”.

Quanto maldestro sia introdurre un campo come uno spazio con speciali proprietà fisiche, lo si capisce se si pensa che non sarebbe del tutto sbagliato definire, per esempio l'aria, come “uno spazio con particolari proprietà fisiche”. E chi lo farebbe?

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ Dorn-Bader: *Physik, Mittelstufe*. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover, 1980, p. 264.

/2/ Metzler Physik: Joachim Grehn (Ed.). J. B. Metzlersche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1991, p. 86.

/3/ *Physik für Gymnasien*, Länderausgabe B, Gesamtband. Cornelsen, Berlin, 1991, p. 250.

/4/ W. Kuhn: *Physik, Band I*. Westermann, Braunschweig, 1990, p. 217.

/5/ *Einführung in die Physik*, Sekundarstufe I, Ausgabe E. Diesterweg-Sauerländer, Frankfurt, 1987, p. 294p

/6/ Gross Berhag: *Felder*. Ernst Klett, Stuttgart, 1985, p. 60.

/7/ J. C. Maxwell: *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954, Vol 1, p. 47.

## Superfici equipotenziali

### *Tema:*

Per rappresentare graficamente un campo di solito viene disegnata l'immagine delle linee di campo. I campi elettrostatici talvolta vengono rappresentati con le superfici ortogonali alle linee di campo, che in questo caso si chiamano superfici equipotenziali.

L'immagine con le linee esprime due aspetti di un campo:

1. indica la direzione del vettore intensità del campo in ogni punto. Questi vettori sono tangenti alle linee di campo.
2. indica dove sono le "sorgenti" del campo. Sono i luoghi dove le linee cominciano o finiscono.

Talvolta si sostiene anche che nella densità delle linee si può leggere il valore del vettore dell'intensità del campo. In verità questo si può fare solo in casi particolari /1, 2/.

### *Difetti:*

Con la rappresentazione grafica di un campo si vedono in un colpo d'occhio cose che sarebbe complicato esprimere a parole. Anche se ci sono tante possibilità differenti per questa rappresentazione, per lo più ci limitiamo ad un'unica procedura: l'immagine delle linee di campo. Ci siamo così abituati a questo modo di rappresentare, che non ci poniamo neppure la domanda se esistano modi alternativi. Le superfici ortogonali alle linee di campo sono un'alternativa molto utile.

Poiché trasmettiamo un'idea molto poco concreta dei campi, le linee diventano facilmente l'unico filo di speranza. Così capita che spesso gli studenti identificano il campo con le linee di campo.

### *Origine:*

Originalmente le linee di campo si chiamavano linee di forza e le superfici del campo superfici di livello. Per *Maxwell* era naturale rappresentarle entrambe per ogni tipo di campo, figura 1. Questo modo di fare era per lui il mezzo di produrre una immagine molto significativa di un oggetto non visibile. Tra i due secoli, quando si cercava di eliminare l'etere dalla fisica, il campo si è trovato mal ridotto a concetto molto astratto. Da quel momento in poi le linee di campo si riducono ad ausili matematici che permettono di rappresentare la direzione della forza su di un corpo di prova. Le superfici ortogonali sono sopravvissute solo come superfici equipotenziali per determinati tipi di campo, cioè quelli di gradiente. L'idea dominante diventa: il potenziale può essere definito solo in un campo di potenziale, e quindi ci sono superfici equipotenziali solo in questo tipo di campi. Non ci si è accorti che quello che non va è solo il nome. Infatti possiamo lo stesso tracciare le superfici ortogonali. Esse non sono più superfici equipotenziali, ma non hanno perduto la loro utilità nella rappresentazione dei campi. Al contrario esse sono molto importanti proprio per i campi che non ammettono potenziale, poiché ci dicono dove la rotazione del campo è diversa da zero.

### Eliminazione:

Nel seguito vogliamo chiamare *sorgenti di flusso* i punti dove le linee di campo cominciano o finiscono, cioè dove la divergenza del campo vettoriale è diversa da zero. Con il termine *sorgenti di vortice* chiamiamo i punti dove il rotore del campo vettoriale è diverso da zero.

Così come le linee di campo cominciano e finiscono sulle sorgenti di flusso, le superfici ortogonali cominciano e finiscono sulle sorgenti di vortice. Dall'immagine delle linee di campo si riconosce la posizione delle sorgenti di flusso, da quella delle superfici ortogonali la posizione delle sorgenti di vortice. Al meglio si tracciano sia le linee di campo che le superfici ortogonali (in una sezione bidimensionale anch'esse linee).

Consideriamo per esempio un campo elettrico. Le sorgenti di flusso sono in questo caso cariche elettriche, le sorgenti di vortice sono i luoghi dove il flusso magnetico cambia nel tempo. La figura 2 contiene due sorgenti lineari di carica (due fili sottili elettricamente carichi che giacciono perpendicolarmente al piano del disegno), e tre sottili bobine in cui il flusso magnetico cambia (anch'esse filiformi e perpendicolari al piano del disegno, e quindi anch'esse rappresentate da punti).

L'immagine può essere anche interpretata come un campo magnetico. Le sorgenti di flusso sono in questo caso le cariche magnetiche (poli magnetici filiformi), le sorgenti di vortice sono le correnti elettriche.

### Friedrich Herrmann

/1/ A. Wolf, S. J. van Hook e E.R. Weeks: *Electric field line diagrams don't work*. American Journal of Physics 64, 1996, p. 714 - 724.

/2/ F. Herrmann, H. Hauptmann, M. Suleder: *Representations of Electric and Magnetic Fields*. American Journal of Physics 68, p. 171.

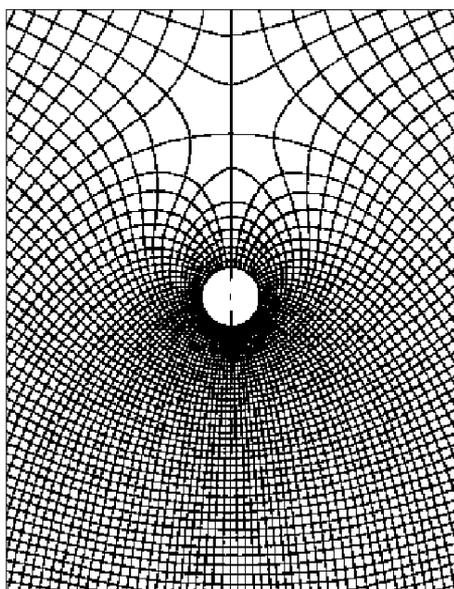


Figura 1. Sovrapposizione del campo magnetico di una corrente elettrica (perpendicolare al piano del disegno) e di un campo magnetico uniforme nel libro di Maxwell "Elettricità e Magnetismo".

