低放射能希釈冷凍機と超伝導検出器

石徹白晃治 (東北大学RCNS)

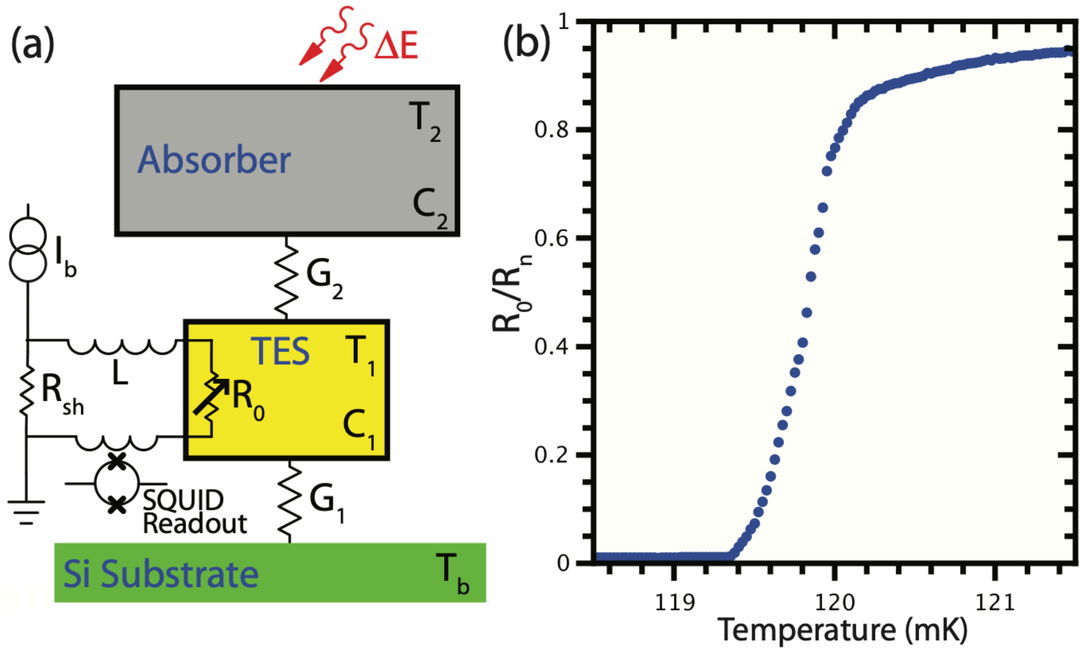
共同研究者: 岸本、細川、Zulfakri、永塚 (東北大)、
美馬 (NICT)、田井野、河村、村山 (埼玉大)、吉田 (大阪大)

