

Fluidi di luce e onde di materia

Iacopo Carusotto

*Pitaevskii BEC Center, INO-CNR and Dipartimento di Fisica, Università di Trento
I-38123 Trento, Italy*

Materia

Luce

In cosa sono simili?
In cosa differiscono?

Senza benzina auto si ferma

Luce da galassie lontane
arriva a noi indisturbata

Mattonata in testa fa male

Luce solare al più ci scotta

Aeroplano può volare
in aria

Muoversi velocemente attraverso
il cosmic microwave background
non ha particolari conseguenze

Proiettile → traiettoria parabolica

Onde luminose fanno
interferenza

A prima vista sembrano molto diverse...

Ma ci sono casi in cui i comportamenti si scambiano,
tipo la luce si comporta come

Parte 1

La Luce

Teoria corpuscolare della luce di Newton (“*Opticks*”, 1704)

La luce è formata da **corpuscoli materiali**

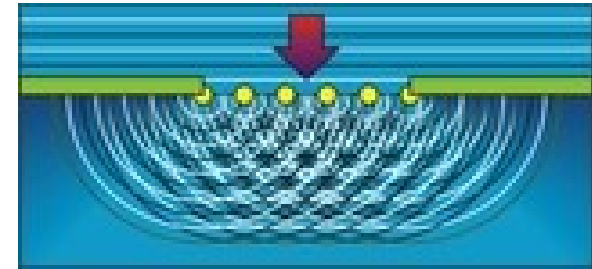
- **Colori differenti** corrispondono a corpuscoli di tipo diverso
- I corpuscoli viaggiano nello spazio **lungo linee rette**
- La rifrazione è dovuta all’attrazione da parte dei corpi materiali



Teoria ondulatoria di Huygens (“*traité de la lumière*”, 1690)

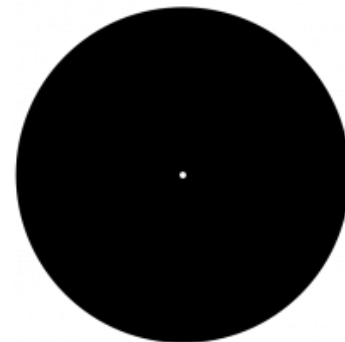
La teoria corpuscolare di Newton sconfitta dalla rivale teoria ondulatoria

- Esperimento della doppia fenditura di Young: **interferenza**
- **Diffrazione da un'apertura** → principio di Huygens-Fresnel delle onde secondarie



Macchia luminosa di Arago-Poisson

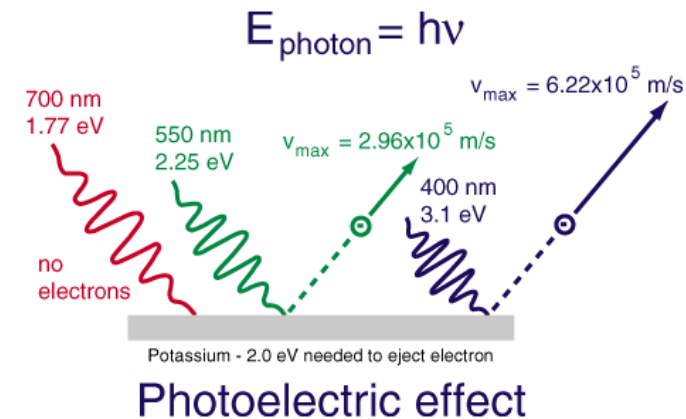
- **Poisson** mise in ridicolo la teoria ondulatoria predicendo sulla base della teoria della diffrazione una macchia luminosa al centro dell'ombra di un oggetto circolare ...
- ... ma **Arago** osservò la macchia luminosa all'inizio dell'1800 !!
(in realtà osservata per la prima volta da Delisle/Maraldi ~1720)
- impossibile da spiegare sulla base della teoria corpuscolare
→ **supporto finale alla teoria ondulatoria**



There are more things in heaven and earth, Horatio, Than are dreamt of in your philosophy (Shakespeare, Hamlet)

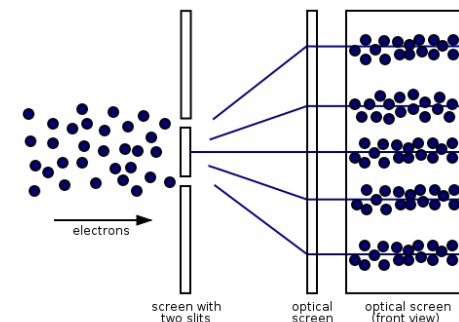
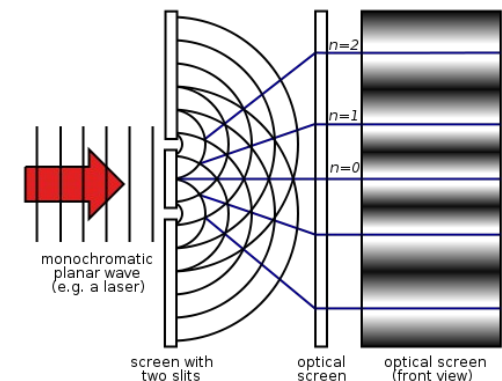
Effetto foto-elettrico:

- L'energia degli elettroni dipende dal **colore della luce** e non dall'intensità
- Einstein spiegò l'effetto fotoelettrico in termini di **quanti di luce** (1905)
- concetto di quanto già proposto da Planck per correggere la **catastrofe del corpo nero**



Ma la natura ondulatoria della luce rimane:

- **Dualismo onda-particella del fotone**
- Esperimento della doppia fenditura di Young:
 - Ciascun fotone colpisce schermo in **posizione casuale**
 - **Distribuzione di probabilità** determinata dalla teoria classica della diffrazione





Da Wikipedia: Wave-particle duality

Collisioni luce-luce

Assunzione implicita della teoria di Newton: corpuscoli non interagiscono

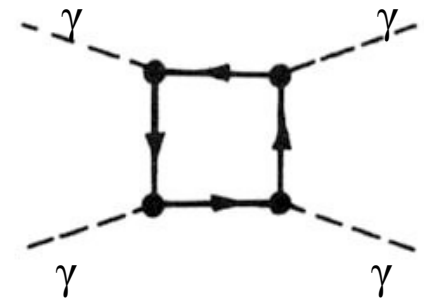
- Se interagissero via collisioni, formerebbe un fluido come l'acqua o l'aria
- A mia conoscenza, nessuna traccia che Newton abbia mai pensato in questi termini

Teoria ondulatoria di Huygens-Fresnel

- Equazione lineare delle onde
- Messa su basi rigorose e complete da Maxwell

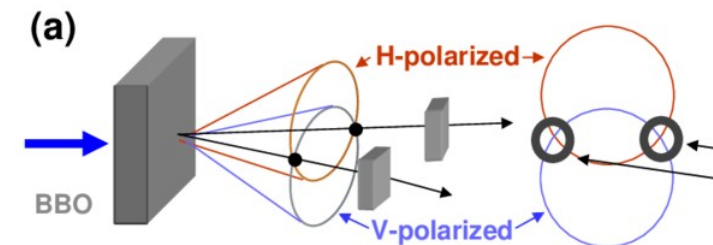
Teoria quantistica dei campi:

- **Collisioni fotone-fotone** mediate da coppie virtuali elettrone-positrone (Heisenberg-Euler, 1936)
- Luce visibile \rightarrow sezione d'urto piccolissima



In mezzo ottico nonlineare:

- Coppia elettrone-buca in semiconduttore \rightarrow effetto rinforzato $\times 10^{36}$
- Collisioni fotone-fotone usate per generare coppie di fotoni *quantum entangled*

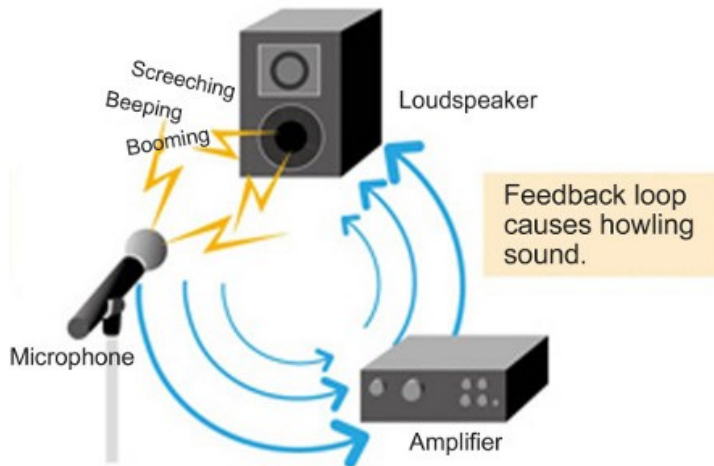
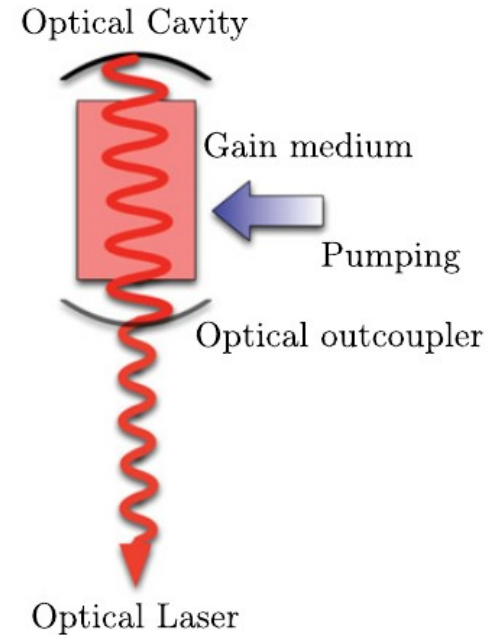


Il laser



- Fascio di fotoni coerenti
- Tutti con la stessa funzione d'onda
- Onda piana luminosa

Luce monocromatica, alta intensità, focalizzata e collimata



Stesso effetto in acustica...

Parte 2

La Materia

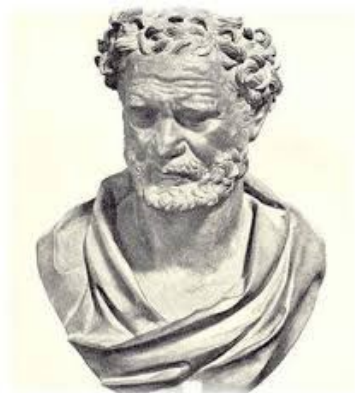
Fluidi e gas: una storia fondamentalmente corpuscolare

Modello atomistico della materia di Democrito:

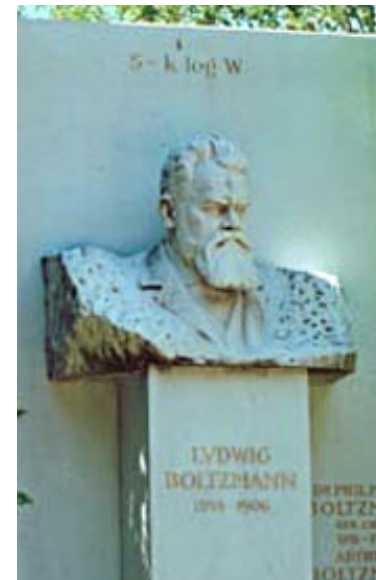
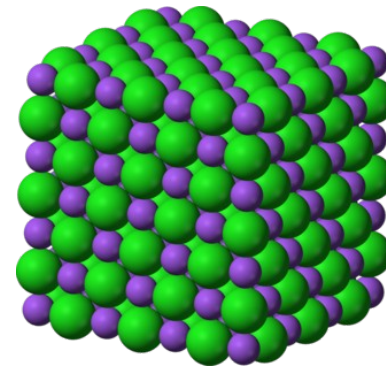
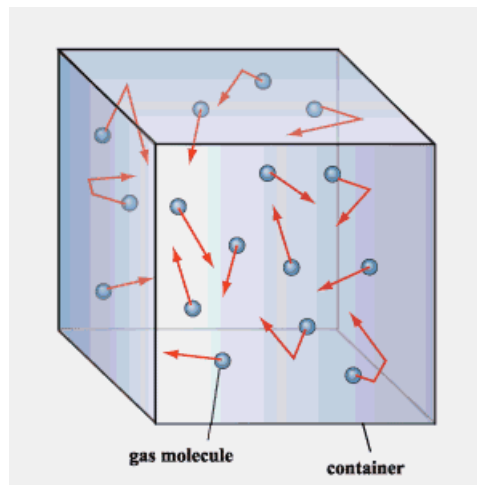
- **Atomi indivisibili** come oggetti solidi che si muovono nel vuoto
- Materiali diversi consistono di atomi di tipo diverso
- Idea originariamente **filosofica**, dimostrata scientificamente solo in tempi moderni

Spiega in termini microscopici la termodinamica e la chimica:

- **Teoria cinetica dei gas** e leggi fondamentali delle **reazioni chimiche**
- Fluttuazioni statistiche e moto Browniano
- Atomi disposti in **reticolo cristallino nei solidi**



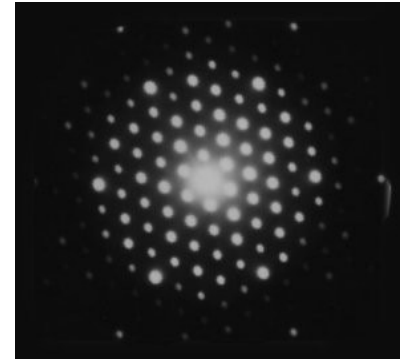
Democrito



Meccanica quantistica: natura ondulatoria della materia

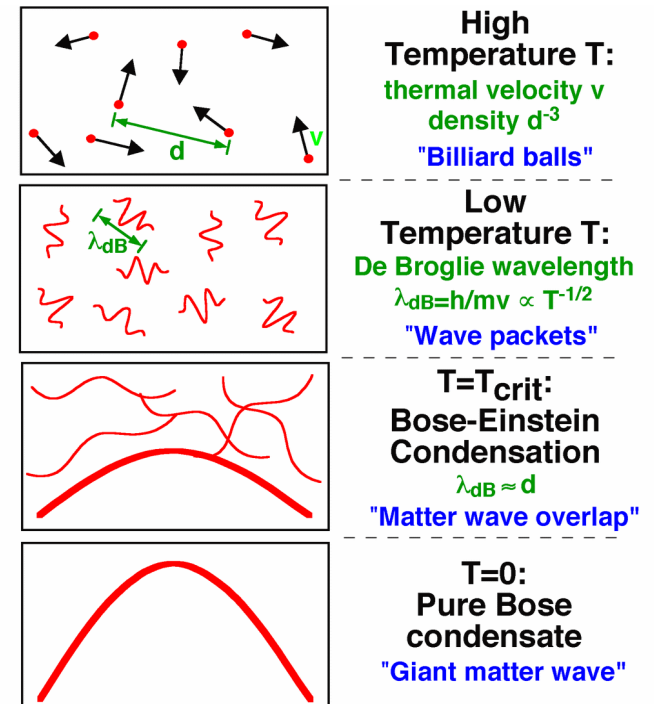
Onde di de Broglie (postulate nel 1924):

