

# Viaggio nella turbolenza

Grazie alle simulazioni con i supercalcolatori, si cominciano a scoprire i meccanismi microscopici che governano il moto collettivo dei fluidi

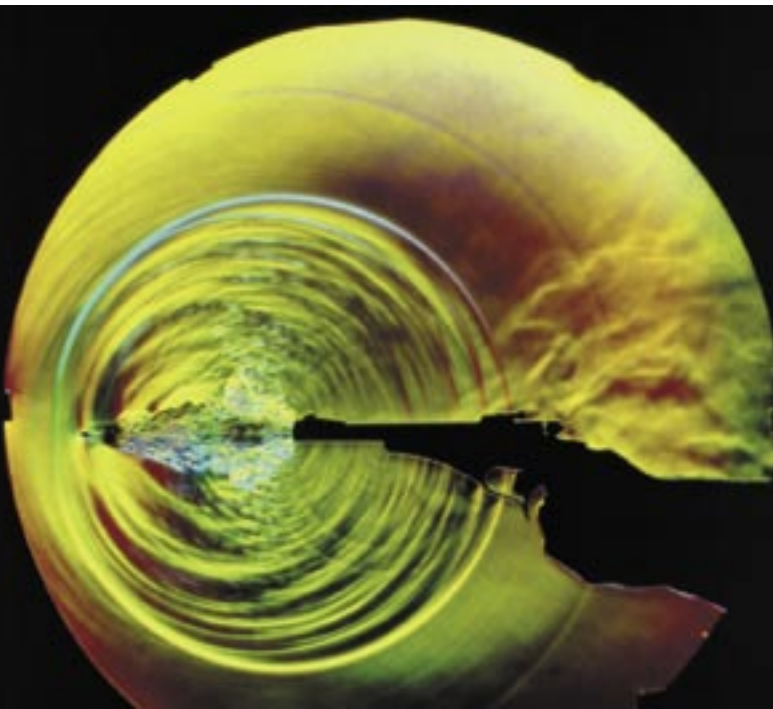
di Luca Biferale, Guido Boffetta, Antonio Celani, Alessandra Lanotte e Federico Toschi

**S**tate per godervi una bella cenetta a lume di candela. Una serata romantica per un'occasione importante. All'improvviso, mentre chiacchierate, prima ancora che i piatti arrivino in tavola, dalla cucina il profumo invitante del risotto vi fa venire l'acquolina in bocca. Tutti noi sperimentiamo di continuo gradevoli sensazioni, grazie al nostro olfatto. Ma vi siete mai chiesti come accade che gli odori possono essere distintamente percepiti dopo pochi secondi anche a distanze considerevoli dalla loro sorgente? Cerchiamo di ricostruire il percorso di una molecola odorosa nel suo tragitto da quando viene liberata nell'aria, per esempio dalla pizza che cuoce nel forno, a quando arriva alle nostre narici.



A LUME DI CANDELA. Questa fotografia di una Coppietta che cena romanticamente a lume di candela è eseguita con la tecnica Schlieren, che permette di visualizzare i cambiamenti di densità nei mezzi trasparenti, evidenziando la turbolenza convettiva provocata dal calore delle candele e, in misura minore, da quello dei piatti.





Dr. Gang Settles/SPL/Grazia Neri

## In sintesi/L'enigma dei fluidi

- Dal punto di vista matematico, il moto di un fluido è descritto da equazioni elaborate oltre un secolo e mezzo fa, ma la loro soluzione è tutt'altro che semplice.
- Uno dei moti più interessanti dei fluidi dal punto di vista pratico è la turbolenza, una forma di movimento apparentemente disordinato il cui esito diviene rapidamente imprevedibile.
- Simulando l'evoluzione del moto turbolento con i supercomputer è possibile osservare la formazione di moti collettivi che danno origine ai filamenti di vorticità, cicloni in miniatura in cui le particelle di fluido vengono accelerate a valori estremi.
- Chiarire i meccanismi della turbolenza ci permetterebbe di studiare fenomeni come la diffusione degli inquinanti in atmosfera o la dispersione di agenti patogeni.

**SHOCK DA SPARO.** All'uscita di un proiettile da una pistola, si sovrappongono un'onda d'urto sferica centrata attorno all'estremità della canna e i moti turbolenti del propellente che spinge il proiettile.

Innanzitutto, la nostra molecola è messa in movimento dagli urti con le molecole dell'aria. Queste ultime sono perennemente impegnate in un moto disordinato generato dai loro urti reciproci, un moto incoerente chiamato agitazione termica: quanto più elevata è la temperatura dell'aria, tanto maggiore è la velocità caratteristica delle molecole. La somma di tutti i contributi incoerenti dovuti agli urti risulta nello spostamento della «molecola odorosa» dalla sua posizione originale.

Quando però si cerca di stimare l'importanza di questo effetto di diffusione molecolare, ci si rende conto che è del tutto trascurabile su scala macroscopica in condizioni normali (*si veda il box nella pagina a fronte*). Infatti la nostra molecola impiegherebbe diverse ore per percorrere i pochi metri che ci separano dal forno (e la pizza sarebbe carbonizzata da un pezzo). Ma qual è allora l'ingrediente che ci manca per spiegare la rapidità con la quale i profumi ci raggiungono?

