

La fisica della materia: alcune sfide e prospettive dei prossimi anni

Lucio Claudio Andreani

Dipartimento di Fisica, Università di Pavia, via Bassi 6, 27100 Pavia, Italy

In questo contributo descrivo alcune prospettive per la fisica della materia nei prossimi anni che riguardano in particolare tre aree di ricerca: analogie fra sistemi elettronici e fotonici, eccitazioni elementari di natura ibrida, la seconda rivoluzione quantistica.

Introduzione

La fisica della materia è un campo molto ampio che comprende la fisica dei solidi, dei liquidi, la fisica atomica e molecolare, la *soft matter*, la fisica dei plasmi, l'ottica e la fotonica, l'informazione quantistica (quest'ultima in parziale sovrapposizione con l'area di fisica teorica). A partire dalla fine del secolo scorso, molti di questi campi hanno ricevuto un fortissimo impulso dallo sviluppo delle nanotecnologie, che permettono di realizzare strutture su scala sub-micrometrica, progettate (a volte si dice ingegnerizzate) sia per l'osservazione di effetti di natura fondamentale, sia per la realizzazione di dispositivi sempre

più miniaturizzati. Ciò garantisce a molti campi della fisica della materia possibilità di sviluppo in numerose direzioni, quasi senza limiti. In questo breve *excursus* mi soffermerò sui seguenti ambiti di ricerca:

- analogie fra sistemi elettronici e fotonici
- eccitazioni elementari di natura mista
- la seconda rivoluzione quantistica.

Si tratta ovviamente di una scelta personale e specifica, per la quale cercherò di fornire pochi *entry points* selezionati in una letteratura sempre più vasta.

Sistemi elettronici e fotonici: un percorso congiunto

Lo studio degli elettroni nei solidi (che ha avuto grande sviluppo negli anni '60 e '70) [1, 2] e della luce nei cristalli fotonici (a partire dagli anni '80 e '90) [3] hanno in comune il carattere ondulatorio di elettroni e fotoni, e le proprietà

che seguono dalla periodicità spaziale, in primo luogo l'esistenza di *gap* di energia e la possibilità di realizzare difetti controllati di varie dimensionalità. L'analogia si è poi estesa a numerosi ambiti, ad es. la localizzazione di Anderson in presenza di disordine, la realizzazione di atomi artificiali quali i *quantum dots* e le cavità fotoniche, il *design* e la fabbricazione di dispositivi fotonici planari che emulano le proprietà dei dispositivi elettronici (in primo luogo il transistor).

Da alcuni anni è emerso lo studio di un altro elemento unificante fra sistemi elettronici e fotonici, ossia le proprietà topologiche [4, 5, 6, 7]. Concetti quali la fase di Berry e gli invarianti topologici come il numero di Chern sono alla base di profonde analogie e hanno permesso di rivelare nuovi effetti riguardanti la luce (si pensi ad es. al *quantum spin-Hall effect* o ai sistemi non reciproci che emulano l'esistenza di un campo magnetico [7]). È facile prevedere che la commistione di concetti fra fisica dei solidi, fotonica, geometria e topologia, evocherà nei prossimi anni un campo di ricerca interdisciplinare con molteplici sviluppi in ampie aree della fisica della materia. Sarà anche di grande importanza l'applicazione di metodi di *quantum field theory* ai sistemi analoghi di carattere sia elettronico sia fotonico, con i quali vengono studiati e realizzati modelli nati in ambito puramente teorico.

Eccitazione elementari: un tema sempre vivo

Risale a poco prima degli anni '60 l'inizio dello studio sistematico delle eccitazioni elementari nei solidi, quali plasmoni, eccitoni, magnoni, polaritoni, in aggiunta ovviamente ai fononi [8, 9, 10]. Lo sviluppo delle nanotecnologie e delle tecniche spettroscopiche ha portato anche qui a svariate possibilità di indagine e controllo delle eccitazioni elementari in funzione della dimensionalità, si pensi ad esempio ai plasmoni localizzati [11] (noti specie in letteratura chimica come Surface Plasmon Resonance o SPR), che hanno rivoluzionato il campo dei sensori ottici.

Negli ultimi 20 anni, lo studio delle eccitazioni miste nei sistemi optomeccanici, *plasmon-excitons*, *exciton-polaritons*, spesso su piattaforme elettroniche di tipo quasi-bidimensionale come il grafene,

i semiconduttori 2D, le perovskiti ibride, si è rivelato un campo di ricerca estremamente fecondo per la realizzazione di effetti fisici fondamentali con varie prospettive applicative [12]. Un esempio significativo è lo studio dei fluidi quantistici e delle correlazioni tipiche della condensazione di Bose-Einstein [13], ora anche a temperatura ambiente. I continui progressi delle nanotecnologie e della scienza dei materiali fanno prevedere per i prossimi anni (e forse decenni) una grande varietà di ricerche nello studio di eccitazioni elementari di natura ibrida, di effetti prettamente quantistici, dando rinnovato vigore al tradizionale e sempre vivo campo dell'interazione radiazione-materia.

La seconda rivoluzione quantistica

Per molti decenni, i concetti della *quantum information* (in primo luogo il *quantum computing* e la comunicazione quantistica basata sulla *quantum key distribution*) sono evoluti come concetti puramente teorici o confinati a pochi esperimenti di natura fondamentale. Negli ultimi anni il computer quantistico è diventato una realtà anche commerciale, è disponibile sul *cloud* nelle varie piattaforme basate su circuiti superconduttivi [14], ioni intrappolati da fasci laser [15], e circuiti fotonici integrati [16] (questi ultimi non realizzano per ora lo *universal quantum computer*, d'altra parte hanno la caratteristica di operare a temperatura ambiente). La comunicazione quantistica è anch'essa una realtà tecnologica e si espande molto rapidamente nelle direzioni sia della comunicazione *free space* [17], sia della realizzazione di una rete quantistica su fibre ottiche [18]. Tutto questo avviene grazie ad un imponente sforzo di ricerca di carattere interdisciplinare, ma che ruota attorno alla fisica della materia, offrendo brillanti prospettive di ricerca per molti anni a venire. Un esempio emergente sono i processori quantistici basati su qu-bit a semiconduttori [19].

È difficile dire in che misura queste ed altre tecnologie quantistiche di seconda generazione, finora confinate a relativamente pochi ambiti pubblici e privati, entreranno anche nella vita quotidiana al pari di quelle di prima generazione

(si pensi all'elettronica e ai laser, indispensabili anche per la comunicazione ottica). È anche difficile dire ora se questa seconda rivoluzione quantistica sia almeno in parte una moda destinata a passare, oppure se diventerà un nuovo paradigma per la comprensione e magari anche per l'insegnamento della meccanica quantistica. È però certo che essa offre sempre nuove possibilità di ricerca e lega in un campo comune la fisica dei solidi, la fisica atomica e la fotonica (oltre a vari ambiti di ingegneria), confermando il ruolo centrale della fisica della materia nella ricerca e nell'innovazione anche tecnologica.

Conclusioni: una prospettiva personale

Le direzioni di ricerca sopra menzionate sono solo alcune fra le tante che potrebbero essere discusse: la fisica computazionale a principi primi e il suo impatto sulla scienza dei materiali, lo studio teorico di fenomeni complessi di natura multiscala (ad esempio l'attrito o il *folding* di biomolecole), le nanotecnologie quantistiche, le tematiche riguardanti l'energia e in particolare l'*energy harvesting*. La fisica della materia si espande rapidamente e in direzioni molto diverse, spesso comuni ad altre discipline quali la scienza dei materiali, la chimica, l'ingegneria, l'informatica. A differenza di altre aree (quali la fisica delle interazioni fondamentali) non esiste un modello standard, bensì una pluralità di conoscenze che tendono a produrre comunità distinte, a volte con poca comunicazione e difficoltà di comprensione reciproche. È necessario formare dei ricercatori che conoscano i percorsi storici delle idee e che abbiano una visione d'insieme della fisica e delle altre discipline, evitando una iperspecializzazione (che può portare anche al dogmatismo) e favorendo invece la multidisciplinarietà.

Ringraziamento - Sono grato a Dario Gerace per una lettura critica di questo contributo e per utili suggerimenti.



- [1] F. Bassani and G. Pastori Parravicini, *Electronic States and Optical Transitions in Solids* (Pergamon Press, 1975).

- [2] G. Grosso and G. Pastori Parravicini, *Solid State Physics*, 2nd ed. (Academic Press, 2013).
- [3] J.D. Joannopoulos, S.G. Johnson, J.N. Winn, and R.D. Meade, *Photonic Crystals - Molding the Flow of Light*, 2nd ed. (Princeton University Press, 2008).
- [4] D. Xiao, M.-C. Chang, Q. Niu, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 1959 (2010).
- [5] D. Vanderbilt, *Berry Phases in Electronic Structure Theory: Electric Polarization, Orbital Magnetization and Topological Insulators* (Cambridge University Press, 2018).
- [6] S.M. Girvin and K. Yang, *Modern Condensed Matter Physics* (Cambridge University Press, 2019).
- [7] T. Ozawa et al, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 015006 (2019).
- [8] D. Pines, *Elementary Excitations in Solids* (CRC Press, 1999).
- [9] S.A. Maier, *Plasmonics - Fundamentals and Applications* (Springer, 2007).
- [10] L.C. Andreani, in *Strong Light-Matter Coupling: From Atoms to Solid-State Systems*, edited by A. Auffèves et al. (World Scientific, Singapore, 2014), p. 37.
- [11] S.V. Gaponenko, *Introduction to Nanophotonics* (Cambridge University Press, 2010).
- [12] Z. Cai, Y. Xu, C. Wang, and Y. Liu, *Adv. Optical Mater.* **8**, 901090 (2020).
- [13] I. Carusotto and C. Ciuti, *Rev. Mod. Phys.* **85**, 299 (2013).
- [14] Quantum computer based on superconducting circuits: <https://quantum-computing.ibm.com/>, vedi D. Castelvecchi, *Nature* **453**, 159 (2017); F. Arute et al., *Nature* **574**, 505 (2019).
- [15] Trapped ions quantum computing: <https://ionq.com/>, vedi ad es K. Wriht et al., *Nature Communications* **10**, 5464 (2019).
- [16] Photonic quantum computing: <https://aws.amazon.com/it/braket/quantum-computers/xanadu/>, vedi ad es. L.S. Madsen et al., *Nature* **606** 75 (2022).
- [17] S.K. Liao et al., *Nature Photonics* **11**, 509 (2017).
- [18] EuroQCI (European Quantum Communication Infrastructure) Initiative, <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci>
- [19] Qubit a semiconduttori: <https://qutech.nl/>, vedi ad es. S.G.J. Philips et al, *Nature* **609**, 919 (2022).



Lucio Claudio Andreani: è Professore Ordinario di Fisica della Materia presso l'Università di Pavia. Si è occupato di semiconduttori, nanostrutture, eccitoni e polaritoni, microcavità, cristalli fotonici, plasmonica, temi applicati quali fotovoltaico e fotonica in silicio. Al momento si interessa soprattutto di fotonica chirale e metasuperfici.