- Introdotte per spiegare il **modello di Bohr della struttura atomica**
- **Lunghezza d'onda** $\lambda=h/p$
- Osservata nelle **frange di interferenza con elettroni**
(Davisson e Germer, 1927)



A temperature ultra-fredde:

- Lunghezza d'onda termica $\lambda_{th}=(2\pi\hbar/mk_B T)^{1/2}$
comparabile alla distanza fra particelle
 - **Natura ondulatoria fondamentale**
 - Comportamento di sistemi macroscopici totalmente diverso a seconda dello **spin intero** o **semi-intero** delle particelle costituenti



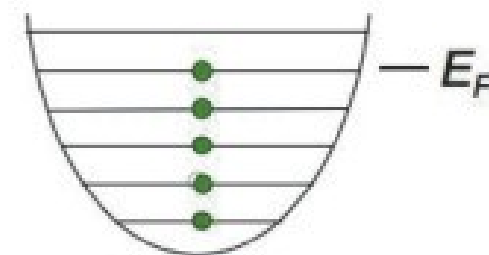
sketch from Ketterle group website

Fermioni (spin semi-intero)

Funzione d'onda antisimmetrica sotto scambio

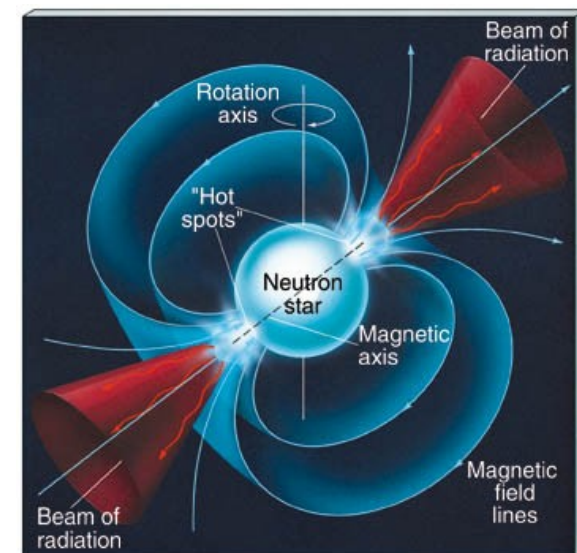
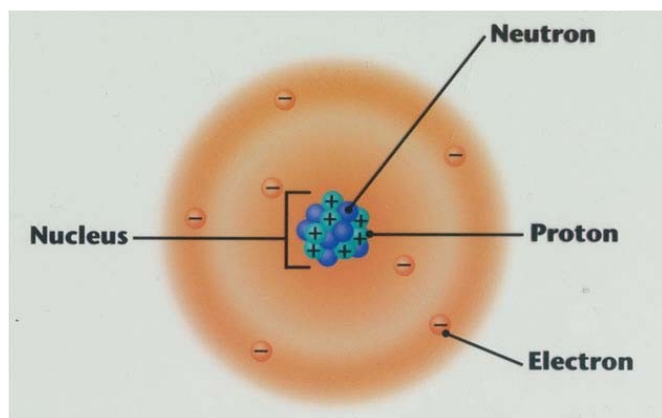
Al più una particella per orbitale: **principio di Pauli**

Stato fondamentale: orbitali pieni fino al **livello di Fermi**



Pressione di Fermi impedisce il collasso e stabilizza materia

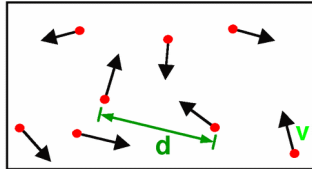
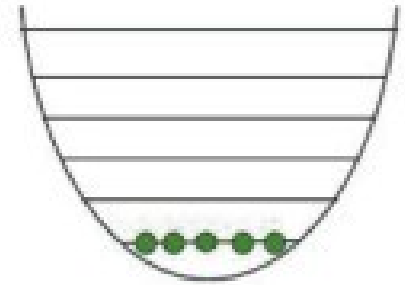
- **Nubi elettroniche** negli atomi e nei metalli
- **Stelle di neutroni** formate da collasso gravitazionale
(quando gravità supera la pressione di Fermi degli elettroni,
cioè per masse solari al di sopra di 1.44 masse solari)



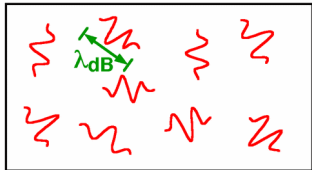
Bosoni (spin intero)

Numero arbitrario di particelle in ciascun orbitale:

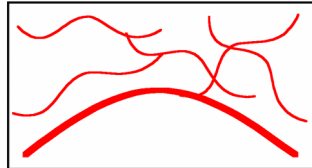
- Stato fondamentale: tutti i bosoni nell'orbitale di minima energia → **condensato di *Bose-Einstein***
- Le onde di materia **oscillano all'unisono**



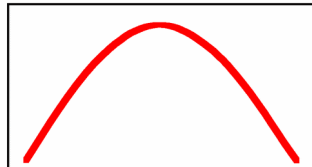
High Temperature T:
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



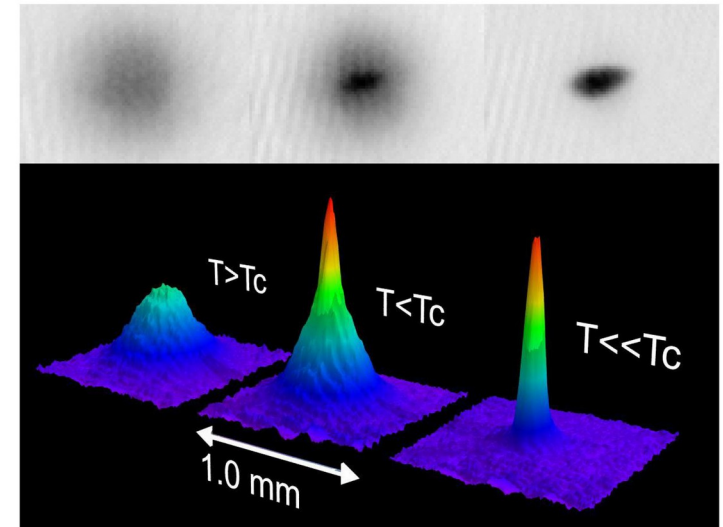
Low Temperature T:
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



T = T_{crit}:
Bose-Einstein
Condensation
 $\lambda_{dB} \approx d$
"Matter wave overlap"



T = 0:
Pure Bose
condensate
"Giant matter wave"



BEC: onda coerente di materia

Campo elettromagnetico coerente

↔

Onde coerente di materia del BEC

Campi E, B

↔

Campo di materia Ψ

Equazioni di Maxwell

↔

Equazione di Gross-Pitaevskii

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \frac{4\pi}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}$$

$$i\hbar \frac{\partial \phi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \phi + V \phi + g|\phi|^2 \phi$$

Nonlinearità ottica del mezzo

↔

Interazioni atomo-atomo

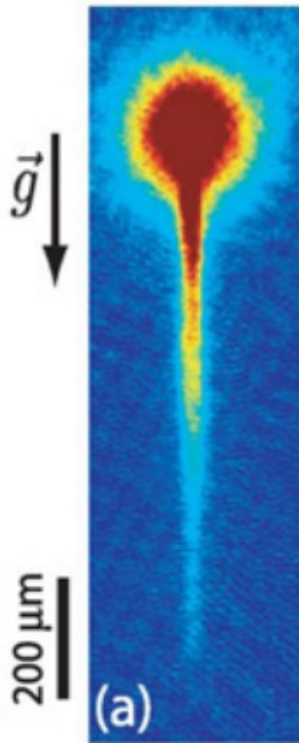
Polarizzazione della luce

↔

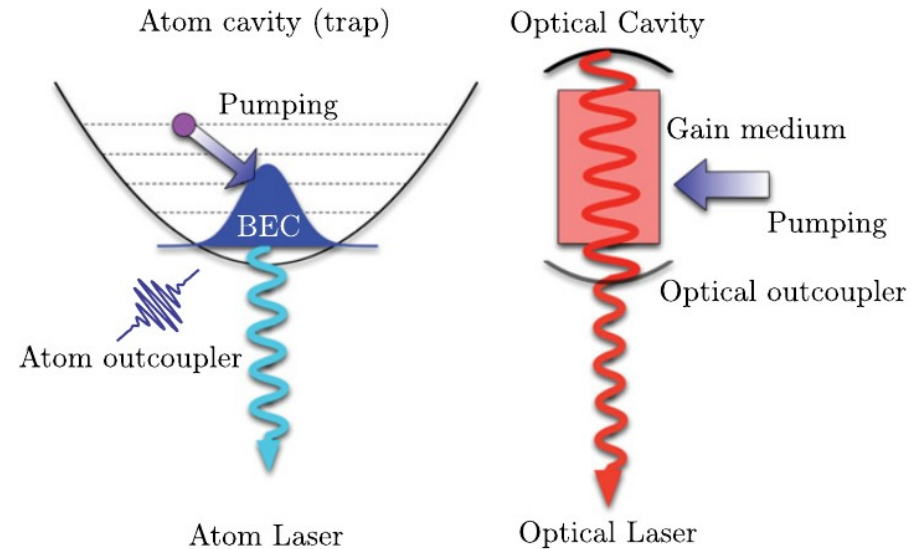
Spin atomico

Gli atomi del condensato dimenticano la loro natura corpuscolare e si comportano come un onda coerente macroscopica di materia !!

Laser ad atomi



Riou et al., Phys. Rev. Lett. 2006

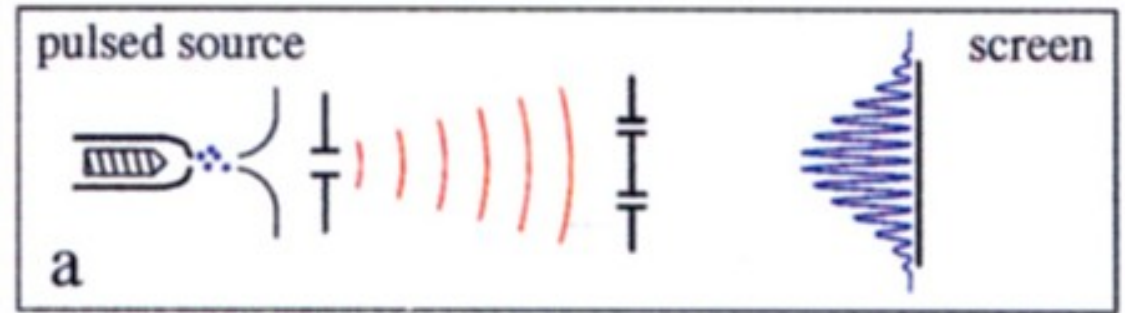
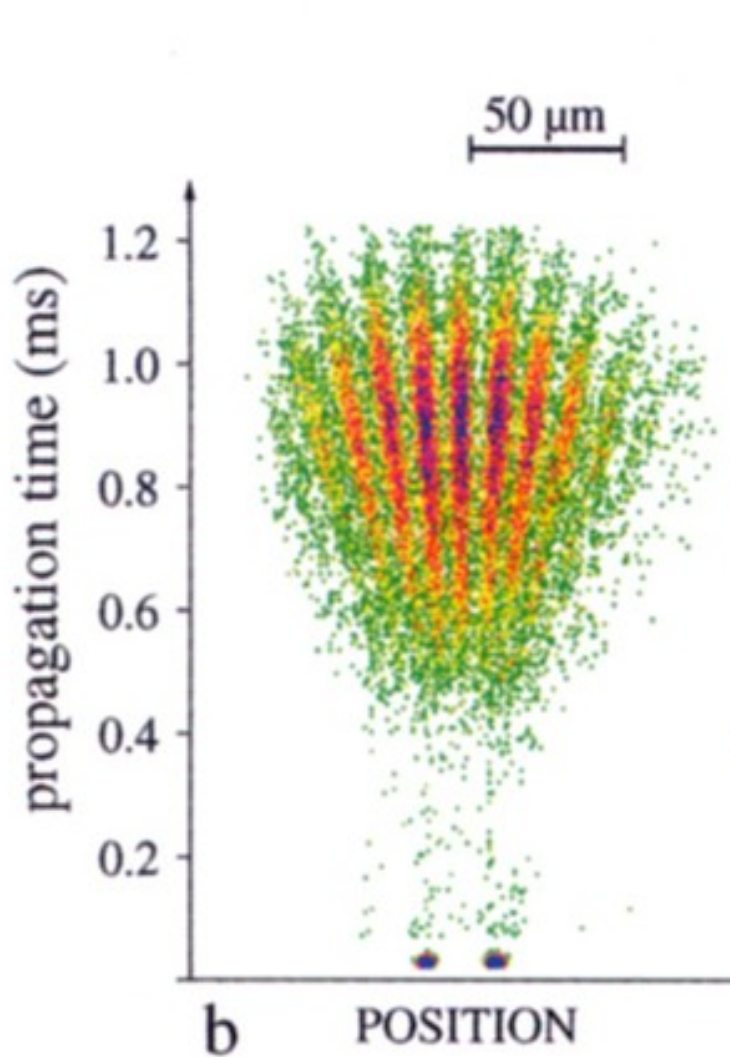


Robins et al., Phys. Rep. (2013)

Atomi estratti dal BEC intrappolato tramite una microonda coerente

- Formano **fascio coerente di materia**
- Utilizzabile per **litografia ad altissima definizione**; interferenza per creare pattern complessi

Interferenza di onde di materia



- Doppia fenditura per atomi a distanza di 8 micron
- Profilo di interferenza sullo schermo

Exp. Kurtsiefer et al.,
Nature 1997

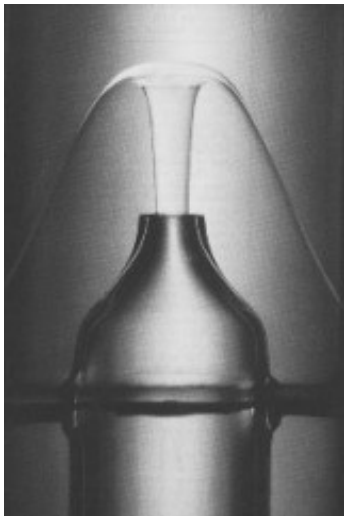
Superfluidità

Conseguenza sorprendente della coerenza dell'onda di materia:

- Comportamento collettivo con tutte le particelle coinvolte nella dinamica del fluido
- Eccitazioni di bassa energia \rightarrow modi collettivi sonori e non moto termico disordinato

Impurezza che viaggia attraverso il superfluido:

- Nessuna dissipazione di energia per $v < v_{cr}$ \rightarrow **flusso senza attrito**
comportamento **superfluido**
- **Attrito** riappare per $v > v_{cr}$



Fountain effect in liquid He

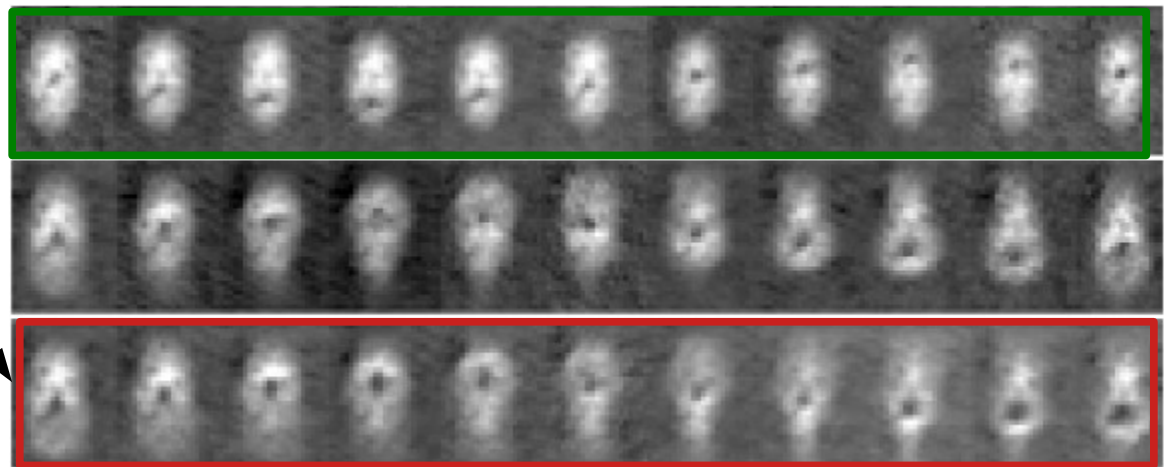
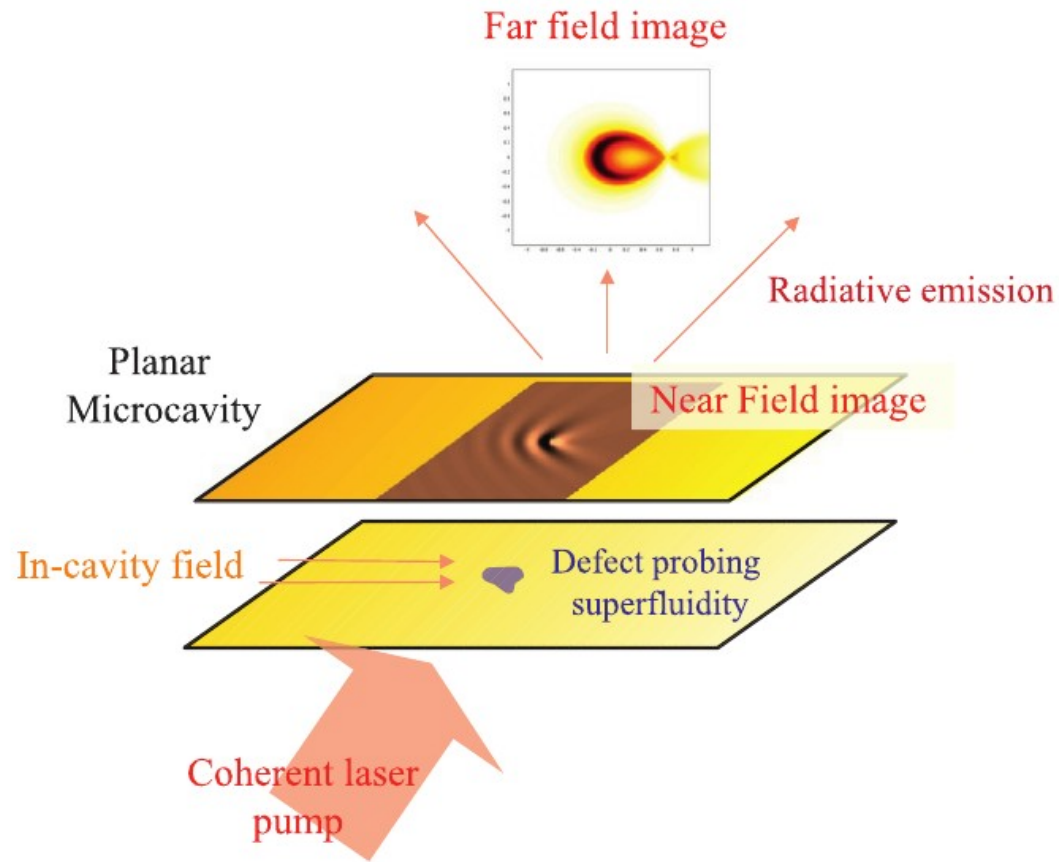


Figura da Onofrio et al., PRL 2000 (gruppo Ketterle)

Parte 3

Fluidi di Luce

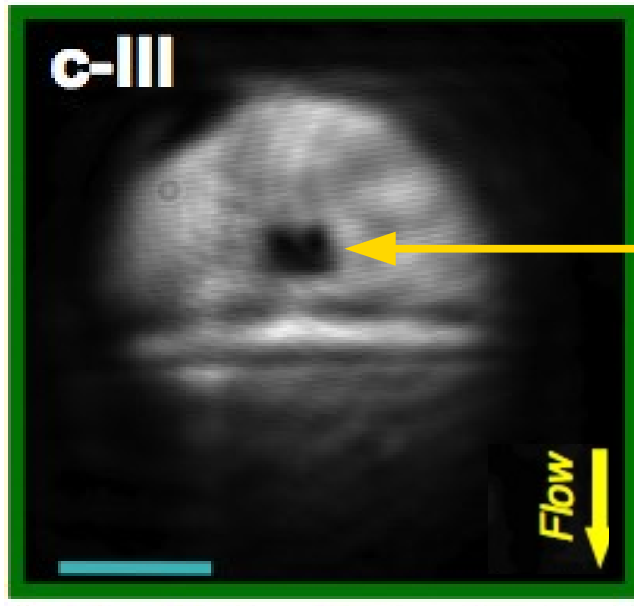
Molti fotoni confinati fra due specchi → fluido di luce



- Confinamento fra specchi → fotoni acquistano massa
- Mezzo nonlineare → collisioni fra fotoni

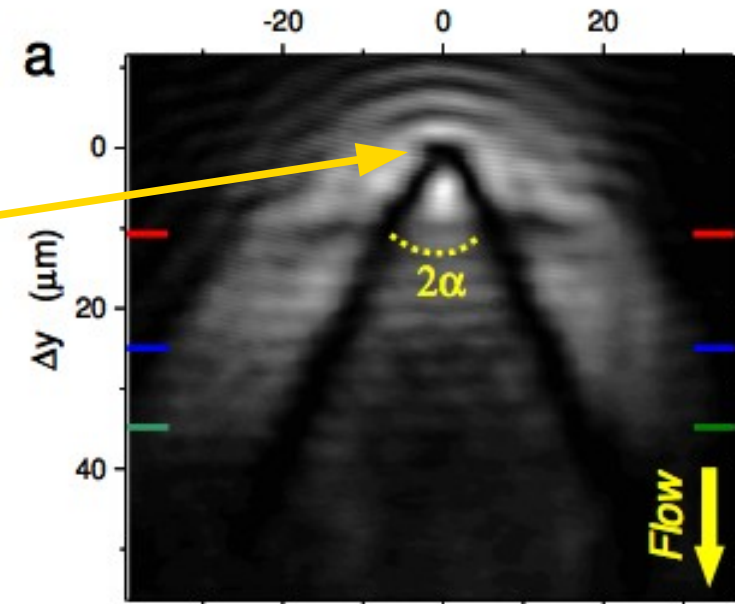
Risultato: comportamento collettivo del fluido di luce,
analogo a gas di particelle materiali

Luce superfluida

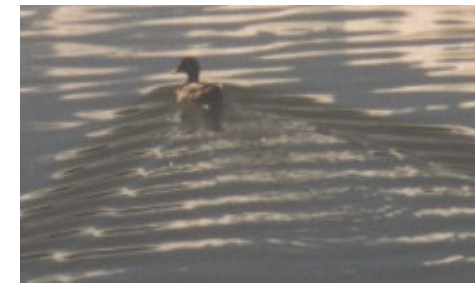


Flusso lento $v < v_{cr}$
Comportamento superfluido,
luce scorre indisturbata attorno ostacolo

Ostacolo



Flusso veloce $v > v_{cr}$
Onda d'urto dopo l'ostacolo



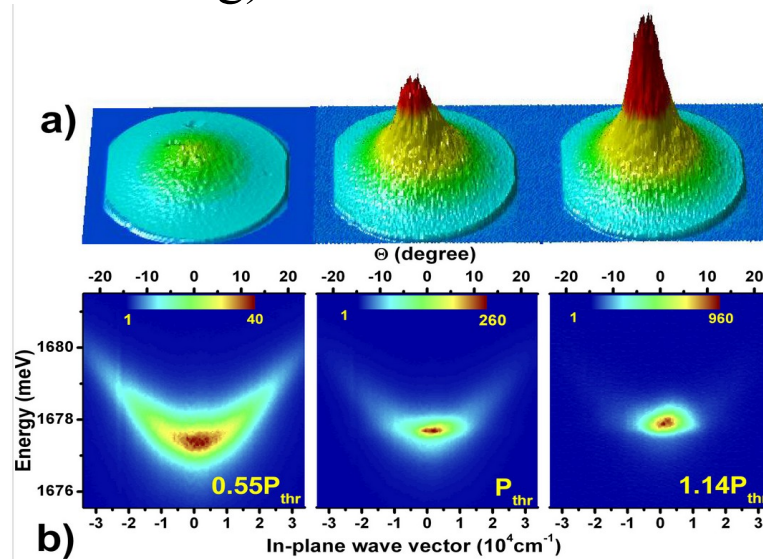
Esperimenti @ LKB-Paris

A. Amo et al., Nat. Phys. (2009) & Science (2010)

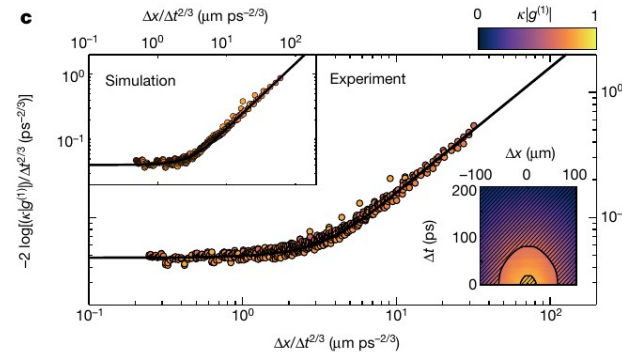
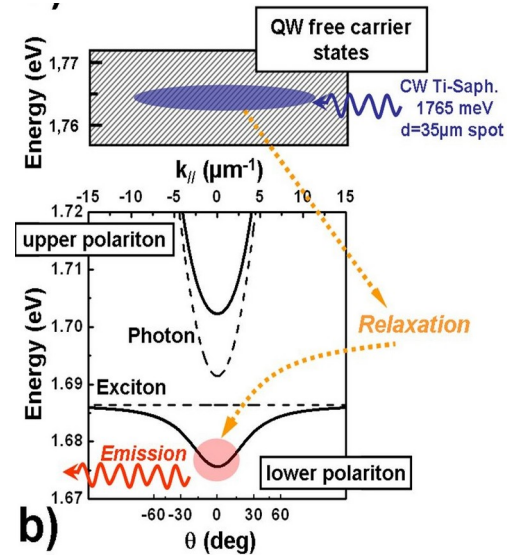
Picture: courtesy F. Neyret,
ARTIS-CNRS, France

Condensazione di Bose Einstein di fotoni

- Equilibrio: ensemble gran-canónico a $\mu=0 \rightarrow$ black-body
- Stato stazionario di non-equilibrio sotto pompaggio e perdite
- Densità alta, temperatura bassa \rightarrow condensato
- Fascio luminoso emesso \rightarrow laser
- Coerenza della luce emessa \rightarrow classe di universalità KPZ (Kardar-Parisi-Zhang)

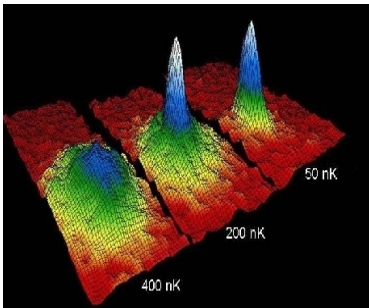


Kasprzak et al., Nature 443, 409 (2006)



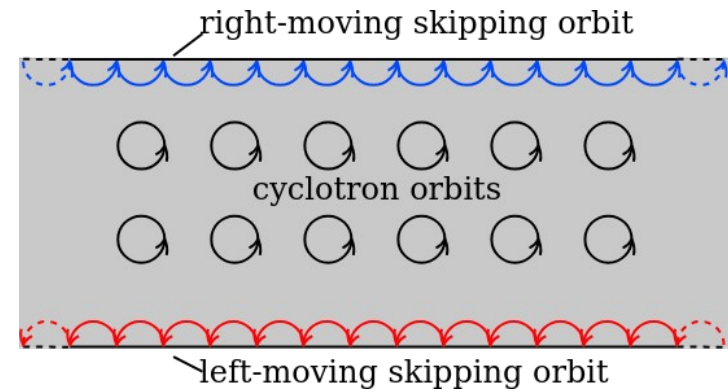
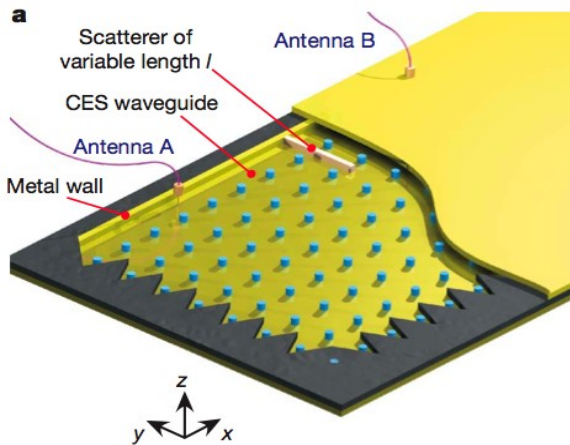
Fontaine et al. Nature 2022

Simile ai condensati di atomi



The first atomic BEC
M. H. Anderson et al.
Science 269, 198 (1995)

Magnetismo del fluido di luce & fotonica topologica



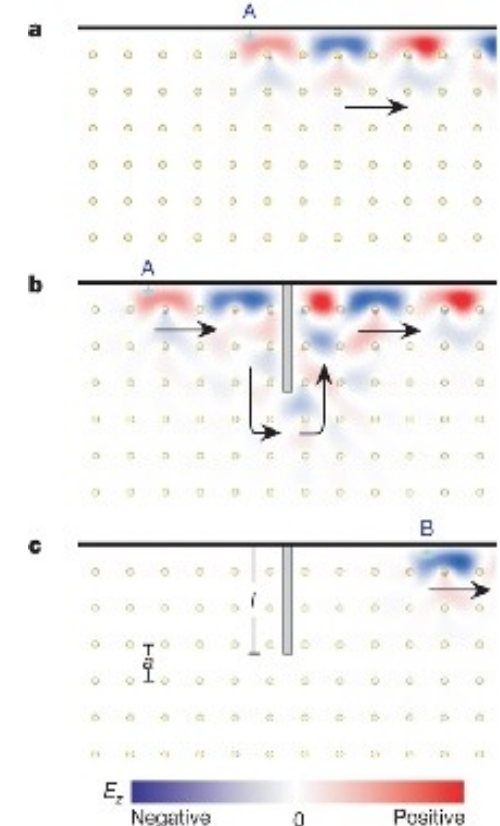
In vuoto: fotoni \rightarrow particelle neutre

In cristallo fotonico con elementi magneto-ottici:

- campo magnetico sintetico per fotoni
- skipping orbits sul bordo
- analoghe a stati di bordo chirali in effetto Hall
- descritti da invarianti topologici delle bande

Esperimento:

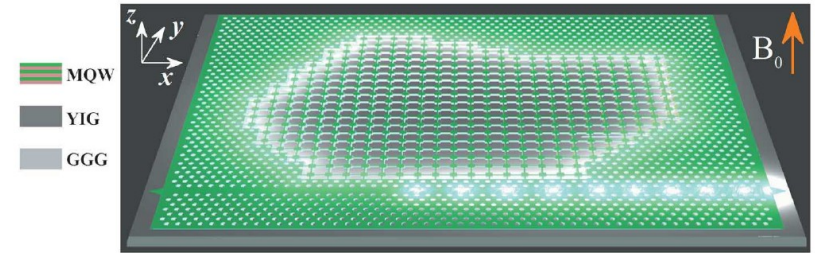
- Trasmissione non-reciproca fra due antenne
- Propagazione unidirezionale, immune a back-scattering



Topolaser

Inserendo guadagno in sistema topologico:

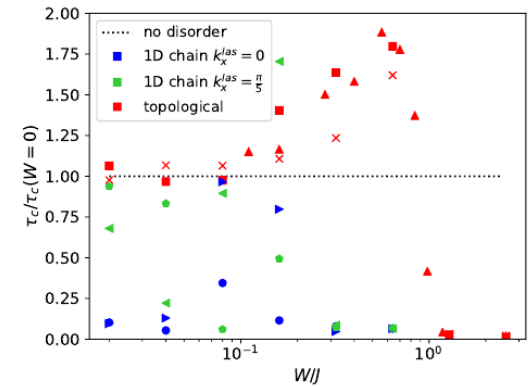
- Operazione laser / condensato di fotoni in stato chirale di bordo



Bahari et al., Science 2017

Importante per tecnologie laser:

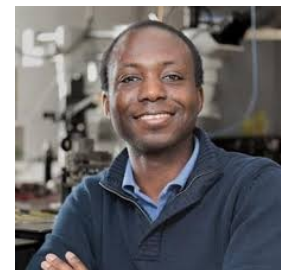
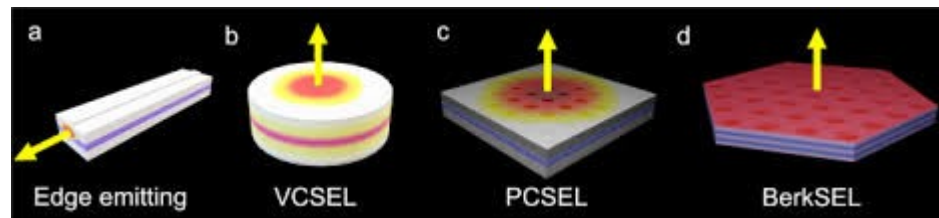
- Moto unidirezionale → blocca la fase relativa delle varie zone
- Forte intensità di emissione ed alta coerenza
- Robusto rispetto al disordine di fabbricazione



I. Amelio and IC, *Theory of the coherence of topological lasers*, PRX 2020

Domande fondamentali & applicazioni:

- Quali sono i limiti ultimi alla coerenza ?
- Reali vantaggi rispetto a laser standard ?
- Nuovi concetti di laser ?



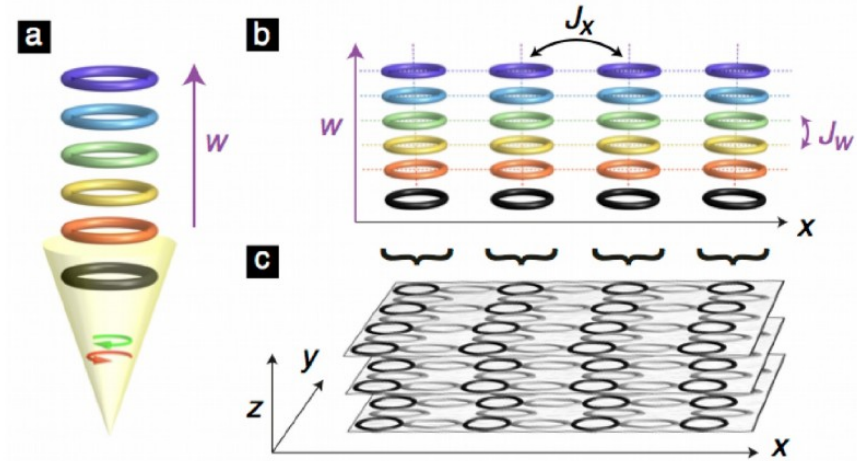
Boubacar Kanté's *BerkSEL* → un nuovo concetto di surface emitting laser

Come andare oltre $d > 3$?

Differenti modi di un risonatore ad anello → dimensione sintetica w

- Modulazione elettro-ottica a ω_{FSR}
→ hopping lungo dimensione sintetica w

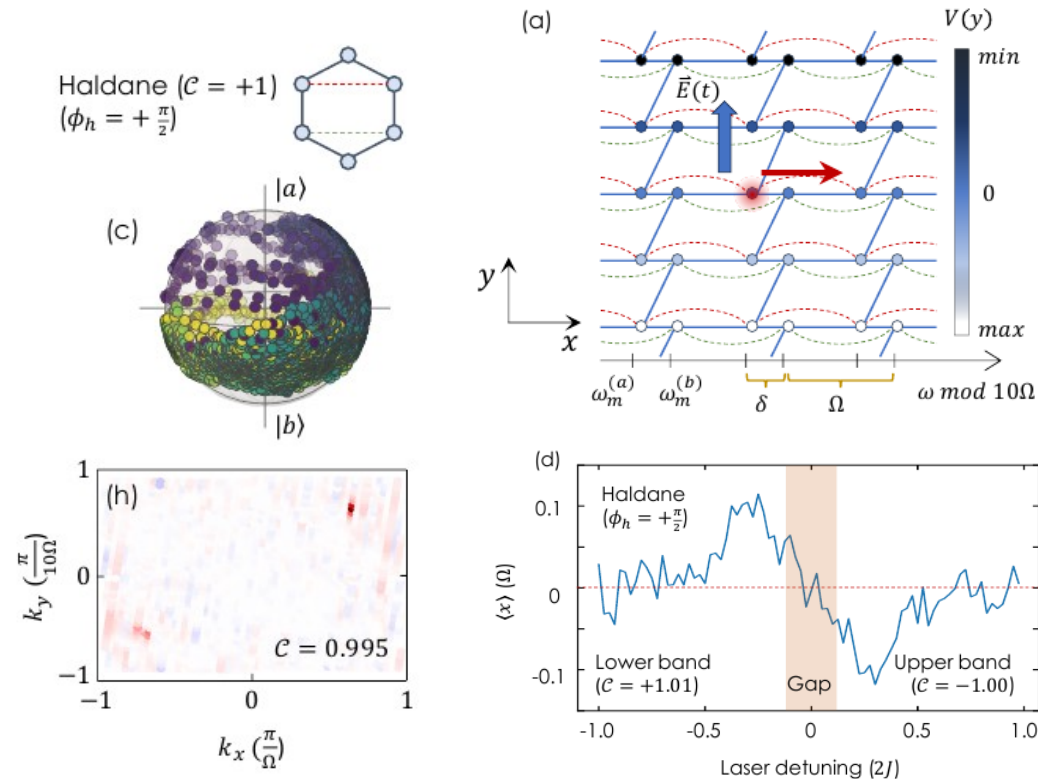
Obiettivo a lungo termine → reticolo 4D



T. Ozawa, N. Goldman, O. Zilberberg, H. M. Price, IC,
Synthetic Dimensions in Photonic Lattices:
From Optical Isolation to 4D Quantum Hall Physics, PRA (2016)

Modello di Haldane 2D :

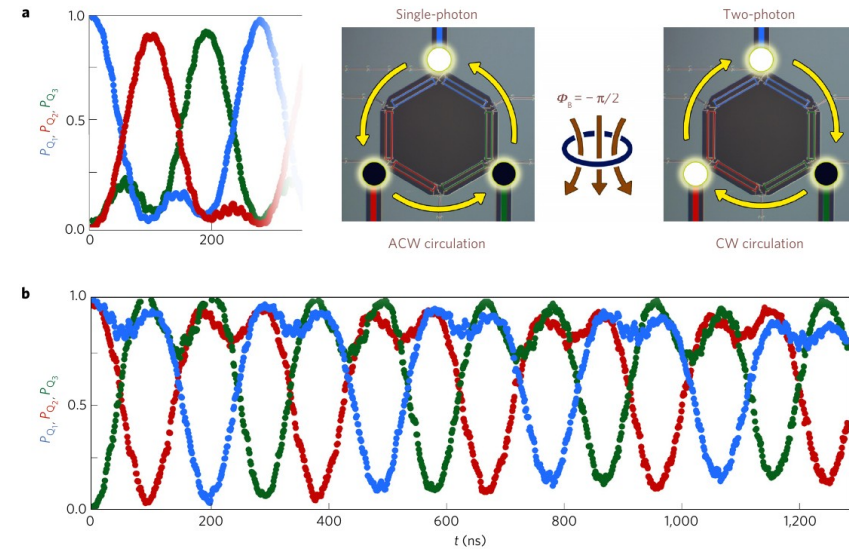
- Topologia non-triviale delle bande
- Curvatura di Berry attorno a punti di Dirac
- Spostamento laterale quantizzato
→ analogo fotonico dell'effetto Hall intero



Fluidi di fotoni impenetrabili

Matrici di qubits in circuiti superconduttori

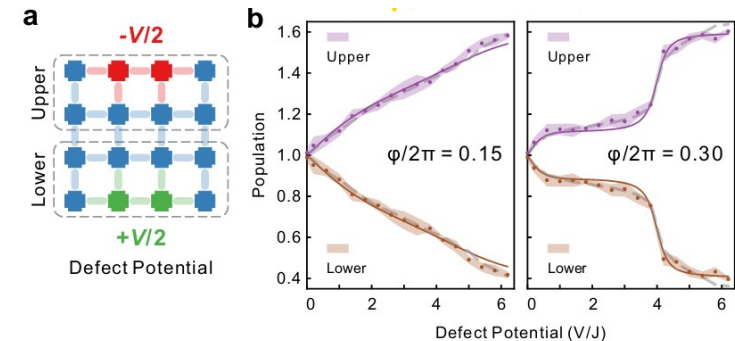
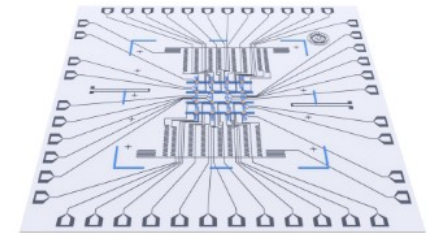
- Qubit a transmon: sistema a due livelli
→ fotoni a microonda effettivamente **impenetrabili**
- Modulazione temporale → **campo magnetico sintetico**
- In combinazione con **interazioni forti**
→ rotazione di particelle / buche in direzioni opposte
(simile esperimento con atomi freddi: Tai et al., Nature 2017)



Roushan et al., Nat. Phys. 2016 (Google AI group, Santa Barbara)

Fluidi quantistici di Hall di luce

- “carica” frazionaria osservata
- variazione di $B \rightarrow$ conducibilità trasversa quantizzata
- prossimi passi:
 - Topologia a molti corpi per **calcolo/memoria quantistica topologica**
 - Eccitazioni collettive con **carica e statistica frazionarie**
(al di là della dicotomia fermioni/bosoni)



Conclusioni e prospettive

Atomi e fotoni → natura duale di onda e particella

Democrito → atomi discreti
De Broglie → onde di materia

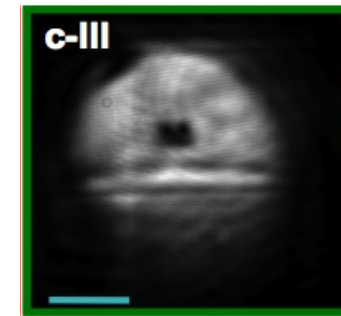
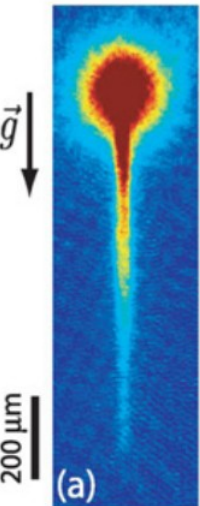
Condensato di Bose Einstein → onda coerente di materia
può formare laser atomico

Teoria ondulatoria & eqs di Maxwell → luce come onde elettromagnetiche
Effetto fotoelettrico → natura corpuscolare della luce

Fluido di luce → gas di molti fotoni interagenti
comportamenti collettivi, e.g. superfluidità

Continuo scambio di idee fra campi diversi della fisica
Fisica fondamentale offre nuovi spunti ad applicazioni

Nuove sorgenti laser, piattaforme per calcolo/memorie quantistiche



Ringraziamo generosi finanziamenti da:

