



Laboratori Nazionali di Frascati

INFN-18-09-LNF

September 18, 2018

The KLASH – Letter of Intent

D.Alesini¹, D.Babusci¹, F.Bossi¹, P.Ciambrone¹, G.Corcella¹, D.Di Gioacchino¹, P.Falferi², C.Gatti¹,
A.Ghigo¹, G.Lamanna³, C.Ligi¹, G.Maccarrone¹, A.Mirizzi⁴, D.Montanino⁵, D.Moricciani¹,
A.Mostacci⁶, E.Nardi¹, A.Paoloni¹, L.Pellegrino¹, A.Rettaroli¹, R.Ricci¹, L.Sabbatini¹, S.Tocci¹.

¹ Laboratori Nazionali di Frascati - INFN

² TIFPA e FBK

³ Università di Pisa e INFN Sezione Pisa

⁴ Università “Aldo Moro” e INFN Sezione Bari

⁵ Università del Salento e INFN Sezione Lecce

⁶ Università “La Sapienza” e INFN Sezione Roma1

Abstract

Con questo documento proponiamo di effettuare una ricerca di assioni galattici nell'intervallo di massa tra 0.3 e 1 μeV usando una cavità risonante con un volume di circa 33 m³ raffreddata a circa 4 K ed immersa in un campo magnetico di 0.6T generato dal magnete superconduttore costruito per l'esperimento KLOE situato ai Laboratori Nazionali di Frascati. Questo esperimento, chiamato KLASH (KLoe magnet for Axion Search), avrebbe la sensibilità necessaria ad osservare assioni QCD predetti dal modello KSVZ [1]. Nel seguito descriviamo brevemente il caso scientifico, l'apparato sperimentale e diamo una stima dei costi e dei tempi necessari alla realizzazione del progetto.

Caso Scientifico

L'assione è una particella pseudoscalare predetta da S.Weinberg [2] e F.Wilczek [3] come conseguenza del meccanismo introdotto da R.D.Peccei e H.Quinn [4] per risolvere lo "Strong CP Problem". Assioni con massa dell'ordine del μeV sono ottimi candidati a costituire la Materia Oscura. La ricerca di assioni galattici mediante "Haloscopes", cavità risonanti immerse in forti campi magnetici, è una tecnica ben consolidata proposta da P.Sikivie [5]. Attualmente, un solo esperimento, ADMX [6], ha raggiunto la sensibilità per sondare l'esistenza di assioni galattici nella regione di masse inferiori al meV .

Assumendo che la densità locale di Materia Oscura, $\rho_a = 0.45 \text{ GeV}/\text{cm}^3$, sia dovuta agli assioni e che la frequenza di risonanza della cavità ν_c sia uguale alla massa dell'assione m_a , la potenza dovuta alla conversione degli assioni in cavità è data da:

$$P_{sig} = \left(g_\gamma^2 \frac{\alpha^2 \hbar^3 c^3 \rho_a}{\pi^2 \Lambda^4} \right) \times \left(\frac{\beta}{1 + \beta} \frac{\omega_c}{\mu_0} B_0^2 V C_{mnl} Q_L \right)$$

dove α è la costante di struttura fine, μ_0 la permeabilità del vuoto, $\Lambda=78 \text{ MeV}$, e g_γ è la costante di accoppiamento tra fotoni e assioni pari a 0.97 nel modello KSVZ. Nella seconda parentesi, β è l'accoppiamento tra cavità e antenna, B_0 l'intensità del campo magnetico, V il volume della cavità, C_{mnl} è pari a circa 0.5, e Q_L il fattore di merito "loaded". Invece della costante g_γ si è soliti riferirsi alla costante $g_{a\gamma\gamma} = \left(\frac{g_\gamma \alpha}{\pi \Lambda^2} \right) m_a$.

Poiché i segnali aspettati sono dell'ordine di 10^{-22} W la cavità deve essere raffreddata a temperatura criogenica e occorre utilizzare amplificatori criogenici a basso rumore.

Come descritto in maggior dettaglio nel paragrafo seguente, KLASH prevede la costruzione di un criostato all'interno del magnete di KLOE contenente una cavità in rame di volume pari a circa 33 m^3 e frequenza di risonanza di circa 70 MHz. Nonostante il valore non elevato del campo magnetico, 0.6T, grazie al grande volume e all'elevato fattore di merito ottenibile con rame a 4 K a queste frequenze ($Q \approx 600,000$), ci aspettiamo una potenza emessa confrontabile a quella aspettata da ADMX che opera con un campo di 7.6T, volume $V=0.2 \text{ m}^3$ e fattore di merito $Q \approx 200,000$ a frequenze intorno ai 600 MHz. In Fig.1 riportiamo nel piano $g_{a\gamma\gamma}$ vs m_a le stime per le bande di esclusione (90% CL) per tre fasi successive di KLASH discusse nel paragrafo successivo. La banda diagonale gialla corrisponde alla regione predetta per gli assioni nei modelli KSVZ e DFSZ. Altri modelli di assioni QCD predicono la regione grigia, sotto la linea diagonale tratteggiata. Attualmente, nella regione sotto 1 meV solo ADMX, e parzialmente HAYSTAC, ha la sensibilità per sondare la regione predetta per gli assioni QCD.

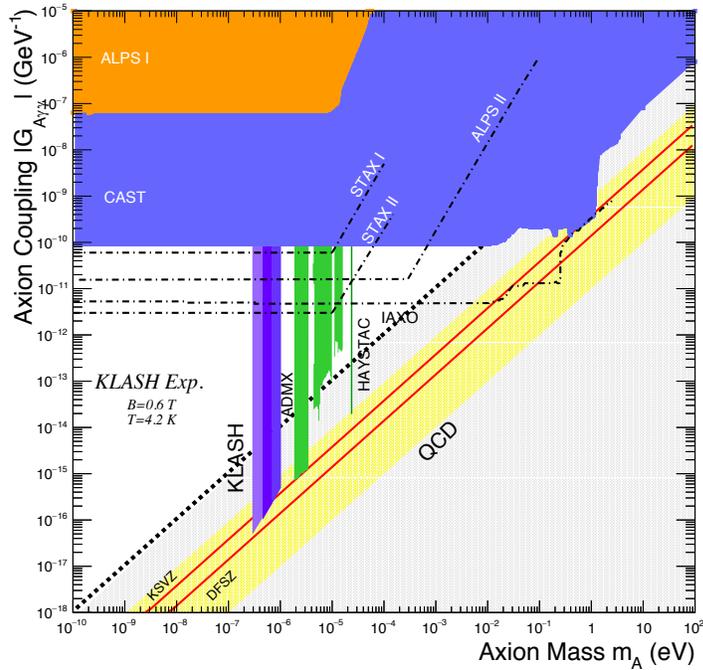


Figure 1: Banda di esclusione (90% CL) per le tre fasi di KLASH.

Descrizione dell'Esperimento

Il progetto preliminare del criostato e cavità di KLASH è mostrato schematicamente in figura 1 e 2. Il disegno stondato della parete esterna del criostato (in blu) è determinato dalla necessità di compensare la differenza di pressione di 1 bar tra esterno e interno. Tra la parete esterna, a 300 K, e la cavità che opererà a 4.5 K si trova uno schermo a 70 K. Il volume finale della cavità è di circa 33 m^3 . Allo stato attuale la parete esterna pesa 7.6 Ton, lo schermo a 70 K 2.5 Ton e la cavità 5 Ton.

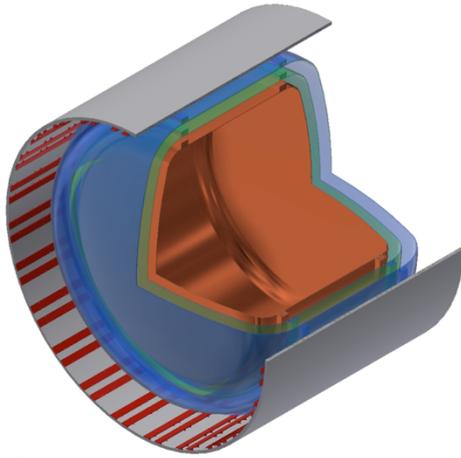


Figure 2: Spaccato del rivelatore. In blu la parete esterna, in verde lo schermo a 70 K e in marrone la cavità di rame.

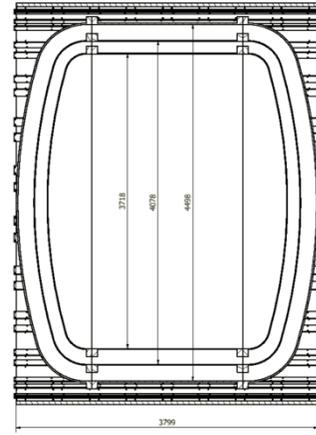


Figure 3: Diametri e lunghezze del criostato.

L'impianto di refrigerazione utilizzato per KLOE ha una capacità di refrigerazione di 99 W a 4.5 K mentre il carico dovuto al magnete di KLOE è di 55 W [7]. Questo sovradimensionamento dell'impianto era necessario per raffreddare contemporaneamente i magneti di KLOE e FINUDA oltre ai compensatori di KLOE. I rimanenti 45 W sono sufficienti per il raffreddamento del criostato e cavità. KLOE si trova attualmente nella KLOE Assembly Hall, accanto all'edificio di DAFNE. Qui sono disponibili o potranno trovare collocazione tutte le infrastrutture per il disassemblaggio del rivelatore e l'assemblaggio del criostato e cavità e per le operazioni di presa dati.

Per amplificare un segnale a frequenza fino a 100 MHz utilizzeremo uno SQUID. Lavorando a 4 K è possibile ottenere una temperatura di rumore $T_N=1.7K$ [8]. A frequenze più alte si possono usare Microstrip SQUID Amplifiers come quello usato in ADMX [9]. Inoltre, raffreddando lo SQUID a 300 mK con un refrigeratore a evaporazione di 3He la temperatura di rumore scende linearmente fino a $T_N \approx 300$ mK.

Nelle figure 4, 5 e 6 sono mostrati i risultati delle simulazioni ANSYS HFSS. Senza tuning-rods (barre di sintonizzazione) il modo TM_{010} della cavità ha una frequenza di 64 MHz e un fattore di merito di 750,000. La stima è ottenuta per una cavità a 4 K assumendo che il rapporto tra la resistività a 4 K e a 300 K sia $RRR=25$ (rame molto puro può avere $RRR=1000$). Per modificare la frequenza di risonanza e sintonizzarsi su diversi valori della massa dell'assione, la soluzione più semplice comporta l'utilizzo di tuning-rods in metallo. Nelle figure 5 e 6 è mostrato come variano la frequenza e il fattore di merito al variare della posizione radiale delle barre (in rosso per 2 barre da 300 mm di raggio e in blu barre da 100 mm di raggio).

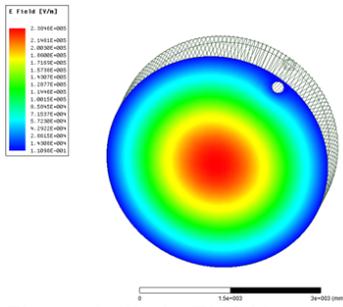


Figure 4: Modo TM010 e tuning rod.

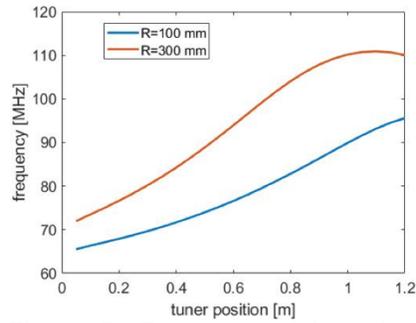


Figure 5: Frequenza del modo al variare della posizione radiale di due tuning rods.

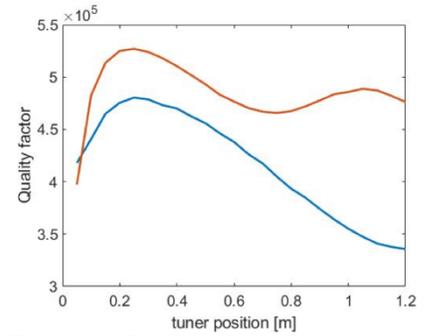


Figure 6: Fattore di merito al variare della posizione radiale di 2 tuning rods.

Per ottenere il plot di esclusione in figura 1, abbiamo stimato la variazione del fattore di merito con la frequenza in base alle formule per una cavità cilindrica e alla resistenza superficiale del rame con RRR=25, e riscaldando il valore a 70 MHz a quello ottenuto dalla simulazione in presenza di tuning-rods. Il risultato è mostrato in figura 7.

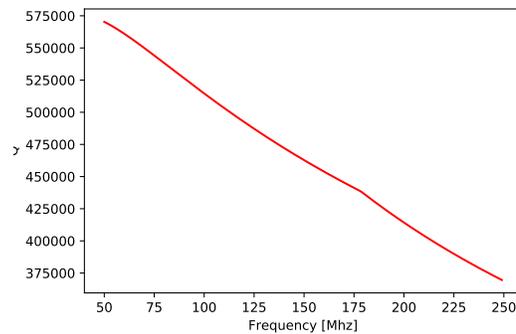


Figure 7: Stima della variazione del fattore di merito con la frequenza.

Con un sistema di sintonizzazione basato su due tuning-rods è possibile variare la frequenza del 30-40%. Una soluzione per arrivare a frequenze e quindi masse più alte è quella di sostituire la cavità con una di dimensioni minori. In figura 1 abbiamo ipotizzato 3 fasi con 3 cavità di raggio rispettivamente circa 1.9m, 1.2m e 0.9m, con periodi di presa dati di circa un anno equivalente per ogni fase. In questo modo si arriverebbe a investigare la regione degli assioni KSVZ per masse tra 0.3 e 1 μeV corrispondenti alla regione tra 70-250 MHz.

Costi, Calendario e Risorse

Riportiamo di seguito la descrizione dei task necessari alla scrittura di un CDR, in un tempo di circa 1 anno a partire da ottobre 2018.

WP 1 - Progetto meccanico:

Task1.1: progettazione *preliminare* del criostato, definizione dei componenti meccanici principali di parete esterna, schermo di radiazione, cavità RF e torretta criogenica per l'interfacciamento con l'impianto criogenico esistente. Simulazioni termomeccaniche. Definizione e progettazione *preliminare* di tutti gli strumenti per lo smontaggio dei rivelatori di KLOE e il successivo montaggio del criostato nello spazio dentro il magnete.

Tempo stimato: 6 mesi. 3 mp (mese persona) del serv. ing. meccanica + 1 mp criogenia

Task 1.2: incarico allo studio di consulenza per la definizione e stesura del progetto *definitivo*.

Tempo stimato: 6 mesi.

Costo: 20 k€ + 5 k€ di missioni. 1 mp del serv. ing. meccanica + 1 mp criogenia.

WP 2 - Criogenia:

Task 2.1: stima di budget di potenza refrigerante richiesta (4K e 70K) per il funzionamento del criostato. Dimensionamento del circuito idraulico all'interno del criostato. Definizione preliminare dei componenti della torretta criogenica e realizzazione del layout idraulico della torretta.

Tempo stimato: 2 mesi. 1 mp criogenia.

Task 2.2: R&D per la realizzazione di un refrigeratore operante a 0.3 K per il funzionamento dello SQUID. Realizzazione di un prototipo con stadio di preraffreddamento ad evaporazione ^4He e stadio freddo ad evaporazione di ^3He .

Tempo stimato: 6 mesi.

Costo: 5 k€. 2 mp criogenia/tecnico meccanico.

WP 3 - Simulazioni RF

Task 3.1: Simulazioni con Ansys HFSS della cavità risonante di KLASH.

Tempo stimato: 3 mesi. 2 mp

Task 3.2: Progettazione e simulazione del sistema di sintonizzazione.

Tempo stimato: 3 mesi. 1 mp

Task 3.3: Scelta componentistica cavità RF.
Tempo stimato: 2 mesi. 1 mp servizio vuoto e RF

WP 4 – Amplificazione del segnale e DAQ

Task 4.1: Definizione del design del dispositivo SQUID e della relativa elettronica per il primo stadio di amplificazione. Individuazione di un costruttore. Definizione del R&D necessario.

Tempo stimato: 8 mesi. 2 mp

Task 4.2: Schema di schermaggio campo magnetico per lo Squid.

Tempo stimato: 2 mesi. 0.5 mp

Task 4.3: Schema successivi stadi di amplificazione criogenica e a caldo.

Tempo stimato: 2 mesi. 0.5 mp

Task 4.4: Schema digitizzazione e acquisizione del segnale.

Tempo stimato: 1 mesi. 0.5 mp

WP5 – Infrastruttura e automazione

Task 5.1: Definizione dei servizi necessari all'esperimento.

Tempo stimato 3 mesi. 0.5 mp

Task 5.2: Definizione schema di controllo e automazione dell'esperimento.

Tempo stimato 2 mesi. 0.5 mp

WP6 – Risultati di Fisica

Task 6.1: Stima della sensibilità dell'esperimento per la ricerca di assioni galattici in base ai risultati delle simulazioni e alle stime del rumore elettronico.

Tempo stimato 2 mesi. 1 mp

Task 6.2: Sensibilità del rivelatore ad altre weakly interacting slim particles (WISPs).

Tempo richiesto 2 mesi. 1 mp

KLASH	YEAR	2018												2019											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Task	WP 1 Progetto Meccanico																								
	T1.1 Progettazione Meccanica																								
	T1.2 Progetto Meccanico Definitivo																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Task	WP 2 Criogenia																								
	T2.1 Progettazione Criogenia																								
	T2.2 R&D 300 mK																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Task	WP 3 Simulazioni RF																								
	T3.1 Progettazione e Simulazione Cavità																								
	T3.2 Progettazione e Simulazione Tuning																								
	T3.4 Componentistica																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Task	WP 4 Amplificazione e DAQ																								
	T4.1 Progetto SQUID																								
	T4.2 Schermaggio Campo Magnetico																								
	T4.3 Amplificazione Secondaria																								
	T4.4 DAQ																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Task	WP 5 Infrastruttura e Automazione																								
	T5.1 Definizione Servizi																								
	T5.2 Schema Controllo e Automazione																								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Task	WP 6 Risultati di Fisica																								
	T6.1 Sensibilità ad Assioni																								
	T6.2 Sensibilità a WISPs																								

Costo Costruzione

Al momento stimabile grossolanamente nell'intervallo 1-2 M€. Sarà oggetto di definizione (entro il 10%) in questo primo anno di attività.

L'articolo con la proposta originale si trova su arXiv [10].

Referenze

1. J. Kim, Phys. Rev. Lett. 43, 103 (1979); M.A. Shifman, A.I. Vainshtein, and V.I. Zakharov, Nucl. Phys. B 166, 493 (1980).
2. S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 40, 223 (1978).
3. F. Wilczek, Phys. Rev. Lett. 40, 279 (1978).
4. R. D. Peccei and H. R. Quinn, Phys. Rev. Lett. 38, 1440 (1977); Phys. Rev. D 16, 1791 (1977).
5. P. Sikivie, Phys. Rev. Lett. 51, 1415 (1983); Phys. Rev. D 32, 2988 (1985).
6. S. Asztalos et al., Phys. Rev. D 64, 092003 (2001).
7. M. Modena LNF-97/046 (IR).
8. C. Hilbert and J. Clarke, J. Low Temp. Phys. 61, 263 (1985).
9. M. Muck et al. Appl. Phys. Lett 78, 967, (2001).
10. D. Alesini et. Al, "The KLASH Proposal", arXiv:1707.06010.