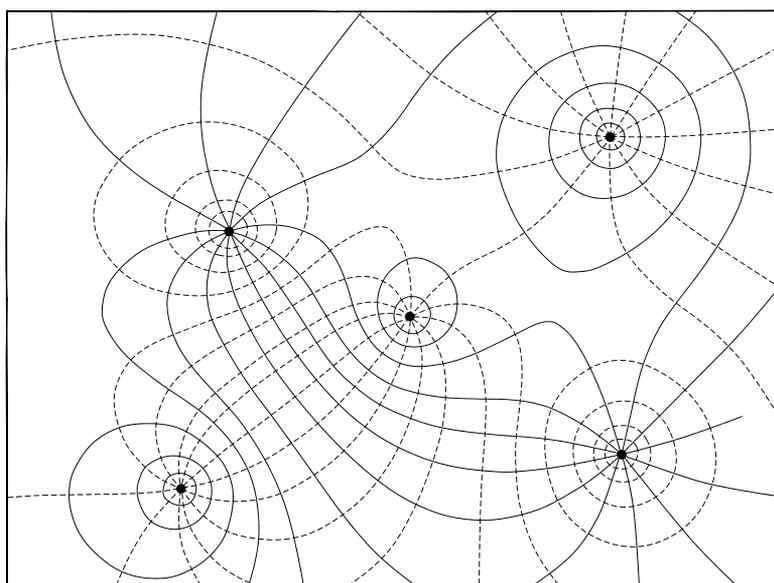


Figura 2. Campo con due sorgenti di flusso e tre sorgenti di vortice (linee di campo: linee tratteggiate, superfici di campo: linee continue).

## Poli magnetici

### Tema:

1. Vengono chiamati poli di un magnete i luoghi dove l'attrazione è più intensa, dove rimangono attaccati la maggior parte dei chiodi o della limatura di ferro. Essi vengono indicati con due colori diversi: rosso (Sud) e verde (Nord).
2. La descrizione dell'interazione tra poli magnetici si limita ad affermazioni su attrazione e repulsione, cioè sulla direzione della forza.

### Difetti:

La magnetizzazione è un campo vettoriale che descrive la densità di dipolo magnetico. I poli di un magnete sono i luoghi dove cominciano o finiscono le linee della magnetizzazione. La grandezza fisica con la quale si possono descrivere quantitativamente i poli magnetici è l'intensità del polo, ovvero la sua carica magnetica  $Q_m$ . Essa è l'analogo della carica elettrica, o meglio, della carica elettrica legata, come quella che si trova sulla superficie di un dielettrico polarizzato. Solo che la carica magnetica non viene affatto introdotta nella quasi totalità dei libri di scuola. Ma senza di essa diventa molto difficile descrivere quantitativamente i magneti permanenti.

La relazione analoga a quella elettrostatica  $\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$  è la seguente  $\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$  /1/. Però nei libri di testo viene formulata ancora meno della legge di Coulomb per i poli magnetici. Del semplice bilancio quantitativo secondo il quale la carica magnetica totale di ogni corpo è uguale a zero /2/, rimane solo la pallida constatazione che ogni magnete ha due poli di tipo diverso.

In un normale magnete a barra le linee della magnetizzazione finiscono sulle superfici estreme. Questo vuol dire che proprio qui si trova la carica magnetica. I poli allora sono le estremità del magnete. Ma queste non coincidono con i luoghi dove rimane attaccata la limatura di ferro. Infatti questa rimane appesa dove il campo del magnete permanente è più intenso. La conseguenza per l'aspetto delle linee di campo è la seguente: la maggior parte della limatura rimane appesa dove le linee sono più dense. Ma le linee di campo non escono solo dai poli, ma anche da tutte le altre parti del magnete, nel caso dei magneti a barra anche lateralmente /3,4/. Di fatto la limatura di ferro non è un indicatore dei poli, ma di una grande intensità del campo. La confusione tra i luoghi in cui il campo è più intenso con i poli del magnete viene confermata colorando il magnete in rosso e verde.

### Origine:

La carica magnetica ovvero l'intensità dei poli magnetici in passato compariva in ogni libro di elettrodinamica per le scuole. Che sia più tardi sparita da quasi tutti i libri è stato probabilmente causato da un malinteso. Dal fatto che non si sia mai trovato un polo magnetico isolato si è tirata la conclusione che non si debba usare la grandezza fisica con la quale l'avremmo descritto. Ma le grandezze fisiche non sono cose che si trovano in natura, ma costruzioni degli esseri umani. Se si debba introdurre o meno una nuova grandezza fisica

è solo una questione di opportunità. L'opportunità di introdurre la carica magnetica si vede per esempio dal fatto che senza non si può formulare la legge di *Coulomb* per il magnetismo.

La legge di *Coulomb* per la carica elettrica ha un ruolo molto importante nell'impostazione tradizionale della fisica, mentre l'analoga legge per il magnetismo nessuno. Questo mostra che i contenuti disciplinari talvolta sono creati più da convenzioni che da necessità oggettive.

#### *Eliminazione:*

Si introduca la grandezza estensiva carica magnetica.

Si formuli il teorema: "La carica totale di ogni magnete è uguale a zero". La validità di questo risultato può essere dimostrato dagli esperimenti, per esempio così: con dei pezzi di sughero un magnete a barra viene messo a galleggiare in acqua. Esso ruota in direzione Nord Sud senza fare movimenti di traslazione. (Questo esperimento fu proposto già da *Maxwell*).

Il fatto che spezzando un magnete si creano nuovi poli con cariche magnetiche uguali e opposte è una semplice conseguenza di questo teorema.

Si dimostri che i poli di un magnete a ferro di cavallo sono le due superfici estreme mettendone due l'uno contro l'altro in modo che i poli si compensino: l'insieme dei due magneti non è più in grado di attirare pezzi di ferro di medie dimensioni. (Per questo esperimento ci vogliono due magneti identici. Basta già il normale uso nelle lezioni perché la magnetizzazione cambi. Io conservo due magneti apposta per questo esperimento, e non li uso per altri esperimenti che potrebbero cambiare la magnetizzazione).

Si osservi che alcuni magneti a forma di U sono fatti di tre parti diverse: un grosso magnete a barra e i due a lato di ferro dolce. Quest'ultimo è facilmente magnetizzabile: la magnetizzazione e quindi anche la posizione dei poli cambia a causa dell'influsso di un campo esterno. La caratterizzazione con i colori è particolarmente inadatta con queste parti in ferro dolce, poiché è facile creare un polo Nord nel lato verde e un polo Sud in quello rosso.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ W. Macke: *Elektromagnetische Felder [Campi elettromagnetici]*. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1960, p. 77.