Riesaminando più attentamente la questione, ci accorgiamo di aver trascurato un aspetto determinante: oltre al moto individuale, e casuale, di agitazione termica, le molecole sono coinvolte in un movimento collettivo. Quest'ultimo è organizzato in modo coerente su scale spaziali che, nel nostro esempio, possono essere dell'ordine di un millimetro, e quindi svariati ordini di grandezza più grandi di quelle molecolari (che sono intorno al milionesimo di metro). Grazie a questa proprietà non è necessario mettere a fuoco il moto delle singole molecole, ma è sufficiente seguire la traiettoria di una piccola porzione di aria, una «particella fluida» delle dimensioni di un millimetro cubo la cui traiettoria è rappresentativa del moto medio delle molecole che la compongono.

### I moti di un fluido

Dal punto di vista matematico la descrizione del moto di un fluido è regolata da equazioni note da più di centocinquanta anni, derivate per la prima volta nel 1827 da Claude Navier,

ancorché sulla base di ipotesi non del tutto motivate. Nel 1843 Jean-Claude Barré de Saint-Venant ottenne la stessa equazione di Navier seguendo un approccio differente, che gli evitò di cadere nell'errore del suo illustre predecessore. Tuttavia, per un'inspiegabile circostanza, queste equazioni non portano il suo nome, ma sono invece universalmente note come le equazioni di Navier-Stokes, (NS) anche se George Gabriel Stokes le ricavò soltanto due anni dopo la pubblicazione dei risultati di Saint-Venant.

Da allora, innumerevoli esperimenti di laboratorio hanno confermato la validità di queste equazioni per descrivere il moto dei fluidi. Solo molti anni dopo, verso il 1917, grazie allo sviluppo della meccanica statistica promosso da Ludwig Boltzmann (1872), Sydney Chapman e David Enskog riuscirono a derivare le equazioni di Navier-Stokes partendo dalla descrizione microscopica del moto delle molecole di fluido. Nonostante la loro semplicità formale, le equazioni di Navier-Stokes ammettono una varietà di soluzioni che basta a rendere conto degli innumerevoli fenomeni che si osservano nell'esperienza quotidiana. Tra questi, uno dei più affascinanti è sicuramente la turbolenza, cioè il moto altamente irregolare e imprevedibile del fluido.

### Identikit della turbolenza

Un tratto caratteristico del flusso turbolento di un fluido è la sua grande efficacia nel disperdere le particelle. Tenendo conto del moto irregolare dell'aria, si può stimare che un gruppo di molecole inizialmente localizzate in una regione di pochi millimetri cubi si separeranno fino a distanze di circa un metro in una manciata di secondi, in accordo con l'esperienza (*si veda il box nella pagina a fronte*).

Se alle «molecole di profumo di pizza» si sostituiscono delle polveri inquinanti, oppure degli atomi radioattivi, o ancora dei batteri nocivi, si comprende l'importanza pratica di avere una

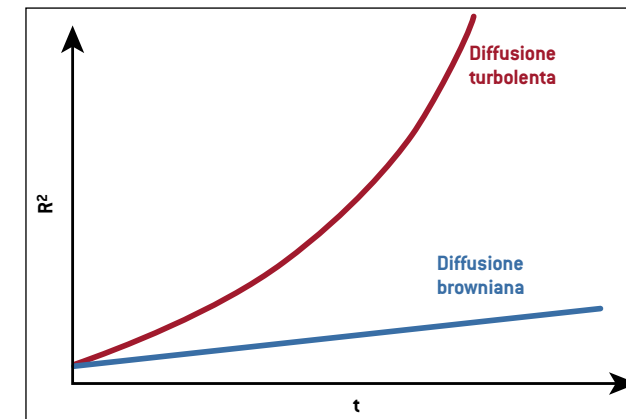
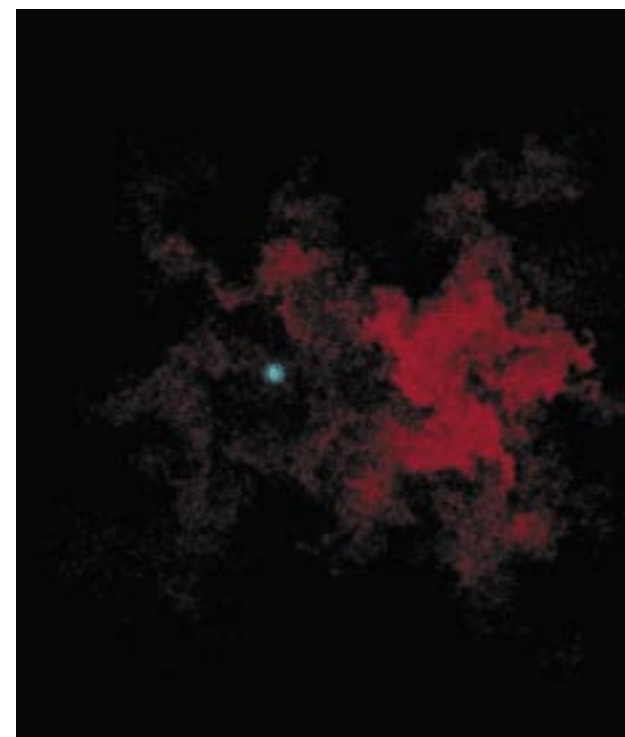
## MOTO BROWNIANO E DIFFUSIONE TURBOLENTA

