

MISURE E DATI PER COMPRENDERE I FENOMENI

IL CONCETTO DI MISURA SI È PIÙ VOLTE EVOLUTO. OGGI, CIÒ CHE QUANTIFICHIAMO ATTRAVERSO UN NUMERO È IL RISULTATO DI UN PROCEDIMENTO CHE COMPRENDE ASPETTI DI MERA “MISURAZIONE IN CAMPO”, DI MODELLISTICA COMPUTAZIONALE E INTERPRETAZIONE FISICA. UN LAVORO COMPLESSO PER IL QUALE SERVONO SCIENZA, RETE E ORGANIZZAZIONE.

I numeri reali non esistono. Un'affermazione come questa potrebbe sembrare un paradosso, ma i numeri reali sono reali solo nella nostra mente in quanto una misura di un numero reale richiederebbe una quantità di informazione infinita (non a caso ci è stato insegnato che un numero reale ha infinite cifre dopo la virgola).

Pier Simon Laplace, che operò tra la fine del XVIII e il XIX secolo, riteneva che fosse possibile prevedere il futuro dell'universo se un 'intelletto' superiore (noto come *demone di Laplace*) avesse concepito le equazioni del moto derivanti dalle forze fondamentali della natura e fosse stata nota la condizione iniziale delle posizioni e dei momenti di tutte le particelle (ovviamente Laplace non poteva conoscere il “Principio di indeterminazione della meccanica quantistica”).

Anche nell'ambito della meccanica classica, il sogno deterministico di Laplace si infranse su una serie di difficoltà sia teoriche che pratiche. La prima è appunto che le condizioni iniziali sono espresse da numeri reali la cui conoscenza presuppone una capacità infinita di memoria. La seconda è legata al concetto di *misura* che, nella sua accezione fisica, è il risultato di un'osservazione di un fenomeno naturale. Il termine *fenomeno* deriva dal participio sostantivato del verbo greco φαίνωμαι (mostrarsi, apparire) e fa riferimento a tutto ciò che è osservabile tramite un apparato che ne riveli la presenza o ne permetta la descrizione. In fisica classica, un *osservabile* è una quantità, o grandezza, *misurabile*, sia essa diretta (tramite uno strumento) o indiretta (attraverso calcolo analitico).

Nel corso dei secoli, il concetto di misura si è più volte evoluto. Con la scoperta dell'elettromagnetismo, si è iniziato ad associare una misura anche a grandezze non direttamente osservabili (campi

e potenziali), ma che risultano essere strumentali per la stima di altre osservabili.

Nel XX secolo, con l'avvento della Teoria Quantistica la misura diventa un concetto probabilistico: l'unico modo per conoscere il comportamento di un osservabile è attraverso una misura, la quale però perturba in maniera irreversibile lo stato dell'osservabile stesso rendendone impossibile la ricostruzione pre misura (paradosso del gatto di Schrödinger; Trimmer, 1980). Pertanto

lo stato premisura, e quindi reale, dell'osservabile è descrivibile solamente da una distribuzione di probabilità che fornisce informazioni sulla misura stessa. La teoria quantistica, tramite l'equazione di Schrödinger, nega la possibilità che un osservabile possa essere descritto da un unico valore numerico (e relativa unità di misura). Pertanto ogni misura sarà soggetta a incertezza. Nell'ambito delle misurazioni dirette, l'incertezza è conseguenza della precisione e accuratezza con cui lo strumento compie

FIG. 1
MOBILITÀ URBAN

Distribuzione della durata dei viaggi veicolari normalizzata sul tempo medio di viaggio in varie città italiane (Database Octotelematics maggio 2011). La scala semilogaritmica suggerisce la validità di una Legge di Boltzmann per le varie città con $\langle t \rangle$ come 'energia'.