/2/ J. C. Maxwell: *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Dover, New York, 1954, p.7.

/3/ A. Sommerfeld: *Vorlesungen über Theoretische Physik, Band III*, Elektrodynamik. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1964, p. 78.

/4/ F. Herrmann: *Magnetische Eigenschaften von Materialien im Unterricht. [Proprietà magnetiche dei materiali in classe]*. Praxis der Naturwissenschaften 8, 1995, p. 17.

## La lente condensatrice

### *Tema:*

La lente condensatrice concentra la luce della lampada sulla diapositiva. Questo fa aumentare la sua luminosità.

La lente condensatrice fa in modo che la luce della lampada illumini uniformemente la diapositiva.

La lente condensatrice devia tutta la luce che incide sulla diapositiva sulla lente dell'obiettivo.

La lente condensatrice deve essere più grande della diapositiva, per ottenere una illuminazione uniforme.

La lente condensatrice deve avere un diametro maggiore della diagonale della diapositiva, solo così quest'ultima può essere illuminata completamente.

La lente condensatrice deve essere disposta in modo da convogliare il fascio di luce più grande possibile attraverso la diapositiva verso l'obiettivo.

### *Difetti:*

Alla domanda per quale motivo un proiettore ha una lente condensatrice, gli studenti all'esame rispondono abbastanza regolarmente: "Allo scopo di illuminare di più la diapositiva".

Non ho saputo mai veramente cosa fare con una tale risposta. Non la capivo, ma non ero sicuro se forse il collega con il quale lo studente aveva seguito il corso di ottica, avesse spiegato meglio questo concetto di "illuminare". Poi mi sono messo a consultare alcuni libri di scuola e di università e un dizionario specialistico di fisica, e ho trovato un ampio spettro di spiegazioni per la lente condensatrice, delle quali sopra ne trovate alcune, tipiche ma non letterali: un pasticcio di giusto, sbagliato e incomprensibile.

A che cosa serve la lente condensatrice? Esclusivamente a cambiare le direzioni della luce che illumina la diapositiva, in modo tale che tutta la luce che incide sulla diapositiva arrivi all'obiettivo. Perciò si forma un'immagine della sorgente di luce sull'obiettivo.

Esaminiamo ora le affermazioni una per una:

1. Non è giusto. La luce non viene concentrata sulla diapositiva, la luminosità dei punti della diapositiva non aumenta (assumiamo che per luminosità si intenda la densità della corrente di energia).

2. Non è giusto. La distribuzione della luce sulla diapositiva non viene resa più uniforme dalla lente condensatrice, e non ne ha bisogno poiché è già sufficientemente uniforme senza di questa.

3. Giusto.

4. e 5. Oscuri. Il fatto che la lente condensatrice non debba essere più piccola della diapositiva è giusto ma ovvio, altrimenti le parti esterne della diapositiva rimarrebbero nell'ombra della montatura della lente. Ma questa non rende più uniforme l'illuminazione della diapositiva (analogamente a sopra assumiamo che per illuminazione si intenda la distribuzione della densità della corrente di energia).

6. Oscuro. “Cosa significa disposta in modo da...”? La sua posizione? Questa in ogni caso deve trovarsi subito prima della diapositiva. Se fosse più lontana dovrebbe avere un diametro più grande di quello della diapositiva e la lente condensatrice sarebbe più pesante e più cara.

*Origine:*

L'ottica geometrica attribuisce troppa importanza alla formazione delle immagini e troppo poca alla descrizione della distribuzione di luce.

*Eliminazione:*

Si spieghi la funzione della lente condensatrice in modo chiaro ed esatto, come per esempio al punto 3 citato in precedenza.

*Friedrich Herrmann*

## Amplificatori

### *Tema:*

Nelle lezioni viene mostrato che i transistor (e anche le valvole) vengono adoperati per amplificare la tensione o la corrente elettrica. Di conseguenza si distingue tra amplificazione di corrente e di tensione. Per spiegare entrambi i processi bisogna spiegare il funzionamento del transistor, e quindi si studiano le caratteristiche e vengono introdotti molti termini tecnici.

### *Difetti:*

Come spesso accade nell'insegnamento della fisica si tiene di più a dettagli complicati e arbitrari che a ciò che è essenziale e anche semplice.

Il transistor amplificatore viene trattato nei minimi particolari. Si discutono le curve caratteristiche e i circuiti elettronici. Si distingue tra amplificazione di corrente e di tensione. Ma invece non viene nemmeno accennato quello che fa diventare un amplificatore uno strumento che abbia un segnale in ingresso e un segnale in uscita: un amplificatore deve aumentare la corrente di energia modulata che accompagna il segnale:

$$P_{\text{uscita}} > P_{\text{entrata}} .$$

Se si tratta di un amplificatore elettrico, e non di uno meccanico, acustico oppure ottico, possiamo scrivere la corrente di energia così:

$$P = U I .$$

Per un amplificatore di questo tipo vale anche:

$$U_{\text{uscita}} I_{\text{uscita}} > U_{\text{entrata}} I_{\text{entrata}} .$$

Naturalmente queste condizioni possono essere soddisfatte in vari modi. Così uno dei due valori  $U$  e  $I$  può addirittura diminuire.

Anche con un trasformatore si può "amplificare" la corrente o la tensione. Ma ciò nonostante il trasformatore non è quello che normalmente si intende per amplificatore, poiché non soddisfa alla richiesta che  $P$ , cioè il prodotto di  $U$  ed  $I$ , aumenti.

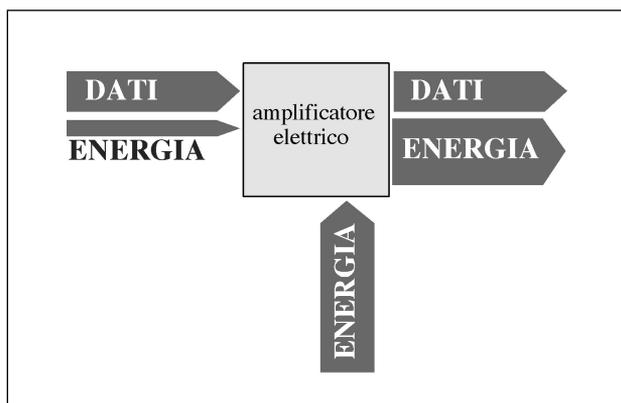
### *Origine:*

Probabilmente questo argomento è arrivato nella scuola attraverso gli esperti di elettronica. Il semplice fatto di aumentare la corrente di energia che accompagna un segnale sembra per loro così naturale, da non far più caso al fatto che a lezione esso non venga neppure accennato.