Come osservato dal botanico Robert Brown nel 1827 e spiegato teoricamente da Einstein nel 1905, una particella microscopica immersa in un liquido a riposo è soggetta a un moto erratico conseguente alle collisioni con le molecole. Consideriamo una macchia colorata composta da molte particelle microscopiche indipendenti soggette a moto browniano. Il quadrato della dimensione  $R$  della macchia (in azzurro nella figura in basso) cresce in modo diffusivo, cioè linearmente nel tempo secondo un coefficiente di proporzionalità  $D_0$ , detto coefficiente di diffusione, il cui valore è inversamente proporzionale al diametro delle particelle e proporzionale alla temperatura del liquido. Per situazioni macroscopiche, come la dispersione di inquinanti in atmosfera, la legge di diffusione browniana è in pratica irrilevante, a causa del piccolissimo valore di  $D_0$ .

Nel 1926 il meteorologo Lewis Fry Richardson ottiene su basi empiriche la legge di diffusione in turbolenza che prende il suo nome. A partire da una serie di osservazioni in atmosfera, Richardson intuì che in casi macroscopici il coefficiente  $D_0$  va rimpiazzato con un coefficiente di diffusione turbolento  $D_T$ .

L'osservazione sperimentale mostra non solo che  $D_T$  è molto maggiore di  $D_0$ , ma anche che il suo valore aumenta al crescere delle dimensioni della macchia (cioè col tempo) secondo una semplice legge. Come conseguenza della legge di Richardson, la diffusione in turbolenza è un processo esplosivo, per cui la nuvola di colore (in rosso) si allarga tanto più velocemente quanto più è grande, generando una struttura ramificata frattale. Il quadrato della dimensione  $R$  della «nuvola frattale» cresce secondo il cubo del tempo, molto più velocemente che nel moto browniano.

Le legge di Richardson ha una validità universale dalle più piccole scale della turbolenza (pochi millimetri) fino a scale di centinaia di chilometri in atmosfera. Malgrado la sua età e l'importanza per le applicazioni, l'osservazione della legge di Richardson è tuttora una sfida per le moderne tecniche di laboratorio, a causa della difficoltà di seguire le traiettorie di molte particelle in un flusso altamente turbolento. In questo contesto, l'analisi numerica di simulazioni ad alta risoluzione di flussi turbolenti, come quella descritta in questo articolo, rappresenta uno strumento alternativo di indagine.



LA DIFFUSIONE TURBOLENTA (in rosso) di una nuvola di particelle inizialmente concentrate in un volume infinitesimo. La nuvola concentrata di particelle blu rappresenta invece il risultato di un semplice moto Browniano allo stesso istante di tempo. Sopra, la legge di crescita di Richardson per il quadrato della dimensione caratteristica di una nuvola di particelle in un fluido turbolento (curva in rosso) confrontata con il caso del moto browniano (curva in blu). Nel primo caso la crescita è molto più rapida, permettendo alle particelle trasportate di esplorare una regione del fluido molto più vasta a parità di tempo.

descrizione precisa della dispersione turbolenta, che ha un ruolo chiave in un numero impressionante di fenomeni. Lo studio sperimentale del moto delle particelle in un flusso turbolento si è però dimostrato particolarmente difficile.

Diversi studi sono stati condotti seguendo le traiettorie di palloni rilasciati in atmosfera. Ma questo approccio presenta diversi svantaggi, principalmente dovuti alla grande variabilità della circolazione atmosferica e al costo elevato delle sonde. Ne consegue che è praticamente impossibile effettuare esperimenti con

un grandissimo numero di traccianti in condizioni controllate e ripetibili. Per queste ragioni si è tentata la via delle esperienze di laboratorio, che possono essere condotte con costi più contenuti.

