

GIORGIO PARISI PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2021

di Giovanni Cicuta*

L'Accademia Reale Svedese delle Scienze ha assegnato il Premio Nobel per la fisica 2021 «for groundbreaking contributions to our understanding of complex physical systems». Una metà è stata assegnata congiuntamente a Syukuro Manabe, fisico giapponese naturalizzato statunitense, e Klaus Hasselmann, climatologo, fisico e meteorologo tedesco, «for the physical modelling of Earth's climate, quantifying variability and reliably predicting global warming» e l'altra metà al fisico italiano Giorgio Parisi «for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales». In questo articolo l'autore tratteggia la vita scientifica di Parisi, variegata e complessa, che lo ha visto anticipatore e protagonista dei profondi mutamenti dei paradigmi nell'ambito della fisica contemporanea.



* già Ricercatore INFN e Professore di Fisica Teorica.

All'inizio di novembre 2021, il comitato per il premio Nobel 2021 ha assegnato metà del premio a Giorgio Parisi per le sue scoperte sull'interazione tra disordine e fluttuazioni nei sistemi fisici dalla scala microscopica alla scala macroscopica. L'altra metà del premio è stata assegnata a Syukuro Manabe e Klaus Hasselmann per la loro modellizzazione del clima terrestre. Il premio a Giorgio Parisi ha suscitato vasti consensi in Italia e all'estero. In Italia ha anche alimentato la speranza di una maggiore attenzione ai problemi della scuola, dell'università e della ricerca scientifica, da parte della società e del parlamento.

Questa nota si concentra sui contributi scientifici di Giorgio Parisi. I contributi importanti sono molti, in un vasto arco di tempo, su argomenti molto diversi. È utile richiamare molto brevemente l'evoluzione di due fenomeni che hanno influito sulla scienza nella seconda metà del secolo scorso in tutto il mondo: l'evoluzione di *Big Science* e la dialettica fra riduzionismo e sistemi complessi. Infatti la vita scientifica di Giorgio Parisi è stata influenzata e a sua volta influenzò questi mutamenti del mondo scientifico.

Da Big Science a Big Data. Il riduzionismo in fisica e i sistemi complessi.

A metà del Novecento la fisica nucleare godeva di un prestigio assoluto. L'impressionante potenza per uso bellico e le grandi promesse di produzione di energia, di applicazioni in medicina e in agricoltura hanno convinto i governi di tutto il mondo a riservare a questa disciplina risorse molto grandi. Sull'esempio di *Oak Ridge*, *Los Alamos* e del *Radiation Laboratory* del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), sorsero il *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire* (CERN), di Ginevra, e molti laboratori di acceleratori nel mondo.



Giorgio Parisi

Klaus Hasselman

Syukuro Manabe

Questo nuovo stile di ricerca scientifica, caratterizzato da grandi strumenti, sostenuto da ingenti finanziamenti nazionali o internazionali, condotto da molte centinaia di ricercatori, fu chiamato *Big Science*.

Nelle università italiane, dal 1960 al 1980, moltissimi fra i giovani più brillanti sceglievano la fisica delle alte energie, sperimentale o teorica, per laurearsi e iniziare la loro carriera accademica. La teoria che interpretava la fisica subnucleare era la teoria quantistica dei campi; dal 1970 a oggi questo è il linguaggio comune ai fisici teorici delle alte energie. Lo stato italiano, analogamente ad altri stati europei, creò enti appositi per lo sviluppo dei reattori nucleari e l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) per la ricerca di frontiera nella fisica nucleare e sub-nucleare.