### *Eliminazione:*

Si introduca l'amplificatore nel modo seguente: per trasportare dati c'è bisogno di energia. Come per ogni altro trasporto, anche per trasportare dati si perde per strada quella parte di energia usata per produrre calore

(entropia). Il trasporto di dati ha quindi bisogno di tanto in tanto di nuova energia, di nuove “provviste per il viaggio”. Queste le ottiene nell’amplificatore. Un amplificatore ha un ingresso e una uscita per i dati insieme a tutta la loro energia. La corrente di dati, misurata in bit/s, è uguale in ingresso e in uscita. Siccome la corrente di energia  $P$  è maggiore in uscita che in ingresso, l’amplificatore ha bisogno di un ingresso aggiuntivo per l’energia: viene connesso ad una batteria o alla presa di rete. La figura 1 mostra il diagramma di flusso di un amplificatore.



La relazione

$$A = P_{\text{uscita}}/P_{\text{entrata}}$$

fornisce il fattore di amplificazione.

Si trattino esempi particolari anche non elettrici, sottolineando in ogni caso che la corrente di energia aumenta.

*Friedrich Herrmann*

## Coerenza

### *Tema:*

Il concetto di coerenza nei libri di testo viene spiegato e commentato in diversi modi. Le seguenti citazioni provengono da vari libri.

1. “Treni d’onda che interferiscono tra loro si dicono coerenti, invece incoerenti quelli che non interferiscono tra loro.”
2. “Due eccitatori si dicono coerenti quando creano una figura di interferenza che rimane sempre uguale. Per questo essi devono oscillare con la stessa frequenza e con una differenza di fase costante.”
3. “I treni d’onda di una sorgente estesa sono incoerenti, cioè hanno fasi e direzioni di polarizzazione del tutto diverse, ad esempio il filamento di una lampada incandescente, in cui i treni d’onda provenienti da due punti diversi raggiungono contemporaneamente l’occhio.”
4. “Si può ottenere interferenza solo con luce proveniente dallo stesso punto di una sorgente, dopo che questa abbia percorso cammini differenti.”
5. “Poiché la luce emessa spontaneamente da un corpo caldo viene irradiata dai singoli atomi in modo indipendente, è del tutto escluso che due sorgenti diverse, per caso, oscillino nello stesso modo, cioè irradiano treni d’onda coerenti.”
6. “Una fenditura può essere considerata una sorgente coerente solo se tra la sua larghezza  $d$  e l’angolo di apertura del cono di luce  $2\alpha$  vale la relazione:  $d \cdot \sin\alpha < \lambda/2$ .”

### *Difetti:*

Con il concetto di coerenza hanno difficoltà non solo gli studenti delle scuole secondarie, ma anche gli studenti universitari. Non c’è da meravigliarsi, come dimostrano le citazioni precedenti. Alcune di queste affermazioni sono di per sé enigmatiche, ma diventa ancora più difficile mettere d’accordo le diverse spiegazioni. Nel seguito i numeri in parentesi corrispondono ai numeri delle citazioni. A quale soggetto si rivolge un’affermazione sulla coerenza?

Secondo (1), (3), (5) ad una relazione tra due treni d’onda. Ma che cosa è un treno d’onda? L’intera onda? Una sequenza spaziale particolare di un’onda? E quale? Secondo la (2) la coerenza esprime una relazione tra due sorgenti, che devono oscillare con la stessa frequenza e con una differenza di fase costante. Dovrebbero quindi esserci sorgenti che oscillano sì con la stessa frequenza, ma con differenze di fase variabili? Come dobbiamo immaginare una tale oscillazione? Infine, per quanto riguarda la (6), la coerenza viene semplicemente attribuita alla luce.

Allora si tratta solo di differenti formulazioni dello stesso fatto, o alcune delle affermazioni sono in contraddizione tra loro?

La (3) sostiene che sia coerente solo la luce che proviene dallo stesso punto della sorgente. La (4), anche se non vi compare il termine coerenza, fa un'affermazione simile. Ma cosa sono in realtà due punti diversi? Quanto lontani possono essere al più i due punti? La (5) lo dice in modo ancora più chiaro: luce che proviene da atomi differenti non può essere coerente. Però la luce che viene da una stella viene usata per determinarne il raggio con l'aiuto di un interferometro di *Michelson*. Quindi si porta ad interferire luce che proviene da punti della stella distanti milioni di chilometri.

#### *Origine:*

Tutte le affermazioni da (1) a (6) dicono o come si produce luce coerente o come la si riconosce. Nessuna dice come è fatto un campo di onde coerenti o incoerenti. Se diciamo qualcosa solo sulle sorgenti, come facciamo a giudicare la coerenza di un campo di onde del quale non conosciamo le sorgenti, come per esempio le onde del mare? Vediamo qui la tendenza, invece di descrivere il fenomeno, di mettere in primo piano il processo di produzione o quello di riconoscimento del medesimo. Ma questi processi sono più complicati del fenomeno stesso. Per capire una bicicletta non bisogna conoscerne il processo di fabbricazione. Per capire che cosa è un'onda sonora non bisogna conoscere il funzionamento di una canna d'organo o dell'orecchio umano. Per farsi un'idea del campo elettrico non è necessario conoscere la forza sulla carica di prova.

Un'altra fonte di inesattezze potrebbe essere il considerare spiegato un fenomeno solo quando è stato ricondotto ad un'affermazione nel campo degli atomi. Ma invece la coerenza è un fenomeno che si può descrivere completamente con gli strumenti della teoria classica delle onde. Non appena si cerca un significato a livello dei fenomeni quantistici, si rischia di perdersi nella giungla dei modelli e delle interpretazioni.

#### *Eliminazione:*

Per prima cosa due osservazioni generali sul concetto di coerenza:

1. la coerenza più o meno spiccata è una proprietà della luce. Naturalmente la luce ha le sue proprietà grazie ad una sorgente. Ma questo non vuol dire che la coerenza sia una proprietà della sorgente;
2. la coerenza è una proprietà locale della luce. Questo significa che una data distribuzione di luce può essere più coerente in un luogo che in un altro, e in generale è proprio così. Così la luce emessa da una stella è spazialmente incoerente al massimo subito sopra la superficie della stella, mentre sulla Terra, cioè a grande distanza dalla stella, è spazialmente quasi perfettamente coerente. Quando diciamo che la coerenza è una proprietà locale della luce, non intendiamo però che essa vada riferita ad un punto in senso matematico. (Infatti, in questo senso nessuna grandezza fisica è locale).