In questo caso si possono seguire le traiettorie di minuscole sfere di metallo o di plexiglas che riflettono la luce emessa da un laser. Tuttavia, fino a oggi non è stato possibile seguire il percorso compiuto dalle particelle con un'elevata risoluzione temporale e per intervalli di tempo sufficientemente lunghi. Inoltre, non appena ci si pone l'obiettivo di seguire più di una manciata di

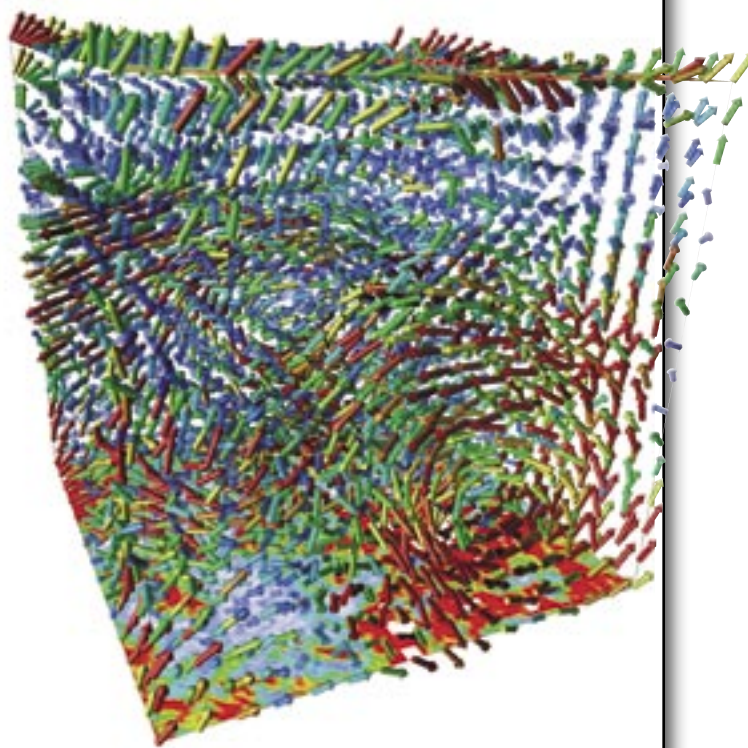


## LE EQUAZIONI DI NAVIER-STOKES E IL MOTO TURBOLENTO

L'evoluzione spatio-temporale del campo di velocità di un fluido, sia allo stato liquido che gassoso in condizioni di temperatura e densità non critiche, sono descritte da un sistema di equazioni differenziali, le equazioni di Navier-Stokes. Queste equazioni non sono altro che l'applicazione della legge di Newton,  $F = ma$ , a un volume infinitesimo del fluido. Le forze di superficie che agiscono su una qualsiasi porzione di fluido, come la forza di pressione e la forza viscosa, sono dovute all'interazione tra molecole contigue. A causa del carattere dissipativo della viscosità, è necessario fornire continuamente energia affinché il fluido rimanga in moto. Le forze esterne, in generale forze di volume, possono essere la gravità oppure un qualunque meccanismo di agitazione meccanica, come per esempio un ventilatore. Le equazioni di Navier-Stokes sono un problema aperto. I matematici sono interessati a dimostrare l'esistenza ed unicità globale delle soluzioni: un problema che vale il milione di dollari messo in palio dal Clay Mathematics Institute. I fisici sono invece concentrati sullo studio dei fenomeni che le equazioni di Navier-Stokes sono in grado di descrivere. Tra questi, il moto turbolento è senza dubbio il meno compreso e il più affascinante. Ma perché le equazioni di Navier-Stokes sono così difficili? E come è possibile che esse ammettano soluzioni delle quali abbiamo scoperto l'esistenza solo grazie all'osservazione della natura e più di recente con le simulazioni al computer?

La difficoltà è legata al fatto che si tratta di equazioni non-lineari, cioè che coinvolgono prodotti delle variabili che si vogliono ricavare, qui le velocità. La non-linearità implica che l'effetto prodotto dalla somma di piccole fluttuazioni simultanee nel campo di velocità non coincide con la somma degli effetti prodotti dalle singole fluttuazioni. La conseguenza più importante è che l'evoluzione spatio-temporale di un flusso soggetto a due condizioni iniziali leggermente differenti raggiunge stati macroscopici molto diversi in breve tempo. È a causa di questa forte dipendenza dalle condizioni iniziali che l'evoluzione temporale diventa rapidamente imprevedibile. Questo fenomeno prende il nome di caos deterministico: concetto introdotto per la prima volta nel 1963 dal meteorologo Edward Lorenz. Esiste un numero adimensionale in grado di fornire una stima «a priori» del grado di caoticità di un fluido turbolento: il numero di Reynolds,  $Re = U \times L / \nu$ . Questa grandezza è una stima del peso relativo dei termini non-lineari rispetto a quelli lineari nelle equazioni di Navier-Stokes. Il numero di Reynolds cresce con la velocità caratteristica del flusso  $U$  e l'estensione  $L$  delle scale spaziali su cui il moto si sviluppa, mentre maggiore è la viscosità del fluido,  $\nu$ , minore è la turbolenza.