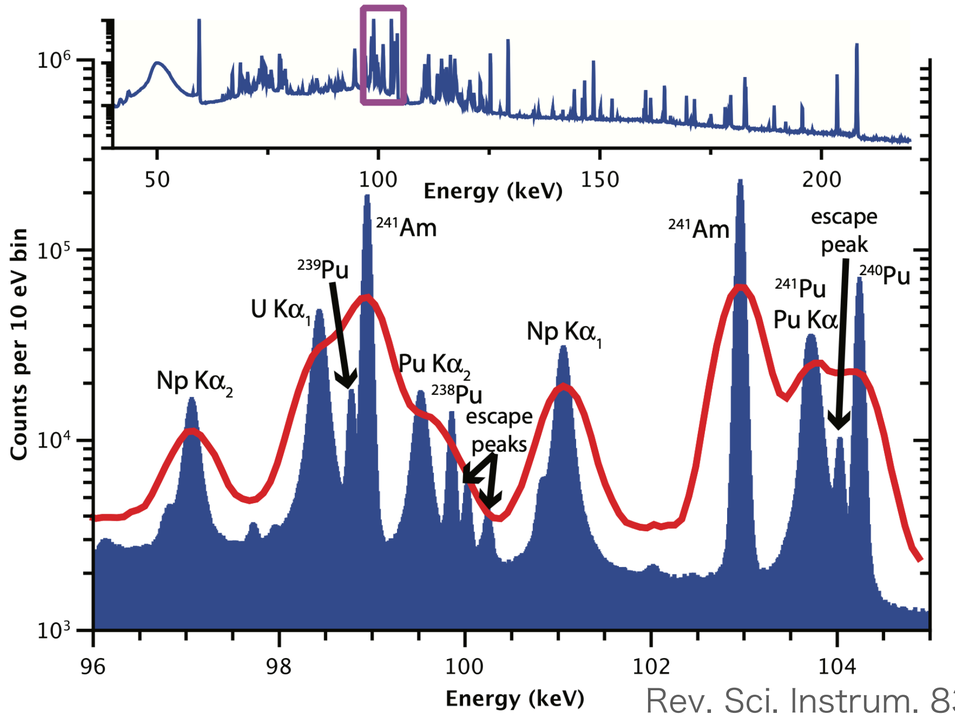
新学術「地下宇宙」2021年領域研究会, 2021年5月19日

低温検出器

計画研究 D02 極低温技術による宇宙素粒子研究の高感度化

本計画研究は、本領域で発展させる低バックグラウンド技術を利用し、計画研究 D01 と協力して、さらに新しく極低温技術を取り込んだ次世代超高感度大型検出装置実現に向けた**極低放射能・極低温・超強磁場環境を神岡地下実験室**において整備し、共通の技術的課題の解決と計測技術開発を推進する。結果として、ニュートリノマヨラナ性検証（項目 A）および暗黒物質探索（項目 B）の高感度化に寄与するとともに、**将来の次世代大型検出器計画の基礎研究と技術的提案**を目指す。





Rev. Sci. Instrum. 83, 093113 (2012)