Possiamo spiegare la coerenza in diversi modi. Essa si manifesta in ciascuna delle teorie con le quali usiamo descrivere la luce, e le più importanti sono l'ottica geometrica, l'ottica ondulatoria classica, la termodinamica e l'elettrodinamica quantistica. Poiché qui si tratta di spiegare il concetto a dei principianti, scegliamo la più semplice di queste teorie: l'ottica geometrica. Poi accenneremo come la spiegazione viene tradotta per l'ottica ondulatoria. Sconsigliamo le spiegazioni atomiche: questo è argomento dei corsi universitari di ottica quantistica. Qui inoltre ci limitiamo a valutazioni qualitative, e non definiamo alcuna misura per la coerenza.

Vogliamo descrivere la luce in una piccola zona davanti a noi. Che tipo di raggi attraversano questa zona di spazio? Consideriamo quattro situazioni particolarmente semplici.

Ci troviamo in una fitta nebbia. Questa zona viene attraversata da raggi di luce di tutte le direzioni, e abbiamo una mescolanza che contiene luci di tutti i colori spettrali. Nella figura 1 si accenna a questo con linee dal tratteggio differente. Successivamente immaginiamo di trovarci di notte, sempre con una fitta nebbia, sotto un lampione che emette una pura luce spettrale, gialla per esempio. La luce arriva sempre da direzioni le più diverse, figura 2. Una terza situazione: notte, nessuna nebbia, nessuna Luna e manco stelle. A grande

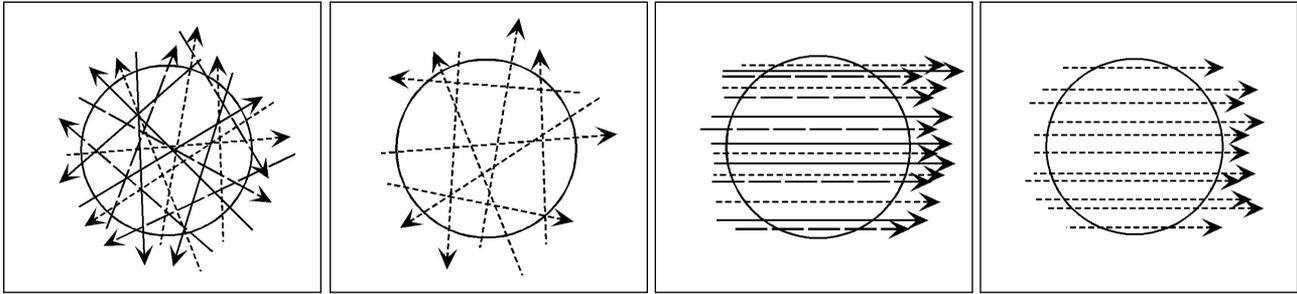


Figura 1. Tutti i colori, tutte le direzioni. La luce è spazialmente e temporalmente incoerente.

Figura 2. Un unico colore, tutte le direzioni. La luce è temporalmente coerente.

Figura 3. Una unica direzione, tutti i colori. La luce è spazialmente coerente.

Figura 4. Un solo colore, una sola direzione. La luce è temporalmente e spazialmente coerente.

distanza in orizzontale c'è una lampada a incandescenza. Tutti i raggi nella nostra zona hanno la stessa direzione, ma si tratta di luce di colori spettrali diversissimi, figura 3. Alla fine la stessa situazione di prima, ma la lampada emette una luce spettrale pura, figura 4. Adesso tutti i raggi hanno la stessa direzione, e tutta la luce ha lo stesso colore spettrale.

La luce della figura 1 è del tutto incoerente. La luce della figura 2 viene chiamata coerente nel tempo. “Temporalmente coerente” ha lo stesso significato di “spetttralmente pura”. La luce della figura 3 viene chiamata coerente nello spazio. Allora “spazialmente coerente” è il contrario di “diffusa”. Finalmente la luce della figura 4 è spazialmente e temporalmente coerente.

E ora un'analogia che potremmo raccontare agli studenti: davanti a noi c'è una grossa cesta con tante mele diverse. Le mele vengono distinte a seconda di due proprietà: dimensione e colore. Vogliamo assortire e mettere in ordine le mele. Cominciamo a dividerle per dimensione in 10 cassette: ognuna contiene mele in un certo intervallo di dimensioni. Le mele sono ora omogenee in ogni cassetta, per quanto riguarda uno dei due criteri d'ordine. Poi ordiniamo le mele di ogni cassetta secondo il colore, dividendo ciascuna cassetta in 10 diverse più piccole. Ora abbiamo 100 cassette nelle quali troviamo mele omogenee a seconda di entrambi i criteri d'ordine, dimensione e colore.

L'analogia tra le mele e la luce va ancora più in là. Infatti vediamo che ottenere dal mucchio misto una quantità di mele ordinata, riesce soltanto a patto di eliminare tutte le mele che non si adattano al criterio. Una mescolanza di mele non può essere trasformata in una quantità di mele “pure”, così come la luce incoerente non può essere trasformata in luce coerente. Questo avrebbe come conseguenza una distruzione dell'entropia, e questo sarebbe in contraddizione con il secondo principio della termodinamica. Possiamo però modificare gli alberi in modo che producano a priori solo un tipo di mele. Lo stesso accade per la luce. Ci sono sorgenti che a priori producono solo luce coerente, cioè i laser.

Ora accenniamo alla spiegazione secondo l'ottica ondulatoria: una luce è temporalmente coerente quando la dispersione dei valori del modulo del vettore d'onda  $\vec{k}$  è piccola, è spazialmente coerente quando invece è piccola la dispersione delle direzioni del vettore d'onda.

La coerenza si può vedere anche direttamente dalla rappresentazione grafica di un campo ondoso.

Prendiamo le onde di un lago, che sono un campo esteso, dove riconosciamo delle zone che sembrano sezioni di un'onda sinusoidale piana. Queste zone hanno una certa lunghezza e una certa larghezza. La lunghezza è una misura per la coerenza temporale, la larghezza è una misura per la coerenza spaziale.

*Friedrich Herrmann*



## Il principio di *Huygens*

### *Tema:*

Il principio di *Huygens* non serve solo per spiegare la diffrazione da una singola fenditura, da una doppia fenditura e da un reticolo, ma viene anche usato per descrivere la riflessione e la rifrazione.