Giorgio Parisi si laureò a Roma nel 1970 con Nicola Cabibbo (1935-2010). Nel decennio successivo fu ricercatore dell'INFN; da subito era stato riconosciuto e stimato come molto brillante. In quel decennio Parisi fu autore di oltre sessanta lavori, prevalentemente nella teoria quantistica dei campi chiamata cromodinamica quantistica. Fra questi, è molto noto il lavoro del 1977 con Guido Altarelli (1941-2015), dove sono presentate equazioni integro-differenziali che determinano la variazione della densità di probabilità di un partone (quark o gluone) al variare della scala di energia, equazioni rimaste uno strumento teorico ancora utilizzato. Nel 1970 Kurt Symanzik (1923-1983) aveva mostrato che le teorie di campo quantistiche erano anche modelli di meccanica statistica classica di equilibrio. In pochi anni, centinaia di fisici teorici delle alte energie in tutto il mondo scoprirono di avere gli strumenti teorici per la dettagliata descrizione (gli esponenti critici) di transizioni di fase in sistemi magnetici e fluidi di varie densità. Parisi partecipò da protagonista all'uso di tutte le tecniche note della teoria quantistica dei campi, allo studio di modelli di meccanica statistica e, inversamente, ai suggerimenti di quest'ultima al possibile comportamento non-perturbativo della teoria di campo.

All'inizio degli anni Ottanta, Parisi iniziò, in parallelo, due serie di lavori che ebbero una grande influenza nei decenni successivi. Incuriosito dall'effetto che il disordine poteva provocare nelle transizioni di fase di sistemi magnetici, iniziò uno studio su sistemi magnetici disordinati, chiamati «vetri di spin». Per alcuni anni da solo, poi dal 1979 al 1984 con Marc Mezard e Miguel Virasoro, pervenne a una soluzione del modello di campo medio di questi sistemi, con aspetti termodinamici inattesi. Questi lavori e la innovativa tecnica usata, detta rottura di simmetria delle repliche, furono studiati da centinaia di ricercatori nei decenni successivi. A Parisi vennero conferiti importanti premi scientifici, Premio Feltrinelli 1986, Medaglia Boltzmann 1992, Premio Italgas 1993; le motivazioni di questi premi fanno principalmente riferimento a questi lavori.

Un secondo filone di lavori, apparentemente di argomento molto diverso, inizia negli anni 1981-82 con Herbert Hamber, Vincenzo Marinari e Claudio Rebbi. Sono i primi calcoli numerici di masse di nucleoni e mesoni, in cromodinamica quantistica, avendo discretizzato lo spazio-tempo e sono lavori pionieristici che suscitano un grande interesse: non si ritenevano possibili calcoli di quella complessità con i computer esistenti. Negli USA ci furono critiche a quei lavori, perché la limitatezza della potenza di calcolo non forniva affidabilità; immediatamente in tutto il mondo si cercò di replicare quei calcoli con calcolatori più potenti. Iniziava un filone di ricerca che venne chiamato *Lattice Gauge Theory*.

Nelle tappe più importanti che segnarono i progressi delle simulazioni numeriche, il gruppo guidato da Parisi fu protagonista.

Nel 1984, un gruppo di fisici che includeva Parisi, sotto la direzione di Cabibbo, progettò un calcolatore dedicato a questi calcoli. Nel 1989 erano stati costruiti nelle sedi di Roma e Pisa dell'INFN i primi supercomputer APE100; seguirono APE1000 e APENEXT.

Ora i risultati molto complessi delle simulazioni competono, in attendibilità, con le valutazioni sperimentali delle corrispondenti grandezze fisiche. In entrambi questi filoni di ricerca di grande successo, Parisi inizia quasi da solo con lavori abilissimi e audaci e coinvolge nel tempo decine di collaboratori.

