

## STORIA DELLA FISICA

### Il moto browniano

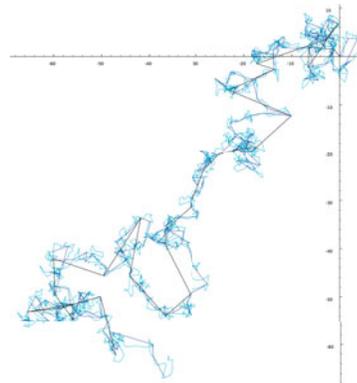
Siamo abituati ad associare il nome di Albert Einstein alla teoria della relatività e alla fisica quantistica, e in effetti sono i lavori scientifici che gli hanno procurato più fama anche tra i non esperti in materia, oltre a un premio Nobel. Era il 1905 - Einstein aveva 26 anni - quando uscirono i famosi articoli, e doveva essere un anno davvero fecondo per lo scienziato perché, insieme a questi, egli offrì altri contributi alla conoscenza della natura, meno noti al grande pubblico ma non meno importanti. In quegli anni il dibattito sulla natura corpuscolare della materia era cruciale: molti erano ancora coloro che non riuscivano a persuadersi dell'esistenza degli atomi e consideravano l'interpretazione microscopica della materia come un semplice modello astratto, che funzionava in più di un'occasione ma che non aveva nulla a che vedere con la realtà delle cose. In questo contesto l'apporto di Einstein fu decisivo. Egli, partendo dall'ipotesi corpuscolare e da un modello simile a quello della teoria cinetica, riuscì a riprodurre un fenomeno già noto, ma mai spiegato in modo soddisfacente.



il giovane Einstein era impiegato all'ufficio brevetti di Berna quando uscirono i suoi lavori più importanti.

### Polline in movimento

Stiamo parlando del cosiddetto moto browniano, cioè del movimento continuo e disordinato che hanno le particelle dell'ordine del micron quando sono immerse in liquidi o gas. Il moto browniano fu scoperto ufficialmente nel 1828 da Robert Brown, un botanico che stava osservando al microscopio piccoli granelli di polline posti in sospensione in acqua. Egli notò che i granelli si muovevano senza sosta in ogni direzione, deviando improvvisamente e senza causa apparente la direzione della velocità, producendo pertanto una traiettoria irregolare con un andamento a zig-zag. All'inizio pensò che tale moto dipendesse dalla natura organica del polline, ma poi si accorse che avveniva la stessa cosa se venivano posti in sospensione granelli di natura inorganica. Numerosi scienziati si interessarono al fenomeno, ma nessuno riuscì a trovare una spiegazione soddisfacente e dopo un po' l'interesse diminuì.



Esempio di traiettoria di una particella che si muove di moto browniano.

### Un'indagine teorica

Il moto browniano era di difficile interpretazione: in tanti si cimentarono in esperimenti e ipotesi, ma per decenni nessuno riuscì a venirne a capo. La svolta, in effetti, fu un approccio del tutto nuovo alla questione: se fino ad allora gli studi erano stati svolti a partire da osservazioni al microscopio, Einstein utilizzò invece carta e matita. Il punto di partenza era dunque un modello astratto fatto di palline in movimento, e, grazie all'applicazione sapiente della matematica, egli riuscì a riprodurre un fenomeno reale che fino a quel momento era rimasto un mistero. Il modello diventò ben più di un semplice «modello» e contribuì, come prova concreta, a sancire la validità della natura corpuscolare della materia che oggi consideriamo una realtà assodata.

### Come si spiega il moto browniano?

Un granello di polline viene colpito dalle molecole dell'acqua in modo casuale in tutte le direzioni, tuttavia può capitare che in un certo istante, casualmente, gli urti lungo una direzione prevalgano sugli altri: il granello riceve pertanto una spinta in quella direzione. Dopo un po' tale condizione potrebbe verificarsi di nuovo in una direzione diversa, e il granello disegna così la sua traiettoria a zig-zag. Esso si trova nella stessa condizione in cui si trovano le molecole d'acqua, ma è molto più grande (circa  $10^4$  volte maggiore) e noi possiamo vederlo.



Goncharuk / Shutterstock

In assenza di correnti il moto browniano spiega la diffusione delle particelle di inchiostro in acqua.

**DOMANDA** Come ti aspetti che cambi la velocità dei granelli di polline al variare della temperatura? Motiva la risposta in 5 righe.