### *Difetti:*

1. Il principio di *Huygens* è uno strumento matematico semplice per valutare la sovrapposizione costruttiva e distruttiva nei fenomeni di interferenza. Ma invece non viene usato nei più semplici, ma allo stesso tempo molto importanti esperimenti di diffrazione. Dal momento che sappiamo che c'è il fenomeno della diffrazione, è prevedibile che da una piccola apertura in un ostacolo, contro il quale si dirige l'onda, parta un'altra onda (circolare in due, sferica in tre dimensioni). Ancora meno abbiamo bisogno di una spiegazione speciale per il fatto che dietro una doppia fenditura si creano due onde e dietro un reticolo tante. Per questo e anche per la discussione delle corrispondenti figure di interferenza non abbiamo bisogno né del termine "onde elementari" né di un principio specifico. Avremo bisogno del principio di *Huygens* solo quando dovremo considerare una sezione più estesa del fronte d'onda in arrivo come sorgente di un'onda in partenza.

2. Non c'è bisogno del principio di *Huygens* neppure per la descrizione delle regolarità della riflessione e della rifrazione di un'onda piana, dove viene soltanto ricondotto il comportamento di un'onda piana a quello di molte onde sferiche. E ben noto che una funzione si può scomporre in quanti modi si vuole: in armoniche semplici, in armoniche sferiche, in funzioni di *Bessel* e molte altre. Per comodità si sceglie una scomposizione che tenga conto della simmetria del problema. Ma questo non si fa quando si scompone un'onda piana in onde elementari, cioè onde sferiche. L'onda piana originaria ha già la simmetria più alta che un'onda può avere, e quindi è sufficiente per capire la rifrazione e la riflessione.

3. Il termine principio è infelice, perché ci aspettiamo che si tratti di un'affermazione indipendente dalle ben note leggi fondamentali rispettivamente della meccanica e dell'elettrodinamica e sicuramente non è questo il caso. Tuttavia la dimostrazione che il principio di *Huygens* deriva dall'equazione d'onda, fa parte dei più difficili argomenti di ottica, vedi per esempio /1/.

4. Anche il termine onda elementare non è ben scelto, perché l'aggettivo elementare viene abitualmente utilizzato nel senso di: essenziale, fondamentale e irriducibile. Ma in questo senso le onde sferiche di *Huygens* non sono elementari per niente. Esse non rappresentano nient'altro che una delle tante scomposizioni matematiche possibili.

### *Origine:*

*Huygens* formulò il principio nel *Traité de la Lumière* apparso nel 1690. Mancavano cento anni al grande tempo dell'ottica ondulatoria di *Fresnel* e *Young*, e centocinquanta all'elettrodinamica di *Faraday* e *Maxwell*. Ai tempi di *Huygens* si conoscevano le leggi della rifrazione e della riflessione, il fatto che la velocità della luce fosse finita, e che la luce bianca fosse composta di parti colorate. Che ruolo ha dunque avuto il principio di *Huygens*, e perché ha mantenuto questo grande significato fino al giorno d'oggi?

C'era già una teoria "corpuscolare" della luce prima formulata da *Cartesio* poi approfondita da *Newton*. Contro questa *Huygens* propose una teoria ondulatoria. Allora, per essere valida, una teoria della luce doveva soprattutto essere capace di "spiegare" la riflessione e la rifrazione.

"Spiegare" voleva dire, come anche oggi, ricondurre un fenomeno ad un altro, considerato fondamentale e che non necessita di ulteriori spiegazioni. Si credeva che le onde elementari fossero uno di questi fenomeni che non necessitano di spiegazione.

Dopo *Fresnel* riflessione e rifrazione non avevano certo più bisogno di essere spiegate con le onde elementari, e quando finalmente veniva creata da *Maxwell* una vera teoria ondulatoria della luce, il metodo di *Huygens* come principio aveva finito il suo compito, anche se non era chiaro perché il "principio" basato sulla ipotesi di una onda meccanica longitudinale dovesse valere anche per le più complicate onde elettromagnetiche. Soltanto *Kirchhoff* ha finalmente derivato la validità del principio di *Huygens* dall'elettrodinamica.

Il ruolo che il principio di *Huygens* ha oggi nelle lezioni di scuola e università è sempre segnato dalla sua precedente importanza. Ma non diversamente anche la legge di *Lenz* e le leggi di *Keplero* sono sopravvissute alla successiva scoperta di leggi di validità più generale. Certo il principio di *Huygens* è sempre un metodo semplice e adatto per valutare approssimativamente le figure di interferenza, ma come tale dovremmo metterlo nella cassetta con gli altri strumenti.

Del resto non possiamo sbarazzarci di un altro sospetto: l'argomento interferenza e diffrazione e con questo il principio di *Huygens* viene tenuto in vita e trattato con profondità esagerata, poiché tradizionalmente deve servire da fonte di esercizi per la maturità.

#### *Eliminazione:*

Non c'è bisogno del principio di *Huygens* per la fenditura singola, la fenditura doppia e il reticolo. Se non si riesce a decidere di lasciare la trattazione della fenditura larga agli studi universitari, allora lo si introduca ma in modo più modesto.

#### *Friedrich Herrmann*

/1/ Eugen Hecht: *Optik*. Addison Wesley, Bonn, 1989, p. 487.

## I colori fondamentali e lo spazio tridimensionale dei colori

### *Tema:*

Nella scienza dei colori viene introdotto il concetto di colore fondamentale, o primario. Una tipica formulazione, che pretende al tempo stesso di essere una definizione, è del tipo: “Tutte le luci del cerchio dei colori si possono ottenere combinando i tre colori primari rosso, verde e blu”. Qualche libro distingue tra “colori primari additivi rosso, verde e blu” e colori primari sottrattivi “ciano, magenta e giallo.”

### *Difetti:*

Queste affermazioni esprimono in modo troppo complicato ciò che può essere descritto molto più semplicemente così: lo spazio dei colori è tridimensionale. Per caratterizzare la percezione di un colore ci vogliono tre numeri.

Questo è un fatto notevole, prima di tutto perché è sconosciuto alla maggior parte della gente. Poi perché è facile da capire, una volta che si sia introdotto lo spazio dei colori con una scelta appropriata del sistema di coordinate. Terzo, perché si possono subito caratterizzare con solo tre informazioni innumerevoli colori, che finora si descrivevano solo con giri di parole o con nomi propri specifici. Pensando ai nomi dei colori comuni nel mondo della moda letteralmente ci si aprono gli occhi. Questo bel risultato dell’insegnamento viene però vanificato, se, invece di esprimerlo con chiarezza, usiamo perifrasi, come nelle definizioni prima citate.

Dal fatto che lo spazio dei colori è tridimensionale consegue che si possono scegliere tre colori di base allo stesso modo dei vettori di base in uno spazio vettoriale. Questi però non devono essere necessariamente rosso, verde e blu. Possono essere una qualsiasi terna di colori, purché non giacciono sulla stessa linea retta dello spazio dei colori. Possono anche essere colori non saturi, e si può anche scegliere una base completamente diversa, che non sia caratterizzata dai nomi delle tonalità di colore, ma piuttosto attraverso le proprietà di luminosità, saturazione e tonalità di colore (HSL).