Un cambio di paradigma

Parisi partecipa da protagonista al mutare della ricerca scientifica in fisica, che si sposta dalla visione riduzionistica all'attenzione ai sistemi complessi. Dalla metà degli anni Settanta il «modello standard» descrive le proprietà delle particelle elementari come conseguenza di campi costituenti. Questo tipo di scienza, detto riduzionismo, in fisica consiste nel ridurre il mondo dei fenomeni fisici a un insieme finito di equazioni. Sono note affermazioni estreme di riduzionismo; Erwin Schrödinger (1887-1961) e Paul Dirac (1902-1984) verso il 1927 affermarono che il completamento della meccanica quantistica era «un trionfo del riduzionismo. Grandi complessità della chimica e della fisica erano ridotte a due linee di simboli algebrici». Simile atteggiamento estremo, più recente, è stato espresso dalla convinzione che il progetto di sequenziamento del genoma umano avrebbe portato alla completa comprensione dell'uomo. Steven Weinberg (1933-2021), ammirato da tutti i fisici teorici per la sua produzione scientifica, sosteneva che un fisico non può non essere riduzionista.

Gli ultimi decenni hanno visto crescere un diverso atteggiamento (non necessariamente alternativo), con l'attenzione ai sistemi complessi e pure qui Parisi è un protagonista. In questi decenni la *Big Science* si è estesa al campo biomedicale, biologico e alla costruzione di grandi telescopi.

Lo sviluppo dell'elettronica ha portato alla disponibilità di computer con la capacità di gestire enormi quantità di dati. La più recente *Big Science* è decentralizzata in vari siti di ricerca coordinati sullo stesso progetto.

Nel 1984 Murray Gell-Mann (1929-2019) e Philip Anderson (1923-2020) fondano a Santa Fé l'istituto per i sistemi complessi, con la missione di capire e unificare aspetti condivisi in mondi fisici, biologici, sociali, culturali, tecnologici e, forse, persino astrobiologici. In un sistema complesso molti agenti interagiscono e si adattano, come nel sistema nervoso, la rete internet, gli ecosistemi, le economie, le città e le civiltà. Sembra il comando di Schrödinger: «Il compito non è di vedere quello che nessun altro ha visto, ma di pensare quello che nessun altro ha pensato riguardo a quello che ognuno ha visto.»

Parisi applica il «metodo delle repliche» che aveva usato nel 1979-80 per la soluzione di equilibrio dei sistemi magnetici disordinati, i «vetri di spin», successivamente generalizzato a recenti sviluppi della intelligenza artificiale, alla ottimizzazione combinatoria, dove porta a un nuovo approccio alla complessità computazionale. Più recenti sono gli studi di modelli per il sistema immunitario e quelli per il volo degli stormi di uccelli.

Altri prestigiosi premi vengono assegnati a Parisi fra cui la medaglia Dirac dell'*International Centre for Theoretical Physics* (ICTP) nel 1999, il premio Fermi nel 2002 della Società Italiana di Fisica (SIF), la medaglia Max Planck nel 2010, il premio Lars Onsager nel 2016, il premio Wolf per la fisica e il premio Nobel per la fisica nel 2021. Le motivazioni di questi premi fanno riferimento alle applicazioni del suo metodo a una varietà di sistemi complessi.



Fin dai lavori in teoria di campo quantistica, Parisi aveva sviluppato grande competenza nello studio di equazioni differenziali stocastiche. Nel 1986, insieme a Mehran Kardar e Yi-Cheng Zhang, propose una equazione differenziale non-lineare stocastica, che prese il nome di equazione KPZ. Essa descrive la crescita di una superficie, quale il fronte di un incendio di un bosco (omogeneo) o la superficie di un cristallo immerso in un liquido. L'equazione prevedeva che durante la crescita, la superficie diventasse più ruvida di quanto previsto dalla precedente equazione lineare stocastica di Edwards e Wilkinson (1982).

Negli anni successivi fu mostrato che l'equazione KPZ è adatta a descrivere molti modelli di crescita superficiale¹.

Anche in questo caso, l'intuizione fisica aveva aggirato i problemi matematici: l'equazione KPZ è una equazione differenziale, dunque la soluzione dovrebbe essere derivabile; ma il termine stocastico rende la soluzione ruvida, non differenziabile. E non possiamo ricorrere alle distribuzioni per via del termine non-lineare. Nel 2013, il matematico austriaco Martin Hairer ha portato decisivi contributi, creando una sequenza di regolarizzazioni del termine stocastico; nell'anno seguente gli fu conferita la *Fields Medal* per questi lavori³.

