

2 L'antinomia continuo/discontinuo - il calore

2.1 Chiarimenti sul titolo del capitolo

Einstein, *ibidem*, pag 233:

Una pianta di Roma e dintorni è aperta davanti a noi. Ci domandiamo: quali sono i punti che possiamo raggiungere con il treno? Dopo aver consultato un orario ferroviario potremo marcare sulla nostra carta i diversi punti corrispondenti alle fermate dei treni.

Se poi ci domandiamo quali punti si possono raggiungere con l'automobile possiamo tracciare sulla pianta delle linee lungo le varie strade che si staccano dal centro della città. Qualsiasi punto di tali linee può essere raggiunto con l'automobile.

In entrambi i casi abbiamo delle serie di punti ma, nel primo i vari punti sono separati gli uni dagli altri da distanze più o meno considerevoli fra le stazioni ferroviarie, mentre nel secondo caso i punti si susseguono senza interruzione lungo i tracciati delle strade.

Possiamo inoltre domandarci quali siano le distanze dei punti in questione [per entrambi i casi] dal centro o da qualsiasi altro luogo della città, [cioè far corrispondere ad ognuno dei punti-stazione o dei punti-automobile, un numero]. Nel primo caso tali numeri "saltano" irregolarmente "da un valore all'altro" mentre nel secondo possono assumere un qualsiasi valore fra i numeri reali compresi fra lo 0 che corrisponde al centro della città al numero che corrisponde alla distanza di questo dalla meta.

*Diremo dunque che le distanze fra il centro della città e le località raggiungibili col treno variano sempre in modo **discontinuo**.*

*Per contro le distanze fra il centro della città e le località raggiungibili con l'automobile possono variare in che misura si vuole, per piccola che sia; possono variare cioè in modo **continuo**.*

Insomma le distanze possono differenziarsi in misura arbitrariamente piccola [di nuovo lo stesso concetto che abbiamo visto nella definizione di derivata!] usando l'automobile; non così se utilizziamo il treno.

*La produzione di un pozzo di petrolio può variare in modo continuo. La quantità di petrolio estratto può essere ridotta o accresciuta in misura arbitrariamente piccola [qui Einstein se preso alla lettera, È impreciso: nella **realtà fisica** vi È un limite inferiore oltre al quale la suddivisione non riusciamo ad effettuarla, in realtà. Nella **realtà matematica**, che È astratta, invece, il concetto di "arbitrariamente piccolo", o *infinitesimo*, È esattamente e coerentemente codificato].*

Il numero degli impiegati e degli operai può solo variare solo in maniera discontinua.

*Una somma di denaro può variare solo in maniera discontinua: In Italia la più piccola unità monetaria legale, che potremmo designare anche con il nome di "**quanto elementare**" della valuta nazionale è il centesimo. Nei paesi che non adottano l'euro tale "quanto elementare" sarà differente. Esiste un **tasso di cambio** che permette di passare da una valuta all'altra.*

E' dunque lecito asserire: alcune quantità possono variare in modo continuo, e quindi possono essere divise in quantità arbitrariamente piccole, mentre altre variano soltanto in modo discontinuo, e possono essere suddivise solo fino a delle componenti ultime dette "quanti elementari".

In particolare, in fisica, il primo problema che si pone È se la materia sia **discreta**, cioè fatta di *atomi indivisibili* o **continua**. Solo in un secondo momento ci si interroga su continuità o discontinuità delle grandezze fisiche

Ovviamente la scelta di modellizzare una certa quantità come continua o come discontinua dipenderà dal tipo di problema che vogliamo risolvere oltre che dalle caratteristiche "evidenti o meno" (parliamo di evidenza sensoriale o sperimentale) del sistema. Ancora **Einstein** escogita un esempio chiarificatore (*ibidem* pag. 234) :

Possiamo pesare notevoli quantità di sabbia e considerarne la massa come continua. Ma se la sabbia dovesse divenire preziosa e venisse perciò pesata con bilance molto sensibili, non potremmo fare a meno di tener conto che la sua massa varia sempre in ragione del multiplo di un granello.

Attenzione: Einstein assume che i granelli di sabbia abbiano tutti la stessa massa: solo con questa ipotesi, evidentemente astratta, si può dire che la massa della sabbia non solo varia con discontinuità, ma è anche "quantizzata"; le grandezze che variano per "quanti" sono necessariamente discontinue, ma non tutte le grandezze discontinue variano necessariamente per quanti...

La diatriba fra coloro che sostenevano che la materia fosse **continua** (ossia suddivisibile all'infinito) e coloro che postulavano l'esistenza degli atomi, come elementi ultimi indivisibili di materia, e quindi avevano una concezione della materia come **discreta**, è vecchia quanto la fisica stessa.

Probabilmente **nasce** con l'osservazione, affidata ai soli occhi, che i solidi possono essere divisi in parti, mantenendo successivamente i pezzi separati indefinitamente, e che tale divisione in parti deve avere un limite inferiore; mentre la stessa operazione su un liquido porta ad un esito differente: non esiste modo di tagliarlo, al più possiamo pensare di formare gocce, ma anche queste tendono a *coalescere* in un tutto unico.