All'aumentare del numero di Reynolds il moto diventa sempre più caotico e imprevedibile. Gli esperimenti mostrano che i fluidi subiscono vere e proprie transizioni nel comportamento qualitativo del loro moto al variare di  $Re$ . Pensiamo a una pentola d'acqua sul fuoco. All'aumentare della quantità di calore assorbita, il fluido passa da uno stato di quasi quiete (numero di Reynolds piccolo) a un moto convettivo e predicibile, costituito da oscillazioni regolari e periodiche su grande scala. Poco prima dell'ebollizione, ad alti numeri di Reynolds, si sviluppa un moto fortemente caotico, in cui le fluttuazioni dell'acqua avvengono con frequenze differenti e su



LA CONFIGURAZIONE ISTANTANEA DEL CAMPO DI VELOCITÀ di un fluido turbolento calcolata con una simulazione numerica su una griglia cubica di 1024 punti di lato. Le frecce indicano l'intensità e la direzione del campo in un sottoinsieme di punti. Il numero di Reynolds è stimato a partire dal volume  $L$  occupato dal fluido, dall'intensità tipica del campo di velocità (data dalla media dell'ampiezza delle frecce su tutto il volume) e dalla viscosità molecolare del fluido in questione (per l'acqua a temperatura ambiente  $\nu = 1,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ ). Negli esperimenti di laboratorio, la turbolenza sviluppata ad alti numeri di Reynolds si ottiene aumentando le dimensioni dell'apparato oppure l'intensità delle forze esterne che agitano il moto. Nelle simulazioni invece è più semplice tenere invariati la geometria e il tipo di forze esterne al diminuire della viscosità molecolare.

tutte le scale, in modo del tutto imprevedibile. Si parla in questo caso di «turbolenza sviluppata». I flussi turbolenti ad alti  $Re$  perdono in predicibilità ma hanno proprietà statistiche riproducibili, rendendo così possibile una descrizione in termini di quantità medie.

La turbolenza sviluppata è considerata il più importante problema di fisica classica irrisolto. Si tratta, nel linguaggio dei fisici teorici, di un problema di teoria dei campi fortemente non-lineare. Grazie al contributo pionieristico di Andrei N. Kolmogorov, si è ipotizzato che il campo di velocità di un fluido turbolento sia tutt'altro che la semplice sovrapposizione di fluttuazioni incoerenti. Analizzando il segnale temporale di un anemometro posto nel fluido si misurano fluttuazioni di velocità su un vasto intervallo di frequenze con caratteristiche simili a quelle del grafico «rugoso» di un frattale. La rugosità, però, non è uniforme, ma può variare in modo intermittente, generando una distribuzione detta multifrattale.



UN ESEMPIO DI TRAIETTORIA SPIRALEGGIANTE intorno a strutture vorticosi. I diversi colori codificano l'intensità del modulo della velocità.

particelle simultaneamente diventa molto difficile attribuire senza ambiguità le tracce luminose alle corrispondenti particelle.

Come superare questa situazione di stallo? Lo studio dell'evoluzione del fluido *in silico*, cioè simulata al computer, è la soluzione a questi problemi. Beninteso, anche in quest'ultimo caso le difficoltà non mancano. Per calcolare l'evoluzione di una porzione di fluido di un metro cubo – composto cioè da un miliardo di particelle fluide di un millimetro cubo di volume ciascuna – per una durata di tempo apprezzabile, il computer deve effettuare circa un milione di miliardi di operazioni. Diventa quindi necessario fare ricorso ai supercalcolatori come quelli messi a disposizione dal CINECA (si veda il box a p. XX). Un vero e proprio esperimento, il primo al mondo condotto con questa risoluzione spaziale e questa durata temporale, che ha richiesto ben 50.000 ore di calcolo distribuite su 64 processori (corrispondenti a circa 30 giorni di simulazione) è stato condotto nell'estate 2003.

### Un tornado in miniatura

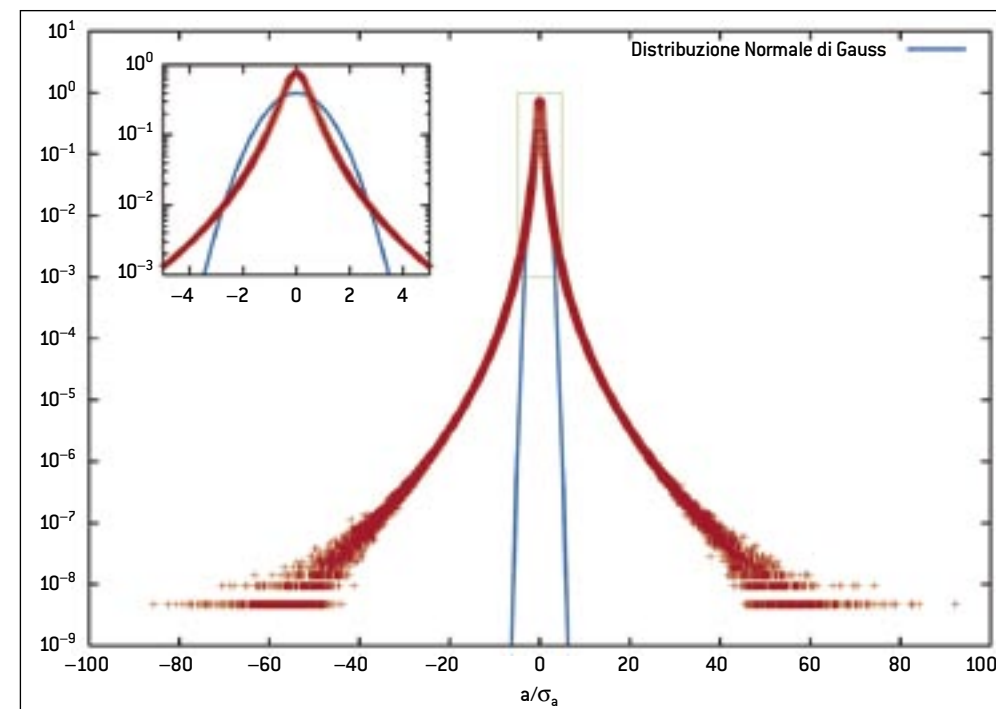
Le equazioni di Navier-Stokes per il moto turbolento sono state discretizzate su un reticolo cubico di 1024 punti per lato, per un totale di più di un miliardo di punti. Il fluido turbolento è stato riempito in modo uniforme con due milioni di particelle virtuali le cui traiettorie sono state registrate per poterle poi analizzare in dettaglio. Questa base di dati permetterà di studiare la dispersione in turbolenza con una risoluzione temporale