## CHIMICA

## Il numero di Avogadro

Per sapere l'esatto valore del numero di Avogadro dovremmo essere in grado di contare uno alla volta gli atomi contenuti in 12 g di carbonio-12, ma attualmente questa operazione non è possibile. Non conosciamo quindi quale sia esattamente il valore del numero di Avogadro, ma possiamo solamente fornire delle stime, per quanto accurate. Si può risalire a tale valore con misure di vario tipo, studiando fenomeni diversi, dall'elettrochimica alla radioattività, all'analisi del moto browniano. Attualmente si assume il valore:

$$N_A = 6,022\,141\,29 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

con un'incertezza di  $0,000\,000\,27 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

## Un semplice esperimento

Quando versiamo una goccia d'olio in un catino d'acqua osserviamo che questa, per la sua minore densità, rimane in superficie e tende a espandersi, rimanendo tuttavia compatta grazie alla coesione interna. Se l'olio non raggiunge le pareti del recipiente, l'espansione della goccia a un certo momento si arresta: si presume che a questo punto lo strato abbia uno spessore circa pari alle dimensioni di una molecola. Infatti l'olio è composto principalmente da acido oleico, la cui molecola ha una struttura a catena, che presenta un'estremità polare: quando le molecole di acido oleico vengono attratte dall'acqua, si allineano in modo che l'estremità polare si orienti verso quest'ultima: in tal modo si ottiene uno strato sottile, che ha come spessore quello di una molecola.

Se si assume che al massimo dell'espansione la goccia d'olio sia una macchia di forma cilindrica, possiamo usare una formula matematica per esprimere il suo volume in funzione del raggio  $R$  e dello spessore  $h$ :

$$V = \pi R^2 \times h$$

In questa formula il dato incognito è  $h$ , che ci dà una stima delle dimensioni di una molecola d'olio, mentre sono direttamente misurabili il volume  $V$  della goccia iniziale e il raggio  $R$  della macchia.

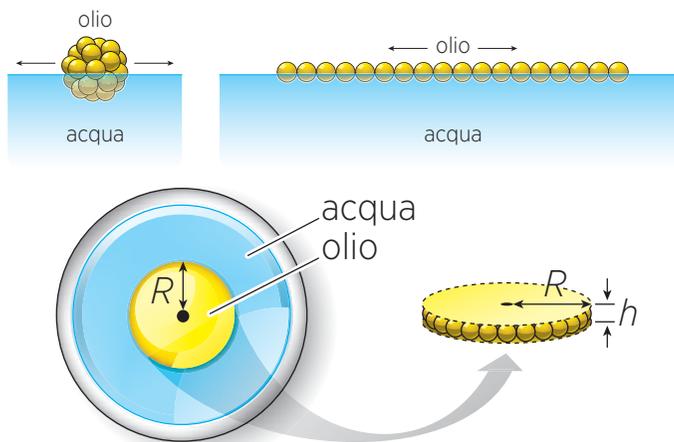
Se ciascuna molecola ha dimensioni lineari pari ad  $h$ , il suo volume è dell'ordine di  $h^3$ . Il numero di molecole contenute nella goccia è quindi stimato attraverso il rapporto:

$$N \approx \frac{V}{h^3}$$

Conoscendo la massa di una mole d'olio (nota la sua formula chimica) e la sua densità, si ricava il volume che occupa una mole d'olio e quindi il numero di moli  $n$  contenuto nella goccia usata nell'esperimento. Il numero di Avogadro è quindi stimato dal rapporto:

$$N_A \approx \frac{N}{n}$$

Svolgendo l'esperimento con molta accuratezza e raffinando la stima del volume di ciascuna molecola d'olio qui grossolanamente approssimata con il valore  $h^3$ , si riescono a ottenere risultati dell'ordine di  $10^{23}$ , molto vicini al valore ufficiale del numero di Avogadro.



**DOMANDA** L'esperimento fornisce in genere stime per difetto. Perché? (*Suggerimento*: se si approssima il volume delle molecole d'olio con il valore  $h^3$ , quale forma si assume che abbiano?)