Senza andare troppo indietro rispetto al periodo storico raggiunto nella precedente lezione sappiate che questa questione, assieme all'individuazione di quali siano le **leggi di conservazione** da considerarsi o meno valide, costituisce uno dei fili conduttori dei *tre grandi dialoghi critici tradizionali legati a: Descartes, Newton e Leibniz*. Dialoghi che danno luogo a dure contrapposizioni e definiscono, di fatto, tre stili di pensiero assai influenti sino alle soglie del 1800. Chi volesse approfondire questi aspetti può vedere: **Tarsitani – Vicentini** (a cura di), *Calore – Energia – Entropia (le basi concettuali della termodinamica e il loro sviluppo)*, Franco Angeli, 1991 Milano. In particolare il capitolo a cura di: **Mariagrazia Ianniello**, pp 216 – 273. Il libro non È in commercio ma credo si trovi nella Biblioteca di Fisica, almeno all'Università "La Sapienza" di Roma. Altrimenti potete rivolgervi a me!

La tradizione cartesiana si può dire caratterizzata dal *primato dei concetti di materia e movimento rispetto a quello di forza* (che ancora non c'è). Per i cartesiani la materia è fatta di corpuscoli, che però non sono "quantizzati" nel senso che possono essere sempre suddivisi: all'infinito (Cartesio non conosce il concetto matematico di "infinitesimo": il suo universo non è né continuo né discreto). In questo senso l'universo è sempre *pieno di materia*, anzi lo spazio stesso è definito come estensione della materia (dove non c'è materia non c'è nemmeno spazio). In questo universo le azioni si esercitano necessariamente solo per contatto (spinte, pressioni, urti).

In base a questi principi, i seguaci di Cartesio si opporranno alla teoria newtoniana negando l'esistenza di *enti attivi*, le *forze*, come cause esterne al moto e, in particolare, l'idea di *forze a distanza*, vista come una riesumazione delle *qualità* occulte di matrice aristotelica (tenete a mente questa posizione che, minoritaria per secoli, finirà per tornare in auge: ne ripareremo nella lezione sui campi).. Una volta animata da movimento, la materia non può arrestarsi (principio d'inerzia = conservazione della quantità di moto, vedi più avanti). La legge fondamentale dell'universo cartesiano È dunque la legge di conservazione della quantità di moto: $m \cdot v$.

Per spiegare il moto dei pianeti Cartesio elabora una teoria detta "teoria dei *vortici rotanti*", secondo la quale lo spazio è completamente riempito di materia turbinante, e che spiega le attrazioni e repulsioni fra i corpi.

Al contrario di Cartesio, **Newton** è convinto che lo spazio (vero, assoluto, matematico) esiste indipendentemente dalla materia, come luogo geometrico in cui si collocano i corpi. Anziché pieno, lo spazio in cui si trova l'universo è sostanzialmente *vuoto*. In esso si muovono e si aggregano gli atomi, ossia i "quanti" elementari di materia. Ma se comprimessimo tutti gli atomi dell'universo fino a metterli tutti in contatto tra loro, l'intera materia dell'universo, dice Newton, entrerebbe "in un guscio di noce".

La materia ha quindi una struttura **discontinua**, è inerte e passiva e per essere messa in movimento ha bisogno di *principi attivi*, che agiscono con quelle che Newton chiama *forze*. L'atomismo di Newton è dunque un **atomismo dinamico**. Tra gli atomi si esercitano forze attrattive e/o repulsive che danno luogo a diverse configurazioni atomiche (non dimentichiamo che gli atomi ultimi sono tutti uguali tra loro) che spiegano le differenze tra le varie sostanze. Le sostanze materiali sono formate da aggregati di atomi che sono altrettanti "quanti elementari" di materia. Per questo Newton può dire che la **massa** di un corpo è *la quantità di materia (il numero totale di atomi)* da cui esso È formato.

I principi fondamentali sono:

- forza e materia sono grandezze fisiche distinte e fondamentali
- forza e quantità di moto non si conservano
- lo spazio è il luogo geometrico della materia ed esiste indipendentemente dai processi naturali che vi si verificano;

Per **Leibniz** il principio fondamentale della natura È **il principio di continuità**: tutte le grandezze, ma anche tutte le cose (le piante, gli animali), variano "passando per tutti i gradi intermedi" (tra un animale e l'altro esistono infiniti altri animali che passano gradualmente dall'uno all'altro: si parla quindi di "grande catena dell'essere"). La materia è quindi **continua** e l'ipotesi atomistica viene rifiutata. Per esempio, in un processo di urto le velocità dei corpi non variano con discontinuità, ma cambiano gradualmente dal valore iniziale a quello finale.

Inoltre Leibniz rifiuta l'idea di una materia inerte e passiva: la materia in movimento è capace di produrre effetti, ossia possiede in modo *intrinseco* anche una sorta di energia. Nei corpi in movimento tale energia (*vis viva*) È misurata da $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$.

2.2 Un'osservazione doverosa sulle leggi di conservazione...

...la ricerca delle quali costella la fisica e costituisce croce e delizia degli studenti.

La convinzione che esistano **leggi di conservazione**, è, come la concezione deterministica, frutto di una commistione fra: convincimenti a priori, caratteristiche matematiche dei modelli e delle teorie, ed esiti sperimentali.

Per la ricerca chimica sperimentale, si rivelò di grande importanza la **legge di conservazione della massa**. Questa legge fu ritenuta valida anche in Fisica fino a che Einstein non dimostrò la dipendenza della massa dalla velocità e l'equivalenza massa-energia (che comunque non smentisce la legge di conservazione della massa ma la generalizza...). Ne parleremo fra qualche lezione.