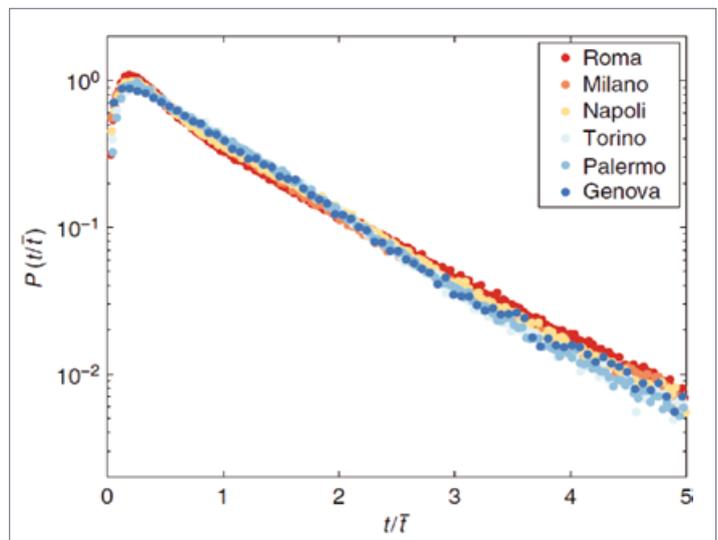


FIG. 2
TRAFFICO E VEICOLI

Diagramma fondamentale per il flusso di traffico e il numero di veicoli equipaggiati circolanti per la rete stradale di Bologna (Database Octotelematics maggio 2011). Si nota l'esistenza di due regimi con velocità medie macroscopiche diverse: un regime a basso traffico con velocità media più alta e un regime trafficato dove la velocità media si abbassa del 30%.

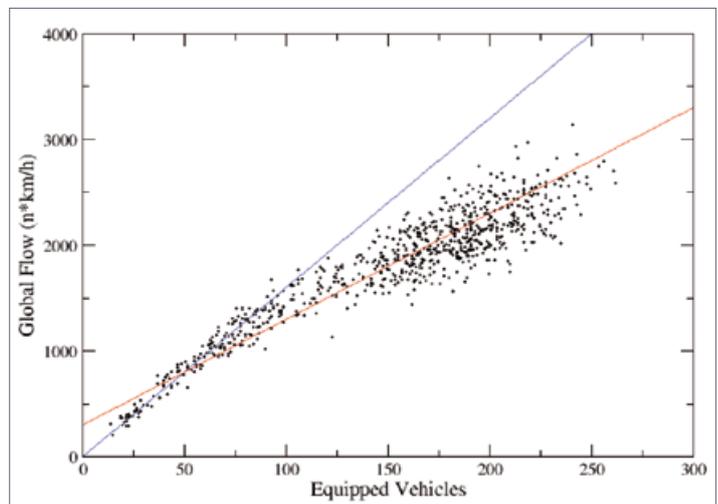
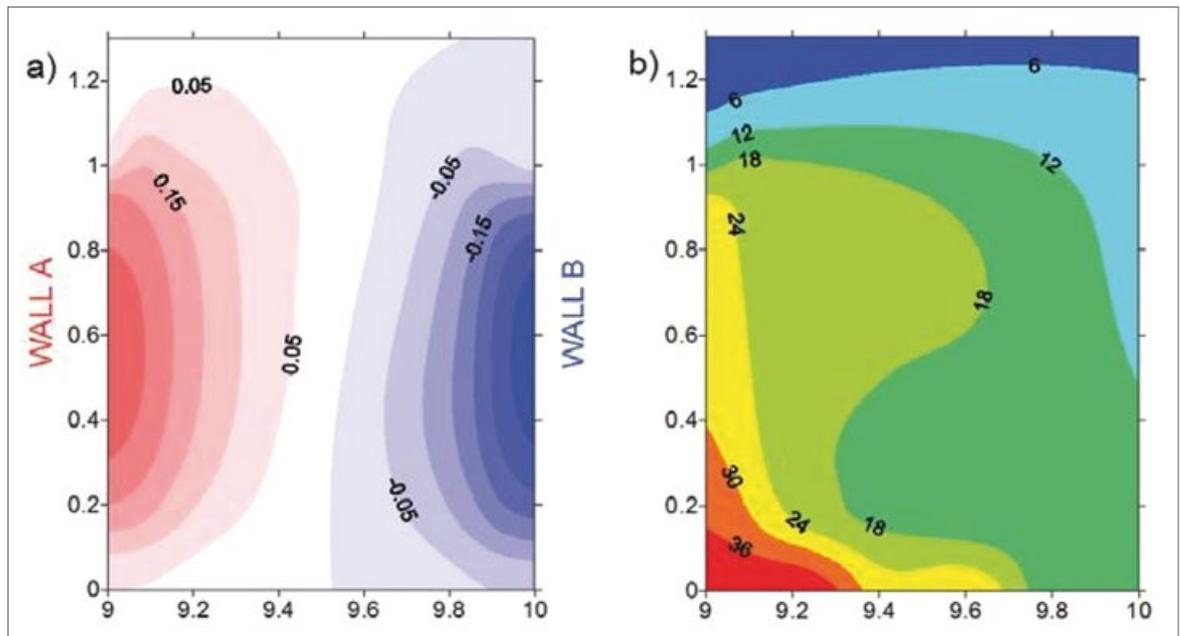