吸収体 (Absorber)のサイズによって可視光、X線、ガンマ線用検出器を作り分ける

地下実験への応用

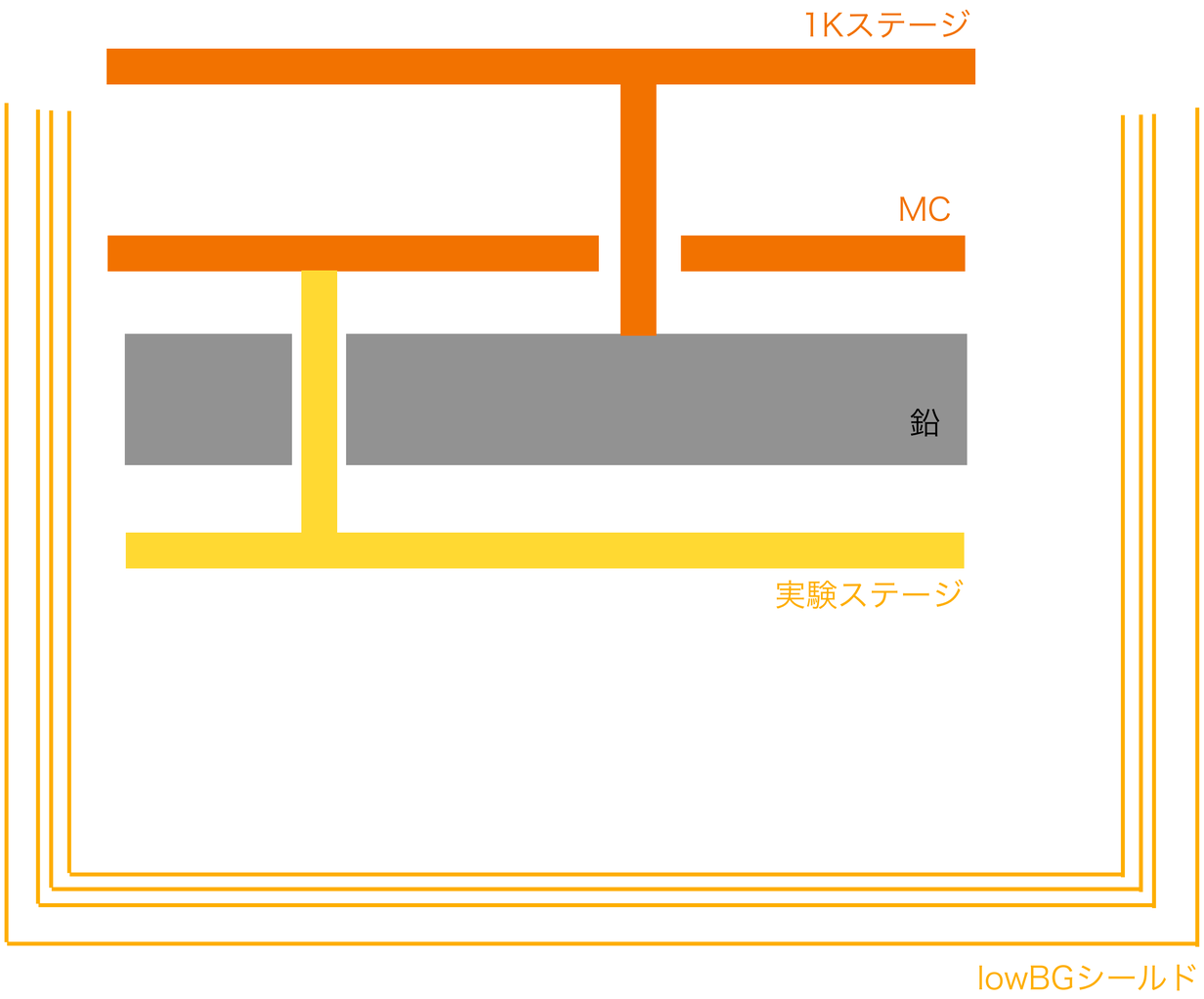
冷凍機の低放射能化

大きな有効体積

-> 低温検出器の多重読み出し

(低エネルギーキャリブレーション)

低放射能冷凍機



lowBGシールド, 実験ステージ
CuC2 (酸素<1ppm, 純度>99.99%)

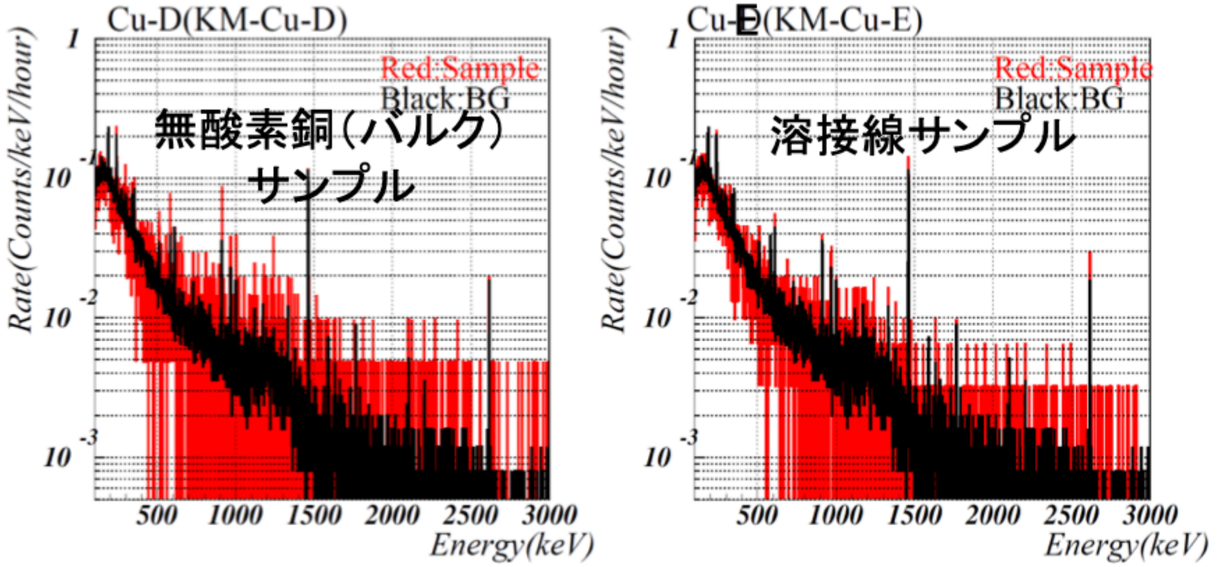
Component/ Material	Mass (kg)	Radioactivity in materials (mBq/kg or mBq/unit*) ^{226}Ra	^{228}Th	^{60}Co	^{40}K	Other radionuclides
Detector holders/PTFE	0.02	<7	<5	<20	<100	^{210}Pb<80
Electrodes/Al	$<3\cdot10^{-5}$	0.27±0.19	1.4±0.2	-	1.1 $\pm^{0.2}_