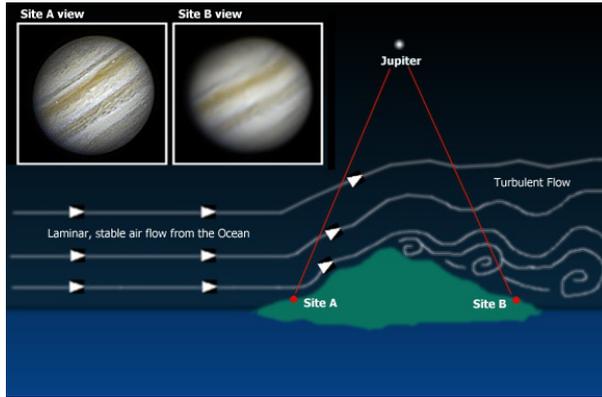


▼ Effetti della turbolenza su un'immagine; fonte *damianpeach.com*



turbolenza Comportamento dinamico di un fluido (liquido o gassoso) come conseguenza dello stato caotico dello stesso che origina la formazione di vortici disordinati e dall'andamento imprevedibile. Il fenomeno si manifesta quando l'energia cinetica che pone il fluido in movimento è particolarmente forte rispetto alla viscosità del fluido che oppone resistenza al moto. Lo studio della turbolenza, di competenza della fisica statistica, è proprio di discipline come l'oceanografia e la meteorologia ed è particolarmente studiato in nautica ed aeronautica per la formazione dei flussi attorno alle carene delle navi, alle eliche ed alle varie componenti (fusoliera, ali, ...) di un velivolo aereo. La turbolenza si manifesta nel primo tratto della troposfera, ad un'altezza variabile dal suolo dai 10 km ai 18 km: rispettivamente poli ed equatore. Le sue origini vanno ricercate nei venti, specie in quelli a carattere vorticoso originati dalla rotazione terrestre e dal riscaldamento solare nonché nell'attrito che essi producono a contatto con la superficie terrestre, nella morfologia del territorio, nella disomogeneità della temperatura terra-mare, ed in una notevole ulteriore quantità di dettagli impossibili a prevedere complessivamente a priori; per quanto la teoria sta stata molto sviluppata nel secolo scorso in considerazione delle sue pratiche applicazioni (nautica ed aeronautica) è impossibile uno studio del fenomeno che non di tipo matematico-statistico. Conseguenza della turbolenza è lo svilupparsi di tutta una serie di azioni meccaniche, correnti convettive, gradienti termici che rendono l'atmosfera non stabile, ma continuamente in moto (minore o maggiore) secondo gli impulsi che a ciascuna azione, corrente, ... è stata imposta.

In astronomia lo studio degli effetti prodotti dalla turbolenza rileva per l'influenza negativa che determina sulla qualità delle immagini causando fluttuazioni di temperatura che alterano l'indice di rifrazione dell'atmosfera, perturbando il fronte d'onda dell'oggetto osservato; l'immagine anziché essere nitida si distribuisce su un'ampia regione dando luogo ad una funzione detta di *sparpagliamento dei punti*, in inglese «PSF». A questi problemi si pone rimedio attraverso tecniche meccaniche che consentono microdefomazioni delle superfici ottiche (→ ottica adattiva ed ottica attiva) supportate da finalizzati algoritmi software: vedi anche seeing.

Nel disegno riprodotto in questa pagina è mostrato come uno stesso oggetto possa produrre immagini di buona o cattiva qualità a seconda che l'osservatore sia localizzato in un sito affetto da turbolenza o meno. Il telescopio posto in A riceve un flusso d'aria laminare, che segue cioè traiettorie ordinate e coerenti, ed avrà pertanto un'immagine planetaria migliore di quello posto in B che vedrà il proprio percorso ottico disturbato da moti vorticosi e caotici.

Di conseguenza il fenomeno prende in considerazione principal-

mente due flussi: quello laminare e quello turbolento.

Il flusso laminare è caratterizzato da basse velocità, le parti in sospensione presentano un andamento relativamente ordinato: il nome deriva dal fatto che si assume in via teorica che le particelle si muovono come se fossero su lamine parallele interagendo pochissimo fra loro. Il flusso turbolento si manifesta invece quando la velocità delle particelle è elevata e le interazioni sono dovute anche ad urti casuali fra le stesse; le forze viscosive sono maggiori in quanto originate anche dagli scambi di moto.

- *Cenni sulla teoria della turbolenza.* La teoria dei flussi fu elaborata nel 1883 da O. Reynolds formulando un numero (1) in grado di distinguere con buona approssimazione le caratteristiche di un fluido distinguendolo nelle sua proprietà fondamentali: laminare o turbolento.

Detta ρ la densità del fluido (liquido o gassoso), V il modulo della velocità relativa del fluido rispetto ad un corpo solido, L la caratteristica dimensionale del sistema, ossia una dimensione lineare come il diametro di un condotto, μ la viscosità cinematica del fluido, il numero è espresso da

$$R_e(L_0) = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (1)$$

ovvero, data la viscosità cinematica (ν) per

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

si può anche scrivere

$$R_e(L_0) = \frac{\rho VL}{\nu} \quad (3)$$

cioè: (*densità × velocità × lunghezza*) / *viscosità cinematica*; quindi ancora: forze d'inerzia in rapporto a forze di viscosità. I valori si considerano $\nu \approx 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ per l'aria, $L_0 > 15 \text{ m}$ e $\nu_{L_0} > 1 \text{ m/s}$ per l'atmosfera; il regime turbolento si ha quindi in condizione di $R_e(L_0) > 10^6$. Il flusso è laminare per valori $R_e \leq 2000$; di transizione per valori $2000R_e \leq 4000$; turbolento infine per valori $R_e \geq 4000$.

Il valore che distingue un regime laminare da uno turbolento (numero di Reynolds critico) è in dipendenza della forma del corpo attraversata dal fluido e dall'orientamento del corpo rispetto al flusso, per cui il numero presenta valori diversi a seconda della superficie esterna attraversata per transizione laminare o turbolenta. Questo deriva dalla circostanza che le esperienze di Reynolds furono relative soprattutto al comportamento dei liquidi osservando i regimi di turbolenza di questi dentro condotti. Il numero di Reynolds è adimensionale essendo stato ideato su leggi di scala, ossia fluidi diversi, a parità di numero, presentano medesimo comportamento dinamico.

Considerando la precipua composizione di un modo turbolento composto di un flusso principale al quale si aggiungono flussi (fluttuazioni) di andamento e complessità talmente irregolare da non poter essere soggetti ad alcun trattamento matematico, il russo A. N. Kolmogorov operò un approccio statistico-fisico al fenomeno ideando nuove scale e suggerendo che per valori elevati del numero di Reynolds l'energia dissipata rappresenta una frazione trascurabile rispetto a quella che alimenta le perturbazioni delle velocità ed è pertanto integralmente trasferita alle scale più piccole: la transizione tra scale diverse è imputabile ai processi che regolano il moto di un fluido. L'approccio seguiva di qualche anno gli studi di G. Taylor che aveva proposto un modello di turbolenza ideale (omogenea ed isotropa).

La teoria considera il campo delle velocità fluttuanti come costituito da vortici non omogenei che introducono energia ed alimentano la turbolenza; questi a loro volta generano vortici

di dimensioni minori e poi ancora minori e così continuando finché l'energia non è completamente dissipata.

Il fenomeno è noto come *cascata di energia*, significando che l'energia cinetica propria delle scale più grandi alimenta in continuo vortici sempre minori senza trasformarsi subito in energia termica. Infine, quando i vortici avranno raggiunto dimensioni piccolissime, avrà luogo il processo di dissipazione d'energia e la conseguente trasformazione in calore.

Nella sua elaborazione matematica Kolmogorov [2] individuò tre parametri (tre scale). Richiamata la (2) e posto ε come tasso di dissipazione d'energia, si ha

$$\lambda_K = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ diametro medio del vortice, scala della lunghezza} \quad (4a)$$

$$v_K = \left(v \varepsilon \right)^{\frac{1}{4}} \text{ velocità tangenziale media, scala della velocità} \quad (4b)$$

$$\tau_K = \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{\frac{1}{2}} \text{ tempo medio di vita, scala del tempo} \quad (4c)$$

In conseguenza delle equazioni di Kolmogorov al crescere del valore di dissipazione energetica (ε) le dimensioni dell'ultimo vortice della catena decrescono, nel vortice più piccolo aumenta la velocità di rotazione e si riduce di pari passo la sua vita.

Quello che rileva in questo caso, al fine della caratterizzazione del flusso: laminare o turbolento, è l'intensità e la capacità della perturbazione di generare vortici di minuscola entità lontani dal fronte della perturbazione stessa, quindi in sostanza quella che si chiama scala spaziale. Se questa presenta un valore inferiore ad λ_K il vortice non si forma ed il regime del flusso è laminare. A cavallo degli anni sessanta e settanta del secolo scorso si sono avuti nel campo ulteriori significativi progressi, ottenuti però non con misure quantitative bensì ricorrendo, come aveva fatto un secolo prima Reynolds, ad osservazioni qualitative del comportamento dei fluidi; successivamente con l'avvento di calcolatori di adeguata potenza fu introdotta la DNS (*Direct Numerical Simulation*) finalizzata a risolvere le equazioni di N. Stokes.

L'influenza della turbolenza sulla cupola di un osservatorio è discussa alle voci citate in bibliografia: [3] e [1].

Bibliografia

- [1] S. HAGELIN, E. MASCIARDI, *et al.* “Comparison of the atmosphere above the South Pole, Dome C and Dome A; first attempt”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 387, (2008), pp. 1499–1510. SAO/NASA Astrophysical Data System.
- [2] ANDREJ N. KOLMOGOROV. “The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds’ numbers”. In: *Doklady Akademii Nauk*, vol. 30, (1941), pp. 301–305.
http://www.astro.puc.cl/~rparra/tools/PAPERS/kolmogorov_1951.pdf.
- [3] F. LASCAUX, E. MASCIARDI, *et al.* “Mesoscale optical turbulence simulations at Dome C”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 398, (2009), pp. 1093–1104. SAO/NASA Astrophysical Data System.