FIG. 3
VORTICI

a) Sezione verticale della velocità media del vento fornita in modo adimensionale ovvero come frazione della velocità del vento al di sopra del canyon e corrispondente
b) concentrazione media adimensionale (+) ovvero resa adimensionale rispetto a un valore di background in un canyon urbano (vista frontale). La variabile dinamica (il vento) evidenzia la struttura vorticoso del moto e forza la distribuzione della concentrazione finale



Fonte: Salim et al., 2011.

la misura, mentre per quelle indirette è determinata dalla propagazione di tali errori (Taylor, 1999). La previsione dell'evoluzione futura di un fenomeno dipende dalla definizione di un modello (una semplificazione della realtà, ma non troppo) espresso da equazioni matematiche. Tuttavia a causa dei comportamenti caotici nella dinamica, un errore nella determinazione delle condizioni iniziali del sistema cresce in modo esponenziale. Quindi la precisione finita delle misure e dell'integrazione numerica dei modelli matematici, limita fortemente *a priori* la nostra capacità di previsione. Eppure noi attribuiamo una realtà oggettiva a una misura, in quanto numero, e abbiamo una grande fiducia nella fisica e nelle sue teorie per descrivere la realtà. Il successo della fisica e delle sue teorie è però strettamente connesso con la sua natura riduzionistica che ha permesso di sviluppare sia il concetto di esperimento galileiano (ovvero di un esperimento riproducibile) che il concetto di modello, attraverso il linguaggio rigoroso della matematica.

La situazione cambia nel momento in cui la fisica comincia a interessarsi ai sistemi complessi, a partire dai sistemi a molti gradi di libertà, ai sistemi biologici e cognitivi. In tali sistemi la natura delle componenti elementari diventa meno rilevante rispetto alla complessità delle interazioni tra le componenti stesse; il concetto di riduzionismo non si applica in quanto le interazioni collettive fanno sì che il sistema non sia la somma delle sue componenti e non si possa concepire un esperimento galileiano, in quanto

la complessità rende non riproducibili le condizioni in cui è stata fatta l'osservazione di un fenomeno. Siamo di fronte a un cambio di prospettiva che richiede nuove procedure sperimentali che diano un diverso significato al concetto di misura, e nuove tipologie di modelli in grado di esplicitare le proprietà emergenti dei sistemi complessi. Lo scopo è quello di riuscire a caratterizzare lo stato dinamico di un sistema complesso attraverso l'osservazione di un campione significativo dei suoi componenti microscopici studiandone i comportamenti statistici, facendo emergere strutture spazio-temporali nei dati, e proponendo delle classi generiche di modelli per la dinamica microscopica (Holovatch, 2017).