La postulazione dell'esistenza di tali leggi è inseribile nel grande gruppo dell'*ipotesi di semplicità*. Ed è curioso che la scoperta del legame tra leggi di conservazione e un aspetto dell'ipotesi di semplicità che ancora non abbiamo approfondito, cioè la **simmetria**, avvenga *solo* all'inizio del XX secolo ad opera di una delle poche donne scienziato: **Emmy Noether**.

Il teorema di Noether assume una grande rilevanza nella fisica moderna. Ma è un teorema difficile... Per questo i manuali di scuola trattano le leggi di conservazione, ma raramente le collegano alle corrispondenti *invarianze e/o simmetrie*.

Per esempio, la *conservazione dell'energia* segue dall'invarianza (simmetria) rispetto a *traslazioni nel tempo*, quella dell'*impulso* dall'invarianza per *traslazioni nello spazio*.

Questo è importante per la Quantistica perché le grandezze correlate dalle leggi di conservazione diventano poi le **osservabili incompatibili** soggette al *principio di indeterminazione*, come appunto energia e tempo, impulso e posizione.

Il principio di conservazione di cui tutti abbiamo almeno una volta sentito parlare è il **principio di conservazione dell'energia**. Vogliamo fare qualche accenno alla sua storia e per questo dobbiamo affrontare una questione importante: quella relativa alla **natura del**

calore.

2.3 Il calore è una sostanza?

Einstein, *ibidem* pag. 47

*La distinzione fra i concetti di temperatura e calore richiese un tempo incredibilmente lungo [probabilmente a causa anche dell'incredibile ritardo con cui si vennero intrapresi i primi esperimenti sistematici con il termometro: la prima metà del '700] ma, non appena determinata, essa determinò un rapido progresso. Circa duecento anni fa [Joseph] **Black**, [scozzese, fondatore della scienza quantitativa del calore]. Inizia le sue ricerche a Glasgow, nel 1757 e i suoi risultati hanno larga diffusione in Gran Bretagna e sul continente intorno al 1770] tenne delle conferenze che portarono un notevole contributo al chiarimento delle difficoltà connesse alla distinzione fra i due concetti.*

*CON L'USO DI QUESTO STRUMENTO [il termometro] ABBIAMO IMPARATO CHE SE PRENDIAMO ANCHE MILLE E PIÙ DIFFERENTI SPECIE DI MATERIA, QUALI METALLI, PIETRE, SALI, LEGNI, PIUME, LANA, ACQUA ED ALTRI FLUIDI DIVERSI, LE QUALI SOSTANZE ABBIANO INIZIALMENTE **CALORI** DIFFERENTI E SE COLLOCHIAMO INSIEME IN UNA STANZA NON RISCALDATA E NELLA QUALE NON DÀ IL SOLE, IL CALORE VERRÀ COMUNICATO DAI PIÙ CALDI DI QUESTI CORPI AI PIÙ FREDDI, NEL CORSO DI ALCUNE ORE O DI UNA GIORNATA INTERA, ALLA FINE DEL QUALE PERIODO APPLICANDO A TUTTI SUCCESSIVAMENTE UN TERMOMETRO, QUESTO MARCHERÀ ESATTAMENTE LO STESSO GRADO.*

*Secondo la terminologia moderna la parola **calori** [solo quella in grassetto nel testo] va sostituita con la parola **temperature**. Perché?*

La temperatura di un corpo è definita solo quando il corpo si trova in uno **stato di equilibrio termico**: si dice che la temperatura è un **parametro dell'equilibrio**.

L'**equilibrio** è uno stato in cui le variabili caratteristiche del sistema restano costanti nel tempo. A seconda del modello fisico usato per schematizzare il fenomeno variano le caratteristiche dello stato d'equilibrio: in Meccanica lo *stato di equilibrio meccanico* è quello in cui, senza scomodare l'energia di cui parleremo fra breve, la risultante delle forze agenti sul corpo è nulla e quindi il corpo è fermo (in un sistema di riferimento solidale con esso); la Termodinamica studia i fenomeni termici e l'equilibrio termico si ha quando, per esempio nel caso dei gas perfetti, temperatura, volume e pressione sono costanti.

Un sistema **lontano dall'equilibrio** è allora per esempio un sistema composto da due corpi con temperature iniziali diverse che sono messi a contatto tra loro. In questo caso si dice che tra i due corpi comincia a fluire "calore". Tale flusso ha una direzione privilegiata: avviene sempre dai corpi a temperatura maggiore ai corpi a temperatura minore (attivate l'attenzione su questo punto: conoscete una spiegazione del perché sia così?). Il flusso di calore può provocare un *cambiamento* di temperatura o un *cambiamento di stato di aggregazione della materia*: comunque un *cambiamento*.

Ma cos'è questo *calore*? Servendosi dell'**analogia** (uno dei criteri guida in seno all'*ipotesi di semplicità*) verrebbe da pensare che sia un *fluido*: come l'acqua in due tubi messi in contatto, in cui inizialmente occupi livelli differenti, tende a scendere dal livello superiore al livello inferiore, ed il cui flusso non si arresta finché l'acqua nei due tubi non occupa uno stesso livello intermedio fra i livelli di partenza, così il calore fluisce fra due corpi a temperatura differente. E fu questa la concezione di maggior successo nella prima metà del 1700: una concezione di tipo **continuista**.