e una campionatura statistica mai raggiunte prima. Grazie alle simulazioni al computer appare evidente che, dietro il loro aspetto disordinato e apparentemente aleatorio, i flussi turbolenti nascondono configurazioni caratterizzate da un ordine insospettato. Già Leonardo da Vinci, peraltro, aveva osservato e fedelmente riprodotto nei suoi disegni la moltitudine di strutture organizzate presenti nei flussi turbolenti.

In alcune regioni del fluido, il moto è sincronizzato in modo da persistere per tempi relativamente lunghi, influenzando drasticamente il moto delle particelle. Tra queste strutture le più interessanti sono i filamenti di vorticità: si tratta di veri e propri cicloni in miniatura che catturano le particelle e

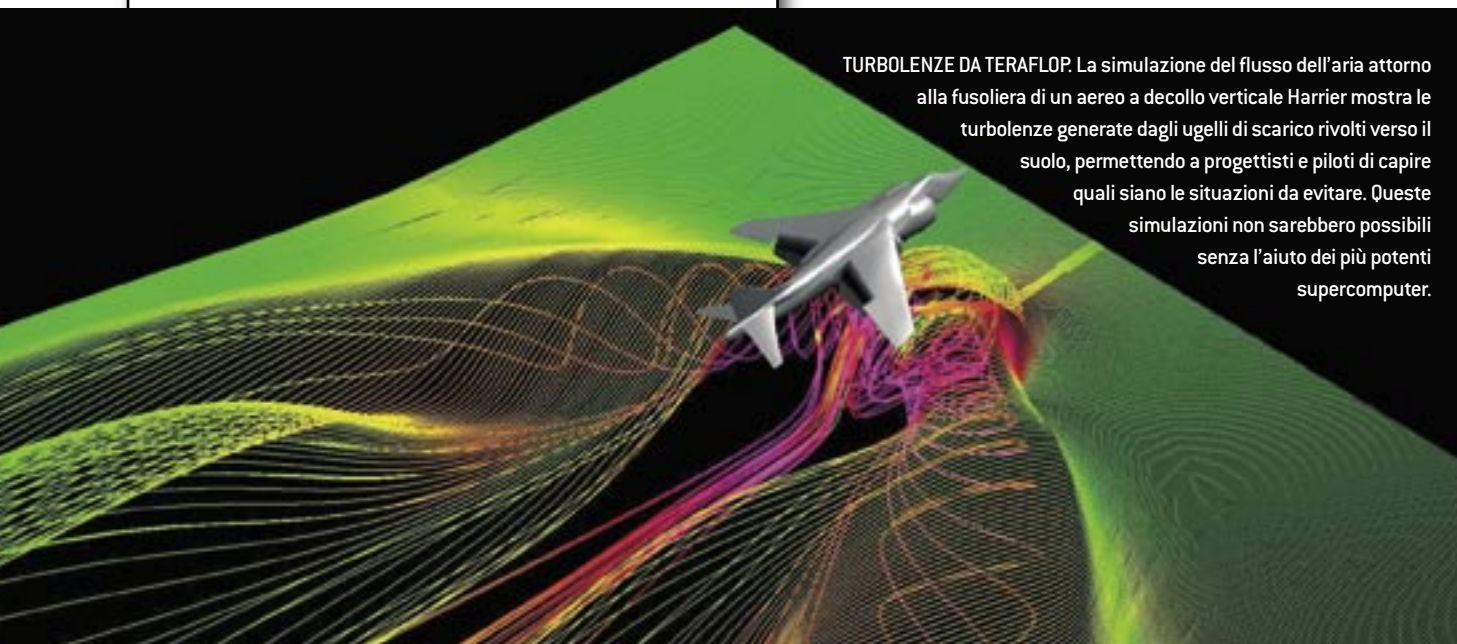
le fanno spiraleggiare diverse volte prima di espellerle (si veda la figura in alto). In questi avvistamenti l'accelerazione sperimentata dalla particella raggiunge valori estremi, fino a 80 volte maggiori del proprio valore caratteristico (si veda la figura qui sopra).