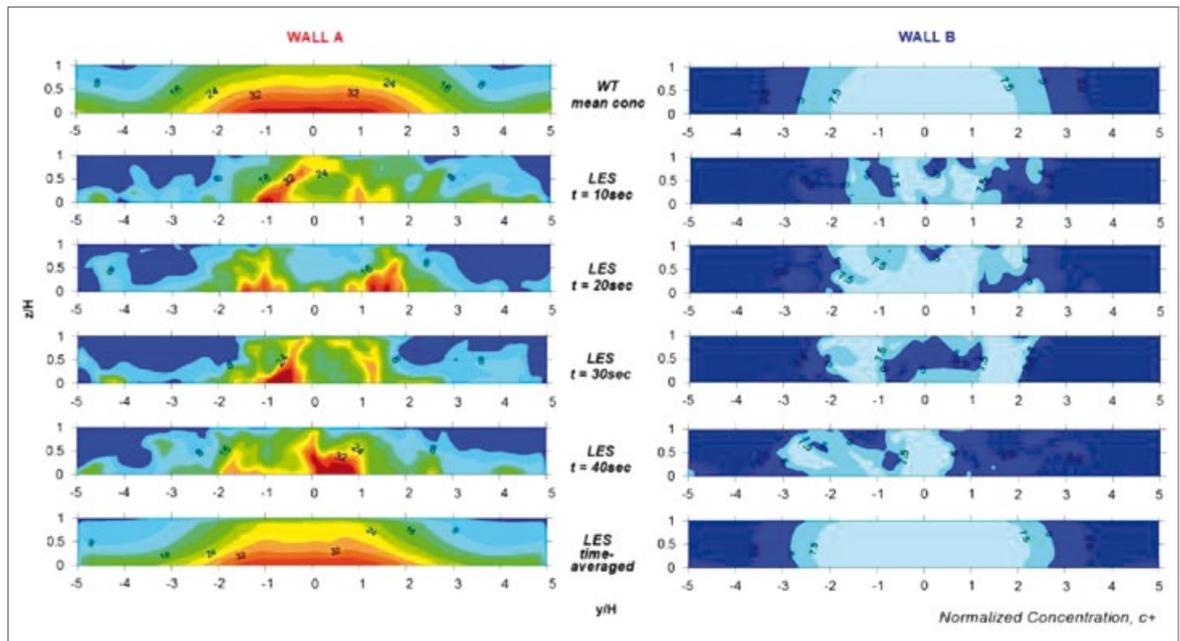
Questo approccio va sotto il nome di *Big Data Science Computation* e rappresenta un cambio di prospettiva anche per il metodo scientifico fisico. La ricerca non si focalizza più nella costruzione di un esperimento galileiano che fornisca una misura quanto più precisa possibile di quantità che possano confutare o validare ipotesi teoriche, bensì nella raccolta di tutti i dati possibili sull'intero sistema osservato e nella ricerca di leggi statistiche o comportamenti universali che possano essere messe in relazione con un'intera classe di modelli (non quindi un solo modello teorico di riferimento) per la dinamica delle componenti elementari. Tali modelli non cercano delle equazioni fondamentali, ma solo di mettere in luce i *parametri di controllo* per l'evoluzione macroscopica del sistema attraverso l'introduzione di ipotesi ad hoc e di termini *stocastici* per introdurre l'effetto dei gradi di libertà nascosti

