POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

La Danza Quantistica del Solido: Dai Fononi alla Materia Oscura

*Original*
La Danza Quantistica del Solido: Dai Fononi alla Materia Oscura / Sparavigna, A.C.. - ELETTRONICO. - (2025). [10.5281/zenodo.17668613]

*Availability:*
This version is available at: 11583/3005324 since: 2025-11-21T08:07:52Z

*Publisher:*

*Published*
DOI:10.5281/zenodo.17668613

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

14 November 2026

# La Danza Quantistica del Solido: Dai Fononi alla Materia Oscura

**Amelia Carolina Sparavigna**[1]

[1] DISAT, Politecnico di Torino

DOI: 10.5281/zenodo.17668613

Questo documento presenta il prospetto di una lezione intitolata "La Danza Quantistica del Solido: Dai Fononi alla Materia Oscura", che si propone di unificare concetti di fisica della materia condensata e cosmologia. Il percorso inizia con la definizione quantistica del Fonone come quasiparticella energetica responsabile delle vibrazioni del reticolo cristallino. Verranno poi analizzate le Relazioni di Dispersione (ω(k)) per distinguere i rami acustici da quelli ottici. La lezione procederà illustrando la Spettroscopia Fononica (IR e Raman) e le relative regole di selezione (cambio di dipolo vs. polarizzabilità), dimostrando come queste tecniche analitiche siano finestre essenziali sulle proprietà intrinseche dei materiali. Si accennerà anche alla conducibilità termica nei dielettrici. Infine, il modulo culminerà con l'applicazione dei fononi nel campo della fisica delle particelle, esplorando il loro ruolo cruciale come segnale di rilevamento (cascata fononica) negli esperimenti a bassissima temperatura dedicati alla ricerca di WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), le principali candidate per la Materia Oscura.

## I. Cosa Sono i Fononi: Il Quanto della Vibrazione

**Concetto Base:** La materia solida non è statica. Gli atomi in un reticolo cristallino sono in costante vibrazione.

- **Il Quasiparticella:** Il **Fonone** (**p**) è il **quanto di energia vibrazionale** del reticolo cristallino. È una *quasiparticella* – non è una particella fondamentale come l'elettrone, ma è un'entità che si comporta come una particella per descrivere il movimento collettivo e l'energia quantizzata del reticolo.
- **Analogie:** Proprio come l'energia elettromagnetica è quantizzata in **Fotoni** (quantizzazione dell'onda luminosa), l'energia vibrazionale è quantizzata in **Fononi** (quantizzazione dell'onda sonora o termica).
- **Ruolo Fisico:** I Fononi sono responsabili di molte proprietà macroscopiche dei solidi, in particolare il **calore specifico** e la **conducibilità termica**.

## II. La Dispersione dei Fononi: Acustici vs. Ottici

La **Relazione di Dispersione** descrive come l'energia (E), o frequenza ω delle vibrazioni dipende dal loro vettore d'onda (**k**), che è correlato alla quantità di moto.

**La Curva ω(k)**

In un cristallo con P atomi nella cella unitaria, ci sono 3P modi vibrazionali per ogni **k**:

$$\omega = f(\mathbf{k})$$

Questo si traduce in **3 rami Acustici** e **3P - 3 rami Ottici**.

1. **Rami Acustici (3 modi):**
    - **Movimento:** Atomi nella cella unitaria che si muovono **in fase**.
    - **Caratteristica:** Per {k \to 0} (lunghezza d'onda infinita), la frequenza vibrazionale \omega \to 0. Questo descrive le onde sonore classiche (da cui il nome *acustici*).
    - **Ruolo:** Trasporto di massa e calore (calore specifico a basse temperature).
2. **Rami Ottici (3P - 3 modi):**
    - **Movimento:** Atomi nella cella unitaria che si muovono **in opposizione di fase**.
    - **Caratteristica:** Per k \to 0, la frequenza vibrazionale \omega è finita e non zero (corrispondente alle frequenze della luce IR, da cui il nome *ottici*).
    - **Ruolo:** Sono responsabili dell'interazione con la luce e della polarizzazione del reticolo (Fononi Ottici).

**IIIa. Spettroscopia Fononica: IR e Raman**

Le spettroscopie a vibrazione sono le nostre finestre sul mondo dei fononi. Entrambe misurano i **fononi ottici**, ma con regole di selezione diverse.

**A. Spettroscopia all'Infrarosso (IR)**

- **Meccanismo: Assorbimento diretto** del fotone. Il fotone interagisce con il campo elettrico del fonone.
- **Regola di Selezione:** Il fonone deve produrre un **cambiamento nel momento di dipolo elettrico** netto della cella unitaria.
- **Fisica:** Se la vibrazione sposta le cariche positive e negative in direzioni opposte, è **attiva all'IR**.

**B. Spettroscopia Raman**

- **Meccanismo: Scattering anelastico** del fotone. L'interazione avviene con la nuvola elettronica del fonone.
- **Regola di Selezione:** Il fonone deve produrre un **cambiamento nella polarizzabilità** del reticolo cristallino.
- **Fisica:** Se la vibrazione distorce o deforma la nuvola elettronica (cambiando la sua "deformabilità"), è **attiva al Raman**.

**III.b. Fononi e Conducibilità Termica: Processi N e U**

Nei materiali dielettrici e semiconduttori (come i cristalli usati nei tuoi esperimenti), la **Conducibilità Termica (**k**)** non è dominata dagli elettroni, ma dal trasporto di energia operato dai **Fononi Acustici**. La capacità di un solido di condurre il calore è inversamente proporzionale alla **resistenza termica**, che è determinata dalla frequenza con cui i fononi si scontrano e si disperdono.

Le collisioni tra fononi che limitano la loro corsa libera si dividono in due classi fondamentali:

**1. Processi Normali (N-Processes)**

- **Definizione:** Sono collisioni in cui l'energia e il **vettore d'onda totale** ($\mathbf{k}$) dei fononi sono conservati, simili alla conservazione della quantità di moto.

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4$$

- **Effetto:** I processi N ridistribuiscono l'energia fononica all'interno del reticolo senza impedirne il flusso totale. Poiché non offrono resistenza al flusso netto di energia, **non limitano la conducibilità termica** del cristallo.

**2. Processi Umklapp (U-Processes)**

- **Definizione:** Sono collisioni in cui l'energia è conservata, ma la somma dei vettori d'onda iniziali **esce dalla prima zona di Brillouin**. Per soddisfare le condizioni di periodicità del reticolo, questa eccedenza viene "riportata indietro" da un **vettore di reticolo reciproco ($\mathbf{G}$)**.

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 + \mathbf{G}$$

- **Ruolo Chiave:** Il vettore $\mathbf{G}$ agisce come una "frenata" che inverte la direzione del flusso di energia. I processi Umklapp sono quindi il meccanismo primario che genera **resistenza termica** nel cristallo.
- **Dipendenza dalla Temperatura:** La probabilità di un processo Umklapp richiede che i fononi abbiano un'energia sufficiente (alta temperatura) per uscire dalla prima zona di Brillouin. Per questo motivo, la conducibilità termica dei solidi **diminuisce drasticamente** all'aumentare della temperatura a causa della crescente frequenza delle collisioni Umklapp.

## IV. I Fononi e i WIMPs: La Caccia alla Materia Oscura

Questo è il **tema** che collega la fisica del reticolo alla cosmologia.

**Le WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles)**

- **Ipotesi:** Le WIMPs sono le principali candidate per la **Materia Oscura** (che costituisce circa l'85% della massa dell'universo). Sono particelle massicce che interagiscono con la materia ordinaria (barionica) **solo** attraverso la gravità e la forza nucleare debole.
- **La Sfida:** Rilevare un'interazione così debole è estremamente difficile, poiché produce un'energia di *recoil* (rimbalzo) infinitesimale.

**I Fononi come Segnale di Rilevamento (vedi anche Appendice)**

Nei rivelatori di materia oscura di ultima generazione (come CDMS o EDELWEISS), si utilizzano cristalli ultrapuri raffreddati a temperature prossime allo zero assoluto (es. 10 mK):

1. **Interazione:** Una WIMP che attraversa il rivelatore **colpisce un nucleo atomico** nel cristallo.
2. **Trasferimento di Energia:** L'energia cinetica dell'urto (il *recoil* nucleare) è bassissima, ma è sufficiente a eccitare il reticolo cristallino, **generando una cascata di Fononi Acustici (fononi termici)**.

3. **Rilevamento:** Questi fononi si propagano attraverso il cristallo e vengono raccolti da sensori (chiamati *calorimetri a transizione di fase*) che misurano l'aumento di temperatura del cristallo. L'energia dei fononi è quindi la **firma termica** dell'interazione WIMP-nucleo.

**Conclusione:** I Fononi, le vibrazioni quantizzate del reticolo cristallino, sono molto più che semplici quanti di energia termica; sono quasiparticelle fondamentali la cui analisi rigorosa è essenziale per comprendere le proprietà termiche, elastiche e ottiche dei materiali. L'analisi della Dispersione e la Spettroscopia Fononica (IR e Raman) forniscono i metodi per mappare e interrogare queste eccitazioni in modo preciso. I fononi sono anche le quasiparticelle che supportano la conduzione termica nei dielettrici. Il punto culminante di questo studio risiede nella capacità del fonone di agire come trasduttore energetico universale. Negli esperimenti moderni di fisica di frontiera, i fononi generati dal rinculo nucleare a seguito di un'ipotetica collisione con una WIMP sono il segnale termico primario. In sintesi, la corretta comprensione della dinamica quantistica dei solidi a livello di fononi è indispensabile per la caratterizzazione dei materiali avanzati e, in modo sorprendente, per affrontare le domande più profonde sulla composizione e struttura non visibile del nostro Universo.

**Appendice**

Non è stato trovato alcun segnale conclusivo e universalmente accettato dell'esistenza delle WIMPs.Se il segnale fosse stato trovato, già  si sarebbe già riscritto il Modello Standard della Fisica delle Particelle. Tuttavia, la ricerca ha portato a risultati molto importanti che hanno ridefinito la nostra comprensione della Materia Oscura.

**L'Assenza di Rilevamento e i Limiti Stabiliti;**

Il panorama dei risultati è dominato dagli esperimenti di Rilevamento Diretto, come quelli che utilizzano cristalli ultrafreddi per misurare i fononi o la luce di scintillazione in liquidi nobili (Xenon o Argon).

**Limiti Estremamente Stringenti:**

Esperimenti di punta, come XENONnT (ai Laboratori del Gran Sasso dell'INFN), hanno raggiunto una sensibilità senza precedenti. Questi esperimenti non hanno trovato interazioni coerenti con le WIMPs nella maggior parte dell'intervallo di massa e sezione d'urto previsto dai modelli teorici (come la Supersimmetria).

**Esclusione del "WIMP Miracle":**

L'assenza di segnale ha costretto i fisici a escludere gran parte dello "spazio dei parametri" in cui le WIMPs erano più attese. Ciò significa che le WIMPs, se esistono, devono avere una massa o una sezione d'urto di interazione molto diverse da quelle inizialmente previste.

**I Segnali Ambigui e Non Conclusivi:**

Esiste un segnale storico che ha creato un grande dibattito, ma che non è mai stato universalmente accettato come prova dell'esistenza delle WIMPs. Questo è il Segnale di DAMA/LIBRAIl. L'esperimento DAMA/LIBRA (anch'esso ai Laboratori del Gran Sasso) utilizza cristalli di Ioduro di Sodio e riporta di aver rilevato una modulazione annuale nel tasso di eventi. Questa modulazione (il

segnale è più forte in estate e più debole in inverno) è esattamente ciò che ci si aspetterebbe se la Terra si muovesse attraverso un alone di Materia Oscura galattica.  La controversia risiede nel fatto che nessun altro grande esperimento (come XENONnT, LZ, o PANDA-X), utilizzando rivelatori e bersagli diversi, è riuscito a confermare il segnale di DAMA. Questi altri esperimenti hanno escluso con grande sensibilità le interazioni WIMP nell'intervallo di massa che dovrebbe spiegare il segnale DAMA. Quindi DAMA vede un segnale, ma gli esperimenti più sensibili che dovrebbero vederlo ancora meglio (o escluderlo) non lo fanno. Questo suggerisce che il segnale di DAMA potrebbe essere dovuto a un fenomeno ancora sconosciuto legato al rivelatore o a un'interazione con la Materia Oscura diversa dalle WIMPs convenzionali. A causa di questi risultati negativi, la ricerca si sta spostando su candidati meno massivi e più esotici, tra cui:Assioni e ALPs (Axion-Like Particles): Sono particelle molto più leggere delle WIMPs.

**Materia Oscura leggera:**

Intervalli di massa inferiori a 1 GeV (massa del protone), che i rivelatori tradizionali WIMP non riescono a coprire in modo efficace. In definitiva, la caccia continua, ma il modello WIMP standard è in profonda crisi.

**Ringraziamenti**
L’autrice ringrazia **Gemini (Modello Linguistico di Google)** per la sua assistenza nella strutturazione della lezione, per la revisione dei concetti di base della fisica dello stato solido e della cosmologia, e per il supporto nella verifica dello stato attuale degli esperimenti WIMP.