Per avere un'idea dell'intensità di questi eventi, consideriamo il moto dell'aria all'altezza di un metro da terra in una giornata



EVENTI IMPROBABILI. I simboli in rosso indicano il logaritmo della densità di probabilità dell'accelerazione del fluido turbolento, in unità della deviazione standard. Si noti la presenza di eventi fino a 80 deviazioni standard. Nel caso di una distribuzione normale di Gauss (in blu) questi eventi avrebbero una probabilità di manifestarsi notevolmente minore. Nel riquadro, un allargamento della regione vicino al picco della distribuzione di probabilità.





TURBOLENZE DA TERAFLUP. La simulazione del flusso dell'aria attorno alla fusoliera di un aereo a decollo verticale Harrier mostra le turbolenze generate dagli ugelli di scarico rivolti verso il suolo, permettendo a progettisti e piloti di capire quali siano le situazioni da evitare. Queste simulazioni non sarebbero possibili senza l'aiuto dei più potenti supercomputer.

MA SA/Spl/Grazia Neri

La simulazione numerica è ormai da tempo una terza via di indagine scientifica, accanto ai tradizionali metodi della ricerca teorica e sperimentale, tanto che si parla ormai di scienze computazionali. Il principale vantaggio della simulazione numerica è la sua versatilità, che consente di esplorare regimi di comportamento spesso inaccessibili alle teorie analitiche e difficilmente realizzabili per via sperimentale, oppure semplicemente troppo costosi, vuoi in termini economici, vuoi in termini temporali. Oggigiorno la ricerca scientifica, di base e applicata, in campi quali la meteorologia, la geofisica e la modellizzazione industriale, viene condotta con un forte supporto di simulazione numerica all'attività sperimentale. Questo motiva la progettazione e l'uso di strumenti di calcolo sempre più potenti, in grado di eseguire più attività contemporaneamente, in parallelo. La tecnologia architetturale dei supercalcolatori ha permesso di raggiungere il traguardo del teraflop (1000 miliardi di operazioni al secondo) nel 1998. Nella classifica dei 500 supercomputer più potenti, il primo posto è ancora occupato dal sistema NEC installato nel 2002 all'Earth Simulator Center di Yokohama, in Giappone, che raggiunge i 35 teraflop con 5120 processori. I primi sistemi italiani che compaiono nella lista Top 500 sono i due supercomputer CINECA, che si posizionano intorno al 60° posto, utilizzati per effettuare la simulazione descritta nel testo. Il CINECA è un consorzio tra 23 università italiane e CNR che ha come missione istituzionale quella di integrare ed estendere la disponibilità del calcolo ad alte prestazioni al servizio della ricerca. Tra gli obiettivi strategici vi è il supporto alla ricerca per le *grand challenge applications* derivanti da aree chiave come la scienza dei materiali, l'astrofisica, la biologia, la chimica computazionale e la fluidodinamica.

con il contributo di C. Cavazzoni, G. Erbacci e S. Succi

in cui soffia una leggera brezza a circa 20 chilometri orari. L'accelerazione centripeta dentro un microtornado può arrivare in questo caso fino 100 *g* (cento volte l'accelerazione di gravità). Per confronto, si pensi che una persona non può sopportare accelerazioni maggiori di 10 *g* per più di pochi secondi e valori intorno ai 100 *g* provocano certamente la morte istantanea.

Fortunatamente questi cicloni sono in scala molto ridotta, e per un essere umano è impossibile accorgersi della loro presenza senza ricorrere a strumenti appropriati. Per gli insetti invece sono eventi reali che condizionano pesantemente le loro capacità di volo. È per questo che quando c'è vento forte le zanzare preferiscono restare aggrappate a un filo d'erba piuttosto che volare...

Ma quali sono le forze responsabili di questi tornado in sedicesimo? L'analisi numerica mostra che i filamenti di vorticità sono regioni in cui la pressione è molto più bassa di quella dell'ambiente circostante. Le particelle che si affacciano incautamente sull'orlo di queste depressioni vengono spinte verso l'interno del vortice dalle particelle più esterne. Siccome per l'aria, l'acqua e molti altri fluidi in condizioni normali è impossibile comprimere più di tanto le particelle nello spazio, queste ultime cominciano a girare vertiginosamente intorno alla regione di bassa pressione seguendo le traiettorie spiraleggianti osservate nella figura in alto a p. XX.