Il disordine e le repliche

Nella meccanica statistica di equilibrio, una grandezza fondamentale è la funzione di partizione, indicata con la lettera Z , dal tedesco *zustandssumme*, cioè somma delle situazioni. Essa è una somma pesata su tutte le configurazioni possibili del sistema; una configurazione è una delle possibili assegnazioni di valori a tutti i gradi di libertà del sistema. Il peso assegnato a ogni configurazione è chiamato «peso di Boltzmann»; esso è la probabilità assegnata alla configurazione. Questo peso dipende dalle interazioni fra i gradi di libertà. Se il sistema è disordinato, il «peso di Boltzmann» include le informazioni che abbiamo sul disordine. La funzione Z è una serie o un integrale multiplo o entrambi, a seconda che i gradi di libertà prendano valori discreti o continui.

La procedura corretta sarebbe: valutare Z per ogni realizzazione fissata di disordine, valutare $\log Z$, che è l'energia libera, infine sommare (o mediare) $\log Z$ riguardo alla classe di realizzazioni di disordine. Questa procedura si usa definire con disordine *quenched*.

È invece più facile la procedura con disordine *annealed*: mediare prima sul disordine, poi sommare le configurazioni. Similmente è possibile la valutazione *annealed* della funzione Z^n , dove n è un intero positivo. Questa potenza n -esima della funzione di partizione può essere scritta come prodotto di n copie della funzione Z , ovvero una funzione di partizione dove i gradi di libertà originali hanno ora un ulteriore indice che indica la copia o replica. Per ogni valore dell'intero n , il «peso di Boltzmann» è una funzione simmetrica negli indici di replica, prima e dopo aver effettuato la media *annealed* sul disordine. Ma come passare dalla valutazione *annealed* di Z^n alla valutazione *quenched* di $\log Z$? La formula che esprime $\log Z$ come limite di Z^n

$$\log Z = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{Z^x - 1}{x}$$

richiede che x sia una variabile reale.

Il passaggio da Z^n a Z^x è un problema di interpolazione che ha infinite soluzioni. Parisi ha scelto arbitrariamente una funzione interpolante, che per x non intero non era simmetrica nelle repliche (rottura della simmetria) e ha mostrato che conduceva, nel limite $x \rightarrow 0$, alla corretta valutazione *annealed*.

L'originale lavoro del 1979-80 suscitò molto interesse e discussioni, riguardo al metodo. Centinaia o migliaia di lavori nei venti anni successivi, molti fatti da Parisi e dai suoi collaboratori, portarono a convalidare il metodo, che si dimostrò utilissimo in modelli fisici, biologici, combinatori.

Molto dopo fu possibile ottenere i medesimi risultati con metodi probabilistici che evitavano le repliche e mostravano che l'intuizione di Parisi era stata corretta.³

Giovanni Cicutta (già Ricercatore INFN e Professore di Fisica Teorica)

Note

- ¹ Può essere utile la voce, disponibile in rete, *Crescita di superfici*, di Andrea C. Levi, nella *Enciclopedia della Scienza e della Tecnica*, 2007.
- ² Può essere utile la voce *The work of Martin Hairer*, preparata dalla *International Mathematical Union*, disponibile in rete.
- ³ Possono essere utili: la voce *Fisica dei sistemi complessi*, scritta da Parisi per *Enciclopedia del Novecento*, Il Supplemento, Treccani 1998, che si trova in rete, e anche l'articolo espositivo *La meccanica statistica dei sistemi complessi*, di E. Agliari e A. Barra, sulla rivista *Ithaca*, dell'Università del Salento, anno 2020, pure in rete. Una esposizione più tecnica è il video di 30 minuti di Francesco Guerra, *The replica trick on interpolating replicas*, anch'esso in rete.