## CON GLI OCCHI DI UN FISICO

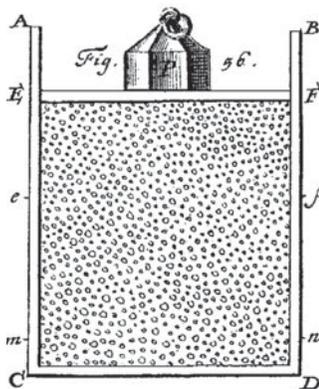
### Dai gas alle api

#### Modelli microscopici dei gas

I gas sono stati i primi a essere studiati mediante un modello microscopico corpuscolare, ideato per poter spiegare – secondo opportune ipotesi – proprietà macroscopiche quali pressione e temperatura. Il modello è estremamente semplice: punti materiali lontani tra loro, che si muovono a caso in tutte le direzioni, senza privilegiarne alcuna, e le cui interazioni si riducono agli urti elastici reciproci o con le pareti del recipiente. Eppure, nonostante l'estrema semplicità, il modello rende conto di grandezze fisiche effettivamente misurabili, interpretate come proprietà medie dell'insieme di un grande numero di particelle.

Se consideriamo che una mole di gas alla pressione di 1 atm e alla temperatura di 0 °C occupa un volume di 22,4 litri, vediamo che il numero di particelle di gas che possiamo trovare in un volume finito è talmente elevato che è praticamente impossibile studiarne il moto microscopico seguendole una ad una. Pur conoscendo le leggi della meccanica, sufficienti per studiare il moto di ciascuna particella, presa una alla volta, non possiamo usarle per studiare il gas nel suo insieme.

Per questo motivo, a partire dal primo semplice modello della teoria cinetica dei gas, è stata sviluppata la cosiddetta «meccanica statistica», in cui la teoria della probabilità ha trovato un'applicazione fisica. Il gas viene studiato per mezzo delle proprietà medie dei suoi costituenti e in termini probabilistici, cioè rinunciando alla conoscenza esatta e puntuale di ciascuna grandezza microscopica.



Daniel Bernoulli (1700-1782) già nel 1738 aveva proposto di analizzare le proprietà dei gas immaginando che fossero formati da piccolissime particelle in movimento.

Per «effetto farfalla» si intende la dipendenza significativa dell'evoluzione di un sistema dai valori iniziali, per cui basta una loro piccola variazione per provocare effetti molto vistosi dopo un lungo periodo di tempo. Un sistema del genere è detto «caotico».

**PAROLA CHIAVE** Velocità quadratica media

**DOMANDA** Se nel modello utilizzato nella teoria cinetica dei gas le particelle si muovessero come le api, la pressione non sarebbe più rappresentata correttamente dalla velocità quadratica media.

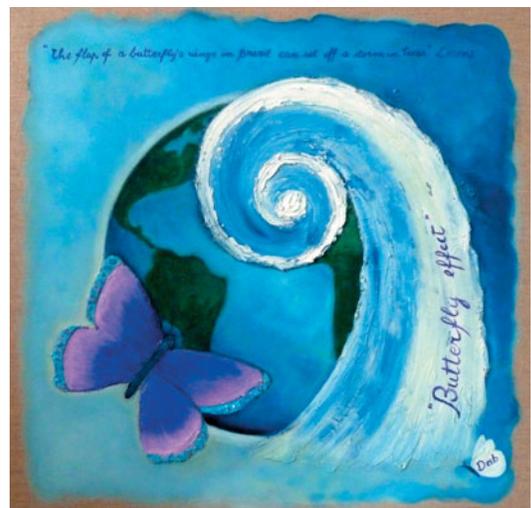
► Perché? (*Suggerimento*: quali ipotesi non sarebbero verificate?)

#### Qualche complicazione in più

Nella maggior parte dei sistemi reali le interazioni tra le particelle non si possono trascurare: i modelli diventano più complicati e, con essi, il loro studio. I gas atmosferici, per esempio, compiono moti prevedibili solo per piccoli intervalli di tempo e comunque con un ampio margine di errore: è noto che le previsioni del tempo sono attendibili soltanto in termini probabilistici e in misura minore su tempi lunghi.

Questo tipo di studi si è sviluppato parallelamente ai calcolatori, che hanno permesso di risolvere un elevato numero di operazioni in un tempo abbastanza breve, impensabile con il calcolo manuale. Negli anni Sessanta, il meteorologo Edward Norton Lorenz fece un'importante scoperta mentre studiava un modello matematico dell'atmosfera. Secondo un aneddoto, il computer – allora molto lento rispetto a quelli dei nostri giorni – aveva fornito un tabulato di dati in sequenza, partendo da determinati valori iniziali delle variabili, che Lorenz pensò di verificare ripetendo l'elaborazione. Tuttavia questa volta non inserì nelle equazioni gli stessi valori iniziali, ma fece cominciare il calcolo a partire da dati intermedi.