Questo fatto deve essere ben distinto dalla scelta di rosso, verde e blu (RGB) per la televisione, e di ciano, magenta e giallo (CMY) per la stampa. Possiamo infatti raccontare queste cose a lezione, ma non veramente spiegarle, senza aver prima introdotto la metrica dello spazio dei colori. Un televisore con i fosfori ciano magenta e giallo potrebbe produrre tutte le tonalità di colore, ma la maggior parte, e addirittura i rossi verdi e i blu, solo debolmente saturi. Con la stampa avviene il contrario. I colori stampati a partire da RGB potrebbero produrre solo ciano, magenta e giallo debolmente saturi.

Quando si nasconde il fatto semplice e chiaro che lo spazio dei colori ha tre dimensioni, come nella citazione precedente, otteniamo un pasticcio didattico analogo a quello descritto nell’articolo sui due tipi di poli magnetici: ci sono due tipi di poli magnetici. Alle due regioni di valori vengono attribuiti nomi diversi come se fossero qualitativamente diverse, invece di fare un’affermazione semplice sulla struttura algebrica di questi valori, cioè che il magnetismo (la carica magnetica dei poli) può assumere valori positivi e negativi. Analogamente per i colori non è opportuno introdurre i tre colori di base come se fossero qualitativamente diversi, mentre si tratta soltanto di tre punti in un continuo tridimensionale.

### *Origine:*

La scienza dei colori ha una lunga storia, nella quale persone di varie provenienze hanno contribuito alla formazione di giudizi e pregiudizi; non soltanto scienziati come fisici, fisiologi, psicologi e biologi, ma anche artisti e gente del mondo della moda. In corrispondenza è logico che sia anche grande il numero di significati e descrizioni coesistenti.

### *Eliminazione:*

Si cominci l'insegnamento sui colori introducendo lo spazio tridimensionale dei colori, senza però parlare subito della metrica. Si chieda agli scolari di ordinare oggetti di molti colori differenti, per esempio matite colorate. Essi realizzano in fretta che non è possibile ordinarli in una sola fila, cioè in una dimensione. Anche due dimensioni non sono sufficienti. Finalmente in tre dimensioni si riesce. Le proprietà che caratterizzano queste dimensioni sono la tonalità di colore, la luminosità e la saturazione. Poi si dimostra che i punti dello spazio tridimensionale possono essere descritti anche da altre basi del sistema di riferimento. Molti allievi hanno nel computer un programma per dipingere, e hanno imparato ad usare i diversi modi di definire la percezione dei colori.

### *Friedrich Herrmann*

## L'etere e il vuoto

### *Tema:*

L'etere come mezzo portatore dei campi elettromagnetici non esiste, è una ipotesi non necessaria. “L'idea di un etere [...] come mezzo portatore delle onde elettromagnetiche, venne superata soltanto nella teoria della relatività.”

### *Difetti:*

Non si può eliminare un problema sostenendo che l'oggetto del discorso non esiste. Il problema era lo strano comportamento dell'etere durante il cambiamento di sistema di riferimento, come dimostrato dall'esperimento di *Michelson e Morley*. L'esistenza dell'etere in realtà era stata messa in discussione per qualche decennio, anzi alcuni scienziati volevano bandirlo. Ma poco dopo venne nuovamente introdotto anche se con il nuovo nome di “vuoto”, e viene quasi da chiedersi se l'abbiano fatto per nascondere il voltafaccia. Con questo tutto sarebbe andato a posto, se in tanti libri lo spazio non fosse rimasto sempre vuoto, come abbiamo visto nelle citazioni. Inoltre si può vederlo dal modo in cui viene introdotto il concetto di campo: un campo è una regione di spazio vuoto con delle proprietà. Secondo la concezione moderna un campo è uno stato eccitato di questo nuovo etere. Ancora un piccolo difetto, che però non è soltanto una piccola imperfezione: il nuovo etere si chiama *vuoto*. Chiunque abbia una qualche sensibilità linguistica rimarrebbe scandalizzato nel sentir chiamato qualcosa di esistente con un termine che esprime la non esistenza.

### *Origine:*

Come abbiamo già accennato, dall'esito inaspettato dell'esperimento di *Michelson e Morley* seguì l'esigenza di una nuova teoria che sostituisse la veneranda meccanica classica. Negare l'esistenza dell'etere era soltanto un gesto disperato. Ma il problema non era stato risolto. Con la teoria della relatività generale e più tardi con la meccanica e l'elettrodinamica quantistica la chimera dello spazio vuoto sparì di nuovo, e l'etere ricomparve con un nuovo nome. Ma in nessun caso si dovrebbe prendere *Einstein* come testimone contro l'etere, che per lui non aveva mai smesso di esistere /1/.

### *Eliminazione:*

Ci possono essere situazioni in cui è giustificato parlare di spazio vuoto, come non c'è niente in contrario a parlare di una bottiglia vuota. Sappiamo che una bottiglia di grappa vuota è una bottiglia che non contiene grappa. Certamente non vogliamo dire che la bottiglia non contiene aria o luce. Ma ci sono situazioni nelle quali parlare di spazio vuoto crea grandi difficoltà di comprensione: cioè quando lascia intendere che nello spazio vuoto non si trova proprio niente, anzi addirittura vi si trovi il “nulla”. Bisogna parlare dello spazio vuoto con moderazione. Bisogna evitarlo soprattutto quando si deve introdurre il concetto di campo.

/1/ A. Einstein: *Äther und Relativitätstheorie* [*Etere e teoria della relatività*]. Julius Springer Verlag, Berlin, 1920.

P. 12: “*Il fatto che le relazioni tra metri e orologi cambiano nello spazio-tempo [...] elimina in modo definitivo l’affermazione che lo spazio sia vuoto.*”

P. 15: “*Secondo la teoria della relatività generale lo spazio senza etere è impensabile, perché non ci sarebbe alcuna propagazione della luce, e in particolare nessuna possibilità di esistenza per metri e orologi, e quindi nessuna distanza spazio-temporale nel senso della fisica. Però non si deve pensare questo etere fornito della proprietà caratteristica dei mezzi ponderabili, di essere fatti di parti che possano essere seguite nella loro evoluzione temporale; non si deve applicare all’etere l’idea di movimento*”.

*Friedrich Herrmann*

## Indistinguibilità delle particelle

### Tema:

Quando si derivano le leggi della statistica quantistica si sottolinea che le particelle sono identiche e indistinguibili:

“Si considerano identiche due particelle quando il risultato della misura di una qualsiasi grandezza o osservabile del sistema è invariante per lo scambio delle due particelle. In questo caso si dice anche che le particelle sono indistinguibili.”