Ma ben presto, circa metà del 1700, le influenze dei grandi risultati di Newton coinvolsero e condizionarono anche la concezione del *fluido responsabile dei fenomeni termici*. Serviamoci ancora delle parole di **Black** (Che riporta le tesi di un suo allievo: **Cleghorn**) In **Tarsitani – Vicentini (Fabio Sebastiani) *ibidem* pp. 191:**

*Egli suppone che il calore dipenda dall'abbondanza di quel **sottile fluido elastico** che già precedentemente altri scienziati avevano immaginato fosse presente in ogni parte dell'universo e che fosse la causa del calore. Ma questi scienziati avevano assunto o supposto che una sola proprietà caratterizzasse questa sostanza sottile e cioè la sua grande*

elasticità, o **forte repulsione delle sue particelle fra loro**; laddove il dr Cleghorn suppone che esse avessero anche altre proprietà, cioè una **forte attrazione per le particelle di altri tipi di materia** presenti in natura, i quali hanno in generale una maggiore o minore attrazione reciproca. Pertanto egli suppone che la materia ordinaria consista in particelle aventi una forte attrazione sia fra loro che per la sostanza del calore, mentre la sottile sostanza elastica del calore è **autorepulsiva**, le sue particelle hanno una forte repulsione le une per le altre, mentre sono attratte dagli altri tipi di materia con differente intensità.

L'interpretazione dei fenomeni termici è, in questo modo, ricondotta **nell'ambito newtoniano delle forze di attrazione e repulsione**.

Interessante osservare, visto che ci occupiamo di **analogia** e **generalizzazione**, come le parole usate da **Black** per delineare la teoria di **Cleghorn** sulla natura del calore sono identiche a quelle usate da B. **Franklin** nel 1751 per formulare la propria **teoria sulla natura dell'elettricità**.

*LA MATERIA ELETTRICA DIFFERISCE DALLA MATERIA ORDINARIA IN QUANTO, MENTRE LE PARTI DELLA SECONDA SI ATTRAGGONO RECIPROCAMENTE, QUELLE DELLA PRIMA **RECIPROCAMENTE SI RESPINGONO**; MA ANCHE SE LE PARTICELLE DELLA MATERIA ELETTRICA SI RESPINGONO L'UN L'ALTRA, ESSE **SONO FORTEMENTE ATTRATE DA TUTTA LA MATERIA RIMANENTE***

Il termine **calorico**, che qualcuno di voi avrà sentito già in relazione al calore, fu coniata dal chimico **Lavoisier** nel 1787 per indicare la causa dei fenomeni termici

Dal punto di vista dei **risultati quantitativi**, la teoria del calorico, consentì di calcolare:

- il valore della **temperatura di equilibrio** fra masse differenti di sostanze differenti che si trovino inizialmente a temperature differenti e che vengano mescolate
- la quantità di **calore necessario** per consentire, ad una certa massa di una certa sostanza, di **passare da uno stato di aggregazione ad un altro**. Per esempio all'acqua per passare dallo stato solido, (ghiaccio) allo stato liquido, allo stato gassoso (vapore).
- la **relazione fra calore e variazione di temperatura**, in fenomeni lontani dai passaggi di stato. Ottimi successi dunque.

Quest'ultima la scriviamo perché in essa compare una grandezza molto importante per la nascita della **Fisica Moderna**.

Data una massa **m** di una *certa sostanza* alla temperatura iniziale θ_i , fornendo a tale massa una certa "quantità di calore" **Q** la temperatura della massa salirà fino alla temperatura finale θ_f . Tale variazione di temperatura differirà, a parità di calore fornito e di temperatura iniziale, sia in ragione della massa (proporzionalità inversa) che del tipo di sostanza: alcune sostanze risultando *più facili da scaldare* di altre.

La grandezza che rende conto di tale *propensione o meno all'aumento di temperatura* era chiamata **calore specifico** ed era ritenuta una delle possibili manifestazioni del *calorico*.

Oggi lo definiamo operativamente come grandezza a sé, per cui sarebbe preferibile chiamarlo **calorespecifico** (tutt'attaccato).

In scrittura sintetica tutto ciò diventa: $Q = c \cdot m \cdot (\theta_f - \theta_i)$. Dove **c** è il **calorespecifico**.

Fra qualche lezione parleremo dei problemi d'incongruenza fra teoria ed esperimento che questa grandezza comporterà. Sarà una delle incongruenze che porteranno alla crisi della Fisica Classica e, quindi, alla creazione di una **teoria più generale**, di cui la Fisica Classica, come vuole il *principio di generalizzazione*, risulta un **caso particolare**.

Ovviamente doveva sorgere qualche incongruenza, siamo tornati al 1800, anche nella concezione del calore come *sostanza*, seppur sostanza composta di molecole altrimenti, a sua volta, non sarebbe stata superata!

(**Einstein**, *ibidem*, pag. 50) *Tuttavia il calore non è certo una sostanza nello stesso senso della massa. La massa si può determinare attraverso bilance. Ma il calore? Un pezzo di ferro*

pesa forse di più quando è rovente di quando è ghiacciato? L'esperienza prova di no. Ammesso quindi che il calore sia una sostanza questa dovrà essere imponderabile.