### Disordine organizzato

Finora ci siamo concentrati sulle proprietà di una singola traiettoria di una particella del fluido, ma che cosa accade a due particelle inizialmente affiancate? A causa del moto disordinato del fluido la coppia tenderà a separarsi molto rapidamente. Nel 1926 Lewis Richardson suggerì che in media la distanza tra due particelle aumenta proporzionalmente al tempo trascorso dall'istante iniziale elevato alla potenza 3/2. Richardson stesso intuì che la presenza di una legge di scala con un esponente fraziona-



CONFIGURAZIONE ISTANTANEA DI UN GRUPPO DI TETRAEDRI definiti dalla presenza di quattro particelle nei vertici. Per studiare l'evoluzione temporale di strutture tridimensionali le particelle sono state introdotte al tempo iniziale in modo da formare piccoli tetraedri regolari. Durante l'evoluzione, le particelle si separano dando luogo a tetraedri di forme e dimensioni differenti. Si noti la presenza di tetraedri molto irregolari, risultato di correlazioni non banali tra le particelle che ne definiscono i vertici.

rio è intimamente legata alla natura geometrica della traiettoria, che in questo caso è una curva estremamente convoluta: nel linguaggio moderno, un frattale. La misura sperimentale della separazione tra due particelle presenta difficoltà ancora più serie di quelle incontrate nello studio delle traiettorie di una singola particella. L'analisi dei dati ottenuti dalle simulazioni ha invece permesso di confermare con grande accuratezza la validità della legge di Richardson.

E quando si considerano più di due particelle? In questo caso si manifesta un nuovo aspetto del problema della dispersione. Se consideriamo gruppi di tre particelle e le congiungiamo idealmente mediante linee rette otteniamo dei triangoli, mentre per quattro particelle avremo delle figure solide, tetraedri irregolari. Per quanto riguarda la taglia di queste figure geometriche, definita per esempio come la somma delle lunghezze degli spigoli, questa cresce in modo simile alla separazione tra due particelle. Ma la taglia non definisce in modo univoco la figura geometrica, in quanto è necessario specificare anche gli angoli tra i diversi spigoli.

Quale sarà la forma caratteristica di un tetraedro che evolve in un flusso turbolento? Se le quattro particelle che lo compongono si muovessero indipendentemente l'una dall'altra, non ci sarebbe una forma privilegiata, e ci sarebbe un egual numero di tetraedri di tutte le forme possibili. Ma il risultato delle simulazioni mostra che la realtà è differente. I tetraedri tendono a disporsi in strutture appiattite e piuttosto allungate, delle specie di «lasagne» irregolari (si veda la figura in alto). La presenza di queste forme tipiche denota l'esistenza di correlazioni tra le traiettorie, che ancora una volta ci confermano che al di là del disordine che caratterizza la turbolenza c'è un'organizzazione imposta dalle leggi del moto dei fluidi.

Quali sono i vantaggi che si possono trarre dallo studio della turbolenza lagrangiana con le simulazioni al computer? Dal punto di vista applicativo, per esempio, una conoscenza precisa delle proprietà statistiche del moto delle particelle permette di migliorare sensibilmente i modelli matematici usati per valutare la dispersione di inquinanti in atmosfera. Questi modelli sono largamente usati negli studi di impatto ambientale e in relazione allo stato della qualità dell'aria.

Per quello che riguarda gli aspetti più squisitamente teorici, il cambio di prospettiva che si ottiene osservando la turbolenza dal punto di vista lagrangiano è di cruciale importanza. Infatti, ci si aspetta che le grandezze misurate nelle immediate vicinanze da un osservatore «a cavallo» di una particella siano universali. Questo equivale a dire che esistono grandezze che non dipendono dal modo in cui la turbolenza è generata, per esempio tramite un getto d'acqua o da un ventilatore. La ricerca e la misura di queste osservabili rappresenta l'essenza della turbolenza vista come problema della fisica teorica.

### GLI AUTORI

LUCA BIFERALE, Dept. of Physics and INFN, University of Rome ` ` Tor Vergatà', Via Ricerca Scientifica 1, 00133 Roma, Italy,  
Prof. Guido Boffetta, Dept. of Physics and INFN, University of Torino, Via Pietro Giuria 1, 10125, Torino, Italy  
Dr. Antonio Celani. CNRS, INLN, 1361 Route des Lucioles, 06560 Valbonne France  
Dr.ssa Alessandra S. Lanotte, CNR-ISAC, Sezione di Lecce, Str. Prov. Lecce-Monteroni km.1200, 73100 Lecce, Italy  
Dr. Federico Toschi, CNR-IAC, Viale del Policlinico 137, 00161 Roma, Italy

### PER APPROFONDIRE

BIFERALE L., BOFFETTA G., CELANI A., LANOTTE A.S. e TOSCHI F., *Particle trapping in three dimensional fully developed turbulence*, in «Physics of Fluids», Vol. 17, p. 021701, 2005.  
LA PORTA A., VOTH G.A., CRAWFORD A.M., ALEXANDER J. e BODENSCHATZ E., *Fluid particle accelerations in fully developed turbulence*, in «Nature», Vol. 409, p. 1017, 2001.  
SAWFORD B., *Turbulent relative dispersion*, in «Annual Review of Fluid Mechanics», Vol. 33, p. 289, 2001.  
MORDANT N., METZ P., MICHEL O. e PINTON J.-P., *Measurement of Lagrangian velocity in fully developed turbulence*, «Physical Review Letters», Vol. 87, p. 214501, 2001.  
MONIN A.S. e YAGLOM A.M., *Statistical Fluid Mechanics, Vol. 2*, MIT Press, Cambridge (Massachusetts), 1975.