Il risultato fu sorprendente: l'evoluzione successiva del modello era diversa dalla precedente e le differenze aumentavano man mano che la simulazione andava avanti. Lorenz continuò a studiare questo comporta-



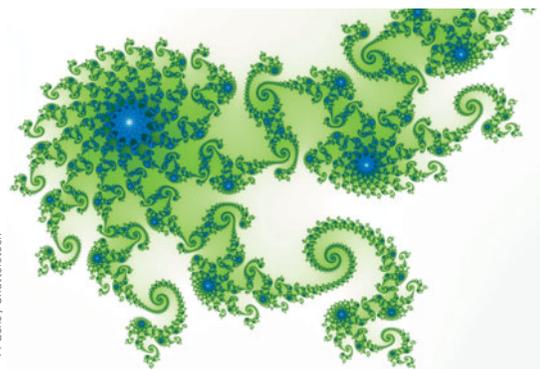
**PAROLA CHIAVE** Modello microscopico

**DOMANDA** Quali condizioni deve soddisfare un gas reale affinché la sua pressione e la sua temperatura siano approssimativamente descritte dal modello microscopico della teoria cinetica dei gas?

mento imprevisto e lo interpretò in un famoso articolo, intitolato *Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?* («può il battito d'ali di una farfalla in Brasile provocare un tornado in Texas?»). Aveva scoperto che in determinati sistemi una piccola variazione delle condizioni di partenza provoca grandi variazioni negli effetti: aveva, in altre parole, scoperto il *caos*. Molti sistemi con un elevato numero di particelle si comportano in modo caotico, cioè vale per essi il cosiddetto «effetto farfalla» descritto da Lorenz, che limita la loro prevedibilità su tempi lunghi.

### Scivolare nel caos...

Nel linguaggio comune il termine «caos» fa subito venire in mente il suo sinonimo «confusione». In senso fisico non c'è confusione nel caos, anzi, anche nei sistemi caotici è possibile individuare regolarità matematiche: l'evoluzione nel tempo di un sistema caotico è descritta da curve che si addensano in particolari strutture dette «attrattori», con caratteristiche frattali. Un frattale è una figura geometrica costruita per iterazioni successive, che mostra su ogni scala la stessa struttura. In natura è molto comune incontrare dei frattali: le nuvole, le ramificazioni di un albero, i cavolfiori eccetera.



PH-Lens / Shutterstock



Tamarakuklikova / Shutterstock

Guardando una piccola parte di un frattale con una lente d'ingrandimento ritroviamo esattamente la stessa struttura ripetuta.

### I sistemi complessi

Tra i sistemi con elevato numero di particelle troviamo gli organismi viventi. Essi sono sistemi le cui parti interagiscono in modo complesso, difficilmente schematizzabili mediante modelli semplici come quello dei gas perfetti. Si può riconoscere un elevato grado di complessità anche se consideriamo un insieme numeroso di organismi viventi, quali le moltitudini di animali. Tuttavia, pur nella loro complessità, essi mostrano molto spesso, nel loro insieme, comportamenti con un certo grado di regolarità.

Fino a poco tempo fa lo studio di tali comportamenti veniva svolto dagli etologi su base osservativa, ma negli ultimi decenni a questa modalità di indagine scientifica si è affiancato l'uso di modelli matematici, concettualmente simili a quelli usati con i gas. In altre parole, si è visto che la regolarità di certi comportamenti animali di massa, come per esempio quelli di un formicaio, di uno sciame di api o di una folla di esseri umani, può essere riprodotta al computer mediante modelli *ad hoc* con opportune ipotesi di partenza.

Lo studio dei sistemi di questo tipo è detto «scienza della complessità» e si sta sviluppando proprio in questi anni con la collaborazione sinergica di una grande varietà di studiosi: dai biologi ai fisici, dai chimici agli economisti, dai matematici ai sociologi.



Steven Russell Smith Photos / Shutterstock

DJ Maltzar / Shutterstock

Le azioni di ogni singola ape determinano il comportamento collettivo dell'intero alveare, che nel suo insieme ha una propria individualità, come se fosse un organismo singolo. La costruzione delle celle, la sciamatura, la scelta della regina: la comunità delle api è autoregolata da meccanismi complessi, che potrebbero essere riprodotti mediante un opportuno modello matematico. Il comportamento collettivo di molti animali è una strategia di difesa dai predatori.

#### PAROLA CHIAVE **Mole**

**DOMANDA** I formicai più grandi possono contenere fino a qualche milione di formiche.

► Estendendo il concetto di mole alla quantità di individui, quanti formicai da un milione di formiche ci vogliono per avere una mole di insetti?