*Il calore-sostanza, che ricevette il nome di **calorico**, è la nostra prima conoscenza in seno a tutta la famiglia delle **sostanze imponderabili**. Più oltre avremo occasione di seguire la storia della famiglia e di assistere alla sua ascesa e decadenza. Per ora ti basti prender nota della comparsa del suo primo membro. E aggiunge a pag. 51:*

Una sostanza viene considerata come qualcosa che non può né crearsi né distruggersi. Ma l'uomo primitivo creava, mediante sfregamento, calore a sufficienza per accendere legno.

Altri problemi sono tecnicamente e filosoficamente complessi ed esulano dai nostri scopi.

Vi basti sapere che furono soprattutto studi di ingegneria stimolati dalla Prima Rivoluzione Industriale, inerenti quindi le Macchine Termiche, a portare al superamento del calore come sostanza. Furono questi studi infatti a sancire la nascita del modello di cui andiamo a parlare.

Se il calore non è una sostanza, allora cos'è? Per capirlo ricordiamoci di avere detto che *il passaggio di calore provoca un cambiamento*. E apriamo una doverosa e onerosa parentesi.

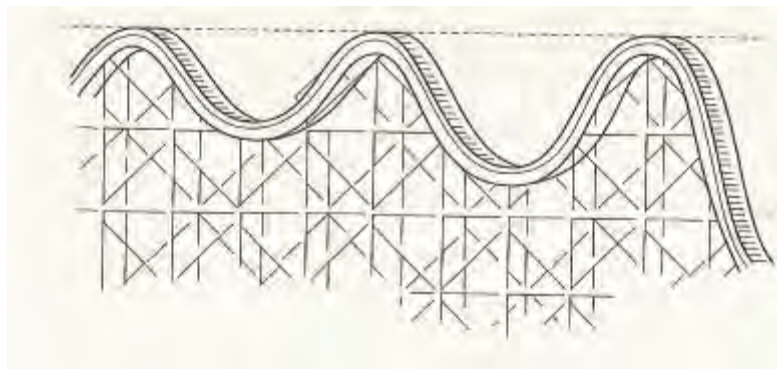
2.4 L'energia

In fisica le grandezze capaci di provocare un cambiamento vengono accomunate in uno stesso **modello** denominato **energia**. A seconda dei tipi di cambiamento che riescono a produrre e delle modalità specifiche con cui producono tali cambiamenti, al sostantivo energia si giustappone un aggettivo che chiarisca tali peculiarità.

Per illustrare il concetto di energia, ed in che modo il calore sia riconducibile a questo, abbandoniamo il percorso storico che ci porterebbe troppo lontano e saliamo su di un carrello delle montagne russe! Einstein *Ibidem* pag. 53.

Ogni montagna russa ha il suo punto più elevato che è quello in cui il vagoncino viene lasciato libero. Per tutta la durata del suo moto esso non raggiungerà mai più la stessa altezza. La rappresentazione completa di questo moto sarebbe assai complicata.

Quindi ci limiteremo a considerarne un'idealizzazione *irrealizzabile* ma utile ai nostri scopi.



Agli effetti dell'esperimento ideale possiamo immaginare che un tale abbia trovato il modo di eliminare completamente l'attrito, compagno indivisibile del moto. Questo tale decide di applicare la sua invenzione alla costruzione di una montagna russa e comincia a far le prove. Supponiamo che il vagoncino inizi la sua corsa ad un punto di partenza situato a 30 m di altezza

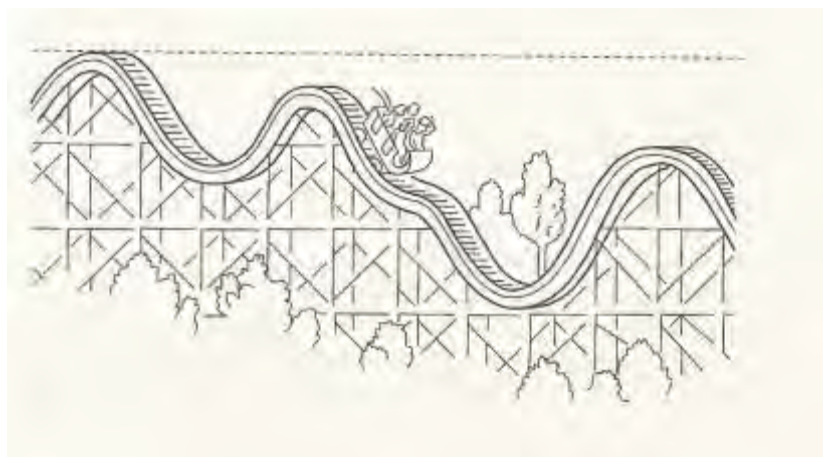
sul livello del suolo. Provando e riprovando, il nostro inventore constaterà ben presto di doversi attenere ad una regola molto semplice: il vagoncino potrà percorrere tutti i tracciati possibili e immaginabili, con l'unica limitazione che nessun punto di essi sia più elevato dei trenta metri di partenza... Beninteso, in pratica, un vagoncino non può mai raggiungere l'altezza iniziale, causa l'attrito ma, come premesso, ciò non preoccupa il nostro inventore immaginario.

Continuiamo ad attenerci al nostro esperimento ideale che prescinde dall'attrito e seguiamo il moto del vagoncino, dall'istante in cui lascia la stazione di partenza per cominciare a scendere. A misura che esso si muove, la sua distanza dal suolo diminuisce, ma la sua velocità aumenta. Sulle prime questa proposizione ricorda quella di una lezione di lingua straniera: "non ho matite ma voi avete sei arance". Tuttavia essa non è così stupida. Non c'è nesso fra il mio possesso di matite ed il vostro di arance. Esiste invece un'effettiva correlazione fra la distanza del vagoncino dal suolo e la sua velocità. Si può benissimo

calcolare la velocità del vagoncino in qualsiasi istante ove si conosca la sua distanza dal suolo. Non entreremo però in maggiori particolari, dato che questi hanno necessariamente carattere quantitativo e che, perciò soltanto una formula matematica può esprimerli chiaramente.

Nel punto più alto del suo percorso il vagoncino ha velocità zero e si trova a trenta metri dal suolo. Nel punto più basso possibile la distanza dal suolo è nulla e la velocità massima. Questi fatti possono essere espressi in altri termini, e cioè: Nel punto più alto il vagoncino possiede energia potenziale ma è privo di energia cinetica. Nel punto più basso invece, esso possiede il massimo di energia cinetica, ma nessuna energia potenziale.

L'energia potenziale aumenta con l'altezza, mentre l'energia cinetica cresce con l'aumento di velocità. La somma delle due grandezze, **l'energia meccanica totale del carrello, in assenza di attrito, si mantiene costante**. L'energia totale può venir comparata ad una somma di denaro il cui valore complessivo non muti ma che venga cambiato da una valuta all'altra ad uno stesso **tasso fisso di cambio**, per esempio da euro a dollari [anche questo è un esperimento ideale: nella realtà le commissioni di cambio trasferiscono nelle tasche dell'agente di cambio parte della somma originaria come l'attrito fa con l'energia!].



Anche nelle **vere** montagne russe, nelle quali **l'attrito** impedisce al vagoncino di raggiungere la stessa altezza dalla quale è partito, si verifica un continuo scambio fra energia cinetica e potenziale. Qui però la somma non rimane costante, ma seguita a diminuire. Per contro riscontriamo "scambio di calore" [l'aumento di temperatura delle rotaie e delle ruote ne è la spia].

Da cui la necessità di un ulteriore passo importante per giungere alla correlazione fra gli aspetti meccanici e calorifici del moto. Più avanti avremo occasione di constatare l'estrema importanza delle conseguenze e generalizzazioni derivanti da tale passo. Oltre alle due energie, la cinetica e la potenziale, un altro fattore entra dunque ora in gioco e cioè il calore creato dall'attrito. Corrisponde forse questo calore alla diminuzione dell'energia meccanica?

Azzardiamo una nuova congettura: se il calore può venir considerato come una forma di energia, allora forse è la somma di tre fattori e cioè: calore, energia cinetica e energia potenziale, a rimaner costante!

Oltre alle due energie, la cinetica e la potenziale, un altro fattore entra dunque in gioco un'altra energia correlata ad un ambito diverso da quello di cui si occupa normalmente la meccanica, cioè l'interiorità del corpo in esame: **l'energia interna**.

Il progresso scientifico ha demolito il vecchio concetto di calore come sostanza. Noi cerchiamo di creare una **nuova specie di sostanza** e cioè **l'energia**, una delle cui forme è il calore.

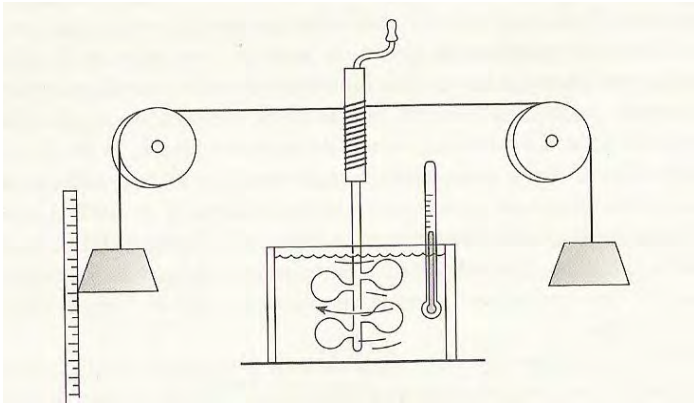
Poco meno di cento anni fa, il nuovo indizio che condusse al concetto di calore come forma di energia venne intuito da Mayer e confermato sperimentalmente da Joule. ...

Joule sottomise a verifica sperimentale la congettura secondo la quale il calore è una forma di energia e determinò il relativo tasso di scambio.

L'insieme dell'energia cinetica e potenziale di un sistema costituisce la sua energia meccanica. Nel caso delle montagne russe siamo stati indotti alla congettura che parte dell'energia meccanica [mediante il lavoro svolto dalla forza di attrito, si trasforma in calore che quindi va ad accrescere l'energia interna del sistema carrello].

Se ciò è vero deve esserci fra calore e lavoro, tanto nel caso suddetto, come in tutti i processi fisici simili, un determinato tasso di scambio.

Tale questione è puramente quantitativa eppure ci interessa, specialmente in relazione al fatto che saprete, almeno per sentito dire, che Einstein stesso ha poi trovato il *tasso di scambio* che consente di porre in relazione la **massa** con l'**energia**...



Il meccanismo di uno dei suoi esperimenti [di Joule] somiglia ad un orologio a pesi collegato ad un mulinello a palette immerse nell'acqua contenuta in un recipiente adiabatico. Per innalzare un orologio simile s'innalzano i pesi, il che conferisce energia potenziale al sistema. Il sistema può venir considerato isolato, cioè che non scambia né massa né energia con l'esterno.