“Si considerano identiche due particelle quando tutte le proprietà interne (massa, spin, carica ...) sono esattamente uguali. Cioè non esiste alcun esperimento con il quale le si possa distinguere. Quindi tutti gli elettroni dell’universo sono identici, come tutti i protoni o tutti gli atomi di idrogeno.”

### Difetti:

Ho sempre avuto un sentimento strano verso questa affermazione, che due particelle sono identiche e indistinguibili: si tratta di una banalità oppure di una speciale proprietà degli oggetti del mondo quantistico, molto difficile da capire? Ci sono due tipi di cause per cui queste affermazioni non entrano facilmente in testa.

1. Infatti possiamo distinguere bene le due particelle presunte indistinguibili. Consideriamo due elettroni, uno si trovi nella posizione 1 a sinistra, l’altro nella posizione 2 a destra. Certo sono uguali in quasi tutti gli aspetti: stessa massa, stessa carica, stesso spin, stesso stato di eccitazione, e ogni altra proprietà (si dice che concordano in tutte le proprietà “interne”). Ma si che si distinguono per una caratteristica: la posizione. Uno si trova nel luogo indicato da  $\vec{r}_s$  (sinistra) e l’altro da  $\vec{r}_d$  (destra). Pertanto si possono distinguere. Infatti nella fisica statistica non si tratta della indistinguibilità delle *particelle* ma di quella degli *stati*. Consideriamo di nuovo i nostri due elettroni nello stato in cui uno è a destra e l’altro a sinistra. Li scambiamo di posto. Lo stato che abbiamo ottenuto non è distinguibile, è identico allo stato precedente, perfino nel senso del linguaggio comune ///. Ma in ciascuno degli stati possiamo distinguere entrambe le particelle: una si trova a destra e l’altra a sinistra.

La situazione è del tutto simile al seguente “esperimento”: con un programma per disegnare produciamo sullo schermo due cerchi dello stesso raggio e dipinti dello stesso colore come nella figura 1a. Con il mouse spostato i cerchi sullo schermo come nella figura 1b, e poi riproduciamo l’immagine originale come nella figura 1c. Ma in questo modo abbiamo scambiato i due cerchi. L’immagine che abbiamo ottenuto è indistinguibile dall’immagine originale. I due cerchi invece sono distinguibili. Si distinguono per la loro posizione.

2. Ma può essere proprio così che lo scambio delle due particelle produce lo stesso stato? Non si vede in qualche modo che il nuovo stato è nato dal vecchio attraverso lo scambio? Non avremmo questo problema se non avessimo preso l’abitudine, nel lungo esercizio della meccanica classica, di considerare una particella come un piccolo essere, che a parte i valori delle grandezze fisiche è caratterizzato da qualcosa d’altro, che si potrebbe chiamare la sua anima. Invece di eliminare questa abitudine il più in fretta possibile nella “meccanica quantistica”, ce ne si prende cura attraverso il linguaggio di cui la “fisica quantistica” si serve. Curiosamente questo problema svanisce quando invece di scambiare due elettroni consideriamo lo scambio di due “elettroni mancanti”, di due “lacune” in un semiconduttore. Questo modo di rappresentare gli elettroni come

individui non mantiene più il suo carattere intuitivo quando si tratta di lacune. Esse sembrano molto più simili ai cerchi sullo schermo che agli elettroni.

*Origine:*

La meccanica classica ha a che fare con corpi individuali. Questo concetto di individuo è adatto a un sistema fisico quando esso mantiene le sue proprietà in modo tale da essere riconoscibile in altri ambienti o tempi diversi. Considerando i corpi della nostra esperienza quotidiana e le proprietà che caratterizzano un individuo soprattutto si pensa alla forma e alla distribuzione delle sostanze che lo compongono. Quando il numero di gradi di libertà del sistema diventa sempre più piccolo, e rimangono solo una massa, una quantità di moto, uno spin e una posizione, il concetto di individuo sfugge tra le dita. Si può anche dirlo in questo modo: il concetto di individuo acquista la sua legittimità asintoticamente con il crescere del numero di gradi di libertà. Il concetto di particella individuale proveniente dalla meccanica classica, non serve come concetto base della meccanica quantistica.

*Eliminazione:*

Il nostro linguaggio quotidiano non ha alcun problema nel descrivere cose che non sono individui nel senso della meccanica classica. Pensiamo a una nuvola in cielo o alla fiamma di una candela. Tra cinque minuti la nuvola sarà la stessa? Dopo cinque secondi la fiamma è sempre la stessa? A queste domande forse si risponde con un'alzata di spalle. Semplicemente non si vede il problema.

Sarebbe già di grande aiuto fare qualche cambiamento nel linguaggio della meccanica quantistica, e naturalmente anche ai modelli fondamentali di base. Così si potrebbe anche introdurre l'elettrone come una porzione indivisibile di una sostanza, con una certa massa, una certa carica elettrica e un certo momento angolare. Immaginiamo una porzione a destra e una a sinistra, e le scambiamo, sicuramente non è difficile capire che lo stato del sistema complessivo è lo stesso di prima. L'aspettativa di qualcosa come un'anima non si presenta neppure.

*Friedrich Herrmann*

/1/ Indistinguibile: che non può essere individuato attraverso dati o particolari singoli; Devoto-Oli, *Dizionario della lingua italiana*. Felice Le Monnier, Firenze, 1971.

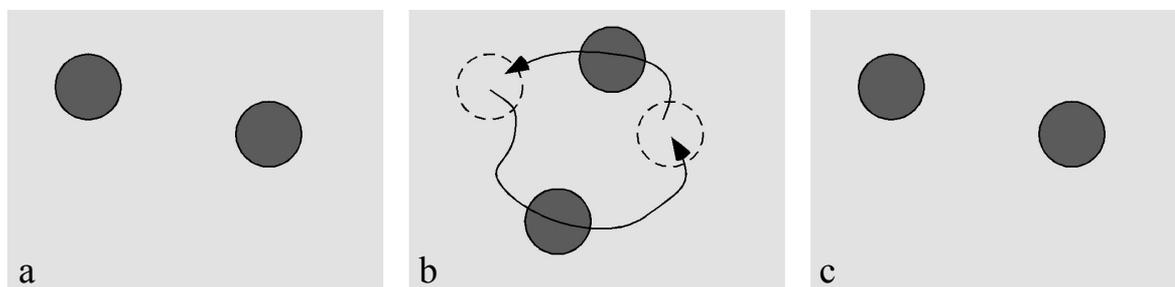


Figura 1. Operazione di scambio di oggetti.