che riproducano in modo efficace le interazioni microscopiche. Un esempio di applicazione di tecniche sofisticate per l'analisi dati fondata sulla *Teoria dei Network* (Newman, 2010) e sulla *meccanica statistica del non equilibrio* è rappresentato dallo studio del traffico urbano attraverso la raccolta di dati Gps da sensori mobili distribuiti su circa il 3% dei veicoli circolanti. Tali dati consentono di ricostruire delle leggi statistiche sulla mobilità urbana (figura 1) che evidenziano come il tempo di mobilità giochi il ruolo di funzione energia per la mobilità veicolare, il diverso uso della rete stradale urbana e l'effetto globale delle congestioni locali sullo stato di mobilità della rete (figura 2) (Gallotti, 2016). Queste tecniche emergenti integrate con quelle esistenti potranno fornire un nuovo modo per stimare il contributo delle emissioni e quindi alle concentrazioni associate al traffico veicolare. D'altra parte l'assenza di riduzionismo bene si applica alle scienze atmosferiche, i cui fenomeni risultano caotici, mutuamente interagenti su scale spazio-temporali differenti. Basti pensare al trasporto a cascata di energia dalle grandi alle piccole scale, che vincola tramite un legame di causa-effetto il comportamento di ogni moto a quello della sua forzante a scala maggiore. Un esempio è la turbolenza, che descrive il moto caotico delle particelle atmosferiche, stimolato dal moto medio a esse sovrapposto. La caoticità del sistema rende necessario un approccio statistico che privilegi la comprensione della dinamica d'insieme a discapito della singola particella, forzato da alcune ipotesi (es. *ipotesi di turbolenza congelata*, Taylor (1938) che permettano, almeno a

FIG. 4
INQUINANTE IN
CANYON URBANO

Sezione verticale della concentrazione di un inquinante adimensionale (c^+), ovvero resa adimensionale rispetto a un valore di background in un canyon urbano (vista longitudinale) sul lato sopra vento rispetto alla direzione del vento (WALL A) e sul lato sottovento rispetto alla direzione del vento (WALL B). I

Fonte: Salim et al., 2011.



breve termine, una linearizzazione nello spazio-tempo. In questo modo è possibile descrivere i moti turbolenti tramite strutture medie (vortici, figura 3) le cui grandezze caratteristiche scalano con i moti medi che li generano. Un ulteriore esempio che rivela la natura stocastica contenuta nelle misure di concentrazione di un inquinante in un canyon urbano è rappresentato in figura 4. Si nota come il valore di una concentrazione come quello tipicamente misurato sia il risultato di un modello interpretativo che condensa il significato di sistema complesso e mette insieme l'errore strumentale.

Le strutture vorticoso che compaiono nella figura 4 mostrano che il valor medio è risultato dell'effetto di interazioni a scale più piccole, che quindi ne influenzano il valore finale (il valor medio della concentrazione è il risultato di tante strutture fini vorticoso ottenute tramite modellistica – LES: *large eddy simulations* – che contribuiscono al valore finale della concentrazione come misurato ad esempio in laboratorio – WT: wind tunnel).

In sintesi, ciò che misuriamo, ciò che quantifichiamo attraverso un numero e quindi anche l'interpretazione che ne viene data, è il risultato di un procedimento complesso che comprende sia aspetti di mera "misurazione in campo", che di modellistica computazionale e interpretazione fisica che, come sopra descritto, si è evoluta nei secoli e oggi potrà garantire nuovi sviluppi applicativi.

Silvana Di Sabatino, Francesco Barbano, Armando Bazzani

Università di Bologna



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Gallotti R, A Bazzani, S Rambaldi, M Barthelemy, (2016) *A stochastic model of randomly accelerated walkers for human mobility*. Nature Communications, Volume 7, Article number: 12600
- Holovatch Y., R Kenna, S. Thurner (2017) *Complex systems: physics beyond physics European Journal of Physics*, Volume 38, Number 2
- Newman, M (2010) *Networks: An Introduction Oxford University Press*
- Salim, S. M., Buccolieri, R., Chan, A., Di Sabatino, S. (2011). *Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon: Comparison between RANS and LES*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Volume 99, Pages 103-113.
- Taylor, G. I. (1938). *The spectrum of turbulence*. In "Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences" (Vol. 164, No. 919, pp. 476-490). The Royal Society. Volume 99, Issue 2-3, February-March 2011, Pages 103-113
- Taylor, J. R. (1999). *Introduzione all'Analisi degli Errori: lo studio delle incertezze nelle misure fisiche*, Zanichelli.
- Trimmer, J. D. (1980). *The present situation in quantum mechanics: A translation of Schrödinger's "Cat Paradox" paper*. "Proceedings of the American Philosophical Society", 323-338.