A poco a poco [con velocità costante di modo che la risultante delle forze esterne

possa essere ritenuta nulla e quindi valere l'isolamento del sistema: il fatto cioè che la sua energia totale si conservi e quindi, in ultima istanza, che l'energia potenziale si trasformi interamente in calore] i pesi scendono e l'orologio va scaricandosi. Al termine di un certo periodo di tempo i pesi raggiungono il loro punto più basso e l'orologio si ferma. L'energia potenziale dei pesi si è tramutata interamente in energia cinetica delle palette e l'attrito delle palette con l'acqua ha trasferito calore all'acqua stessa che, infatti, ha visto aumentare la propria temperatura.

*Misurando l'aumento di temperatura, e conoscendo la legge di correlazione fra aumento di temperatura e calore assorbito, si ottiene il tasso di scambio desiderato: la variazione di energia potenziale di 0,427 Kg sollevati ad 1 m dal suolo, equivale ad una **caloria**, cioè al calore necessario ad innalzare, alla pressione atmosferica standard, da 14,5°C a 15,5 °C la temperatura di un **g** d'acqua.*

Venne presto riconosciuto che l'energia meccanica e calorifica sono soltanto due fra le molte forme che l'energia può assumere. Qualsiasi cosa possa venir convertita in una forma di energia è anch'essa una forma di energia: la radiazione del Sole è energia perché parte di essa si trasforma in calore sulla Terra. La corrente elettrica possiede energia poiché riscalda il filo in cui scorre o fa girare la ruota di un motore. Il carbone rappresenta energia chimica che si libera nella combustione.

Ogni evento naturale comporta la trasformazione di una forma di energia in un'altra, e sempre ad un ben definito tasso di scambio. In un sistema isolato, l'energia si conserva e pertanto si comporta come una sostanza: in un simile sistema la somma di tutte le possibili forme di energie è costante, ancorché le singole quantità possono variare. Se consideriamo l'Universo intero come un sistema isolato possiamo orgogliosamente proclamare con i fisici del XIX che l'energia dell'universo è invariabile, e che nessuna sua porzione può essere creata né distrutta.

La *qualità* di quest'energia, la possibilità di metterla a frutto per cambiamenti "utili" e virtuosi, il "rendimento" di quest'energia è però tutt'altro che costante, e anzi va inesorabilmente diminuendo, e questa consapevolezza, ancora 200 anni dopo, sembra durissima da acquisire ad un livello profondo delle coscienze collettive e individuali e quest'ostinata mancanza di consapevolezza sta portando il nostro pianeta alla catastrofe. Ma questa è un'altra storia....

Torniamo alla nostra pista meccanicista: Einstein, *ibidem*, pag. 64

2.5 La teoria cinetica della materia

E' forse possibile spiegare i processi del calore in termini del moto di particelle interagenti con forze semplici secondo gli intenti del programma meccanicista? Il calore dev'essere energia meccanica se tutti i problemi devono essere d'indole meccanica.

Andando il calore a modificare l'energia interna dei corpi cominciamo dal costruire un modello meccanicista dell'interno di questi corpi.

Secondo questa teoria i gas sono aggregati di un enorme numero di particelle o molecole che si muovono in tutte le direzioni, urtandosi a vicenda e cambiando direzione del proprio moto ad ogni collisione.

Dev'esserci perciò una velocità scalare media delle molecole così come in una grande collettività umana si riscontra un'età, media e una ricchezza media. Esisterà dunque anche un'energia cinetica media per ogni particella.

Assimiliamo tali molecole a punti materiali e l'interazione fra queste ai semplici urti: in tal modo possiamo considerare l'energia interna del gas solamente come energia cinetica: trascuriamo perciò le *forze d'interazione molecolare* di tipo differente dai semplici urti (cioè trascuriamo le forze: gravitazionale, elettromagnetica e *di corto range*) che contribuiscono all'energia interna in termini di energia potenziale

Prendiamo un recipiente contenente una certa massa di gas rarefatto (questa condizione rende accettabile l'approssimazione di cui sopra) ad una certa temperatura lontana dalla temperatura caratteristica di uno dei passaggi di stato. Fornendo calore alla nostra massa di gas sappiamo che la sua temperatura s'innalza. Nel modello meccanico che stiamo esaminando, fornire calore, che conseguenze porta?

Una maggior temperatura del nostro gas significa una maggior energia cinetica media. [questo fatto è comprovato da esperimenti. Per esempio mediante il moto browniano di cui parleremo fra breve] *Pertanto apportando calore accresciamo l'energia interna del gas.*

Secondo questa rappresentazione il calore, cioè l'energia responsabile della variazione di temperatura, non è già una forma di energia speciale diversa dall'energia meccanica ma è ascrivibile all'energia cinetica.

Tale teoria fornisce una spiegazione soddisfacente, cioè coerente con le verifiche sperimentali, entro le approssimazioni considerate, in relazione anche ad un'altra variabile di stato che abbiamo menzionato: **la pressione**. Che un gas eserciti pressione sulle pareti del recipiente che lo contiene risulta maggiormente evidente se una di queste pareti è mobile, come in un pistone. Se si prova ad esercitare una certa forza su tale parete mobile, ponendovi sopra dei pesi, si potrà percepire, e misurare, una forza di opposizione del gas: la pressione appunto.

*Qual è, secondo la teoria cinetica, il meccanismo di questa **pressione interna**? Un enorme numero di particelle, costituenti il gas, si muovono in tutte le direzioni. Esse bombardano le pareti ed il pistone rimbalzando come palle lanciate contro un muro. Questo continuo bombardamento, effettuato da un grandissimo numero di particelle, mantiene il pistone ad una certa altezza opponendosi alla forza di gravità che attira verso il basso il pistone ed i pesi ad esso sovrapposti. In un senso abbiamo la forza di gravità, che è costante, e nel senso opposto i numerosissimi urti irregolari delle molecole. Affinché possa esservi equilibrio bisogna che l'effetto complessivo di tutte le piccole forze irregolari, agenti sul pistone, sia uguale e contraria alla forza di gravità.*

Un successo di questa teoria è la possibilità di calcolare il **numero medio delle molecole contenute in una certa massa di gas** e, all'incirca, **la massa di ciascuna delle molecole**.

Il numero medio delle molecole in un grammo d'idrogeno è: 3030000000000000000000000

La massa di una molecola di idrogeno è circa: 0,0000000000000000000000033 g.

Tale risultato è stato confermato anche da approcci differenti dalla teoria cinetica e si ritiene, a tutt'oggi, accettabile. Pensate che successo per l'epoca in cui è stato ottenuto!

Inoltre tale teoria non si applica solo ai gas, ancorché abbia registrato i suoi maggiori successi in tale ambito, ma ai fluidi in genere. Un gas, mediante riduzione di temperatura cioè dell'energia cinetica media, può infatti essere liquefatto.

Una sorprendente manifestazione del **moto di particelle in un liquido** si ebbe, per la prima volta, con il cosiddetto *moto browniano*: un importante fenomeno che, senza la teoria cinetica della materia, sarebbe rimasto assolutamente misterioso e incomprensibile. Esso fu osservato per la prima volta dal botanico Robert **Brown** ma venne spiegato ottanta anni dopo, al principio del XX secolo. L'unico apparecchio occorrente per studiare il *moto browniano* è un microscopio, e neanche tanto buono. **Brown** stava lavorando con granuli di polline di talune piante: particelle del diametro di circa 5 millesimi di millimetro. Einstein riporta le parole di **Brown**, *ibidem*, pag 68:

ESAMINANDO LA FORMA DI QUESTE PARTICELLE IMMERSO NELL'ACQUA MI ACCORSI CHE MOLTE DI ESSE SI TROVAVANO IN MOTO... QUESTI MOVIMENTI ERANO TALI DA CONVINCERMI, DOPO RIPETUTE OSSERVAZIONI, CHE ESSI NON POTEVANO ESSERE CAUSATI NÉ DALLE CORRENTI NEL FLUIDO, NÉ DALLA SUA GRADUALE EVAPORAZIONE, MA CHE DOVEVANO APPARTENERE ALLE PARTICELLE STESSE [DELL'ACQUA]

Guardando l'acqua anche con potenti microscopi non riusciamo a distinguere né le molecole né il loro moto come viene rappresentato dalla teoria cinetica della materia.

*Il **moto osservabile** è dunque il risultato di un moto non direttamente osservabile. Il comportamento delle particelle immerse rispecchia, fino ad un certo punto, quello delle molecole d'acqua e ne costituisce, per così dire, un ingrandimento tale da renderlo visibile al microscopio. Il carattere irregolare e accidentale del moto delle particelle browniane rispecchia un'analogia irregolarità del percorso delle particelle più piccole costituenti la materia del liquido.*

Il movimento browniano non esisterebbe se le molecole bombardanti non possedessero una certa dose di energia o, in altre parole, se non possedessero massa e velocità [attenzione: vedremo più avanti che, mutatis mutandis, un esperimento analogo ci porterà ad attribuire una massa anche a grandezze fisiche cui il nostro senso comune non ci porterebbe mai a farlo!].

*Einstein, *ibidem* pag. 70: Nella teoria cinetica della materia e in tutti gli importanti risultati da essa raggiunti (spiegazione della natura del calore, spiegazione microscopica della pressione in un gas, estensione della legge di conservazione dell'energia, spiegazione della struttura della materia, calcolo del numero di particelle in un grammo di materia e della massa di ciascuna di queste) riconosciamo la realizzazione del programma filosofico generale, secondo il quale la spiegazione di tutti i fenomeni si riduce all'interazione fra particelle materiali.*

Riassumiamo: la meccanica ci consente di predire esattamente il futuro della traiettoria di un corpo in movimento, nonché di dischiuderne il passato, sempre che la posizione attuale del corpo stesso e le forze che agiscono sul corpo siano note. Così ad esempio possono prevedersi le traiettorie future di tutti i pianeti. In questo caso le forze agenti sono le forze gravitazionali di Newton, dipendenti unicamente dalle distanze.

Gli incontestabili successi della meccanica classica suggeriscono che l'interpretazione meccanicista possa coerentemente estendersi ad ogni ramo della fisica e che tutti i fenomeni possano spiegarsi con le azioni di forze, consistenti in attrazioni o repulsioni, dipendenti unicamente dalla distanza e agenti su particelle immutabili.

*Con la **teoria cinetica della materia** vediamo come tale interpretazione, derivante da problemi di tipo meccanico, si estenda ai fenomeni calorifici e conduca ad una rappresentazione della struttura della materia che registra notevoli successi.*

Siamo all'apice del successo dell'interpretazione meccanicista: a partire dalla prossima lezione parleremo del suo declino!