







Rivelatori a induttanza cinetica per neutrini e materia oscura

Chiara Bellenghi Sapienza Università di Roma

IFAE 2019 – XVIII edizione degli Incontri di Fisica delle Alte Energie Napoli, 8 aprile 2019

Kinetic Inductance Detectors

- KID: rivelatore superconduttore di particelle (T ~ 10 - 300 mK)
- Applicazioni:
 - CMB (astrofisica)
 - Rinculi nucleari (neutrini e materia oscura)
 - Sviluppo di qubit (inf. quant.)
 - ..
- Caratteristiche:
 - Raggiunge eccellenti risoluzioni energetiche
 - Facilità di multiplexing
 - Design e fabbricazione dei sensori semplici





2

Chiara Bellenghi

Principio di funzionamento di un KID

Induttanza cinetica, L_k: impedenza AC che tiene conto dell'inerzia delle coppie di Cooper nel superconduttore.





Principio di funzionamento di un KID

Induttanza cinetica, L_k: impedenza AC che tiene conto dell'inerzia delle coppie di Cooper nel superconduttore.





Trasmissione attraverso il risonatore LC eccitato con un segnale di microonda (f~GHz).



Decadimento 0vββ



I neutrini sono particelle di Majorana o di Dirac?

L'unica strada ad oggi tentata per trovare la risposta è la ricerca del decadimento doppio beta senza emissione di neutrini ($0v\beta\beta$).



Solo alcuni isotopi decadono ββ senza emettere neutrini: ¹³⁰Te, ⁷⁶Ge, ¹³⁶Xe,¹⁰⁰Mo,⁸²Se, ...

Per la rivelazione è necessario avere fondo nullo.

Chiara Bellenghi

IFAE 2019, Napoli

CUORE (@LNGS) Presa dati in corso 988 bolometri di TeO₂ $V_{bol} = 5x5x5 \text{ cm}^3$ 206 kg ¹³⁰Te T = 10 mK



Il fondo residuo è dovuto alle contaminazioni da particelle α.



Il <u>fondo residuo</u> è dovuto alle contaminazioni da particelle α . <u>Reiezione del fondo</u> sfruttando la luce Čerenkov emessa dalle β e non dalle α .



Il <u>fondo residuo</u> è dovuto alle contaminazioni da particelle α . <u>Reiezione del fondo</u> sfruttando la luce Čerenkov emessa dalle β e non dalle α .

Serve un rivelatore di luce in grado di risolvere a 50 RMS un segnale di 100 eV.

Chiara Bellenghi

IFAE 2019, Napoli

Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².



Chiara Bellenghi

- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².



- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².
- Per arrivare a coprire vari cm² di superficie: rivelazione indiretta del segnale sfruttando i fononi come mediatori.



- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².
- Per arrivare a coprire vari cm² di superficie: rivelazione indiretta del segnale sfruttando i fononi come mediatori.

Assorbitore in silicio (5x5 cm² x 300 µm)





Chiara Bellenghi

IFAE 2019, Napoli

- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².
- Per arrivare a coprire vari cm² di superficie: rivelazione indiretta del segnale sfruttando i fononi come mediatori.



- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².
- Per arrivare a coprire vari cm² di superficie: rivelazione indiretta del segnale sfruttando i fononi come mediatori.



- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².
- Per arrivare a coprire vari cm² di superficie: rivelazione indiretta del segnale sfruttando i fononi come mediatori.



- Goal: Sviluppo di rivelatori di luce basati sui KID con σ_E < 20 eV RMS e area attiva di 5x5 cm².
- Eccitando il KID a frequenze ~GHz, si limita la sua massima l'area attiva a qualche mm².
- Per arrivare a coprire vari cm² di superficie: rivelazione indiretta del segnale sfruttando i fononi come mediatori.



Risposta del detector



- Il superconduttore assorbe l'eccitazione.
- La risonanza ne risulta modificata in fase e ampiezza \rightarrow doppio segnale: $\delta \phi$ e δa .





- Risultati della combinazione dei segnali in fase e ampiezza: risoluzione sulla linea di base: 80 eV RMS.
- Indipendenza dalla temperatura fino a 200 mK ($T_c = 1.2$ K).

Chiara Bellenghi

IFAE 2019, Napoli

Performance AITiAI KID





IFAE 2019, Napoli

dell'alluminio)

Conclusioni e piani per il futuro

- 2017: Raggiunta la risoluzione energetica di 80 eV RMS con un prototipo in alluminio su substrato di 2x2 cm².
- 2018: raggiunto la risoluzione energetica di 25 eV RMS con un prototipo in AlTiAl su substrato di 2x2 cm².
- Oggi: test di prototipi su substrati di 5x5 cm².



Chiara Bellenghi

IFAE 2019, Napoli

Interazioni di materia oscura



Coherent Elastic v-Nucleus Scattering

- 2017: Osservato per la prima volta dalla collaborazione COHERENT (Akimov et al, Science 357 (2017) 1123).
- Oggi: Ricerche di nuova fisica tramite misure di precisione della sezione d'urto.



Coherent Elastic v-Nucleus Scattering

- 2017: Osservato per la prima volta dalla collaborazione COHERENT (Akimov et al, Science 357 (2017) 1123).
- Oggi: Ricerche di nuova fisica tramite misure di precisione della sezione d'urto.
- Si può pensare di usare sorgenti di bassa energia come il ⁵¹Cr (GALLEX).
- Per un futuro esperimento:
 - ~ 1 kg di detector
 - Energia di soglia < 20 eV



Chiara Bellenghi

BULLKID: KIDs array per CEvNS e materia oscura

- Goal: Sviluppo di rivelatori di fononi prodotti dai rinculi nucleari indotti da scattering di materia oscura o neutrini.
- Rivelatori basati sulla tecnologia sviluppata in CALDER.



BULLKID: KIDs array per CEvNS e materia oscura

- Goal: Sviluppo di rivelatori di fononi prodotti dai rinculi nucleari indotti da scattering di materia oscura o neutrini.
- Rivelatori basati sulla tecnologia sviluppata in CALDER.

neutrino

/DM



neutrino

5x5x5 mm³ voxel

СЛ

mm

3"

top view

bottom view

Substrato spesso 5 mm: KIDs e feedline su un lato; l'altro lato è tagliato in modo da ottenere ~110 voxel cubici.

/DM

 \blacktriangleright 0,29 g / voxel \rightarrow **32 g** di massa totale

Chiara Bellenghi

IFAE 2019, Napoli

In vista di un esperimento...

Per un possibile futuro esperimento servirebbe

~ 1 kg di rivelatore.

In vista di un esperimento...

Per un possibile futuro esperimento servirebbe ~ **1 kg** di rivelatore.

BULLKID potrebbe:

- Aumentare lo spessore del substrato a 1 cm
- Impilarne il numero necessario ad ottenere la massa attiva desiderata



In vista di un esperimento...

Per un possibile futuro esperimento servirebbe ~ **1 kg** di rivelatore.

BULLKID potrebbe:

- Aumentare lo spessore del substrato a 1 cm
- Impilarne il numero necessario ad ottenere la massa attiva desiderata



Intanto...

2019: Sviluppo di un prototipo spesso 5 mm che riproduca le performance ottenute in CALDER: <u>energia di soglia di 100 eV e</u> <u>risoluzione di 20 eV RMS.</u>



Backup

Phonon efficiency



Rivelazione del segnale mediato dai fononi:

- Pro: i fononi si propagano per ~cm
- Contro: l'efficienza di rivelazione è più bassa che nell'assorbimento diretto

Per recuperare un po' di sensibilità si depositano diversi KID sullo stesso substrato.

La risoluzione energetica scala con il numero di KID:



Phase energy resolution

Risoluzione energetica per la risposta in fase nel caso di rumore dell'amplificatore criogenico dominante:

$$\sigma_E = \frac{2Q_c}{\underline{Q}} \frac{2\Delta_0 N_0 V}{\eta \, \underline{L}_k / \underline{L} \, \underline{Q} S_2(\omega_0, T)} \sqrt{\frac{k_B T_N}{\underline{P}_{in} \tau_{\underline{qp}}}}$$

- L_k/L è la frazione di induttanza cinetica e per l'alluminio è ~ 2.5%
- τ_{qp} è il tempo di ricombinazione delle quasiparticelle
- T_N è la temperatura di noise dell'amplificatore criogenico
- P_{in} è la potenza della microonda in ingresso



Chiara Bellenghi

CEvNS - Sezione d'urto

La sezione d'urto del CEvNS è prevista nel MS ed è di gran lunga la più alta tra le interazioni di neutrino.

$$\frac{d\sigma(E_{\nu})}{dT} = \frac{G_F^2}{4\pi} Q_w^2 M_A \left(1 - \frac{M_A T}{2E_{\nu}^2}\right) F(q^2)^2$$

- G_F è la costante di accoppiamento di Fermi
- ► Q_w = N Z (1 4sin²θ_w) ~ N do/dT scala con il numero di neutroni al quadrato.
- M_A è la massa nucleare
- T è l'energia di rinculo nucleare
- \blacktriangleright E_v è l'energia del neutrino incidente
- F(q²) è il fattore di forma nucleare (~ 1) Chiara Bellenghi IFAE 2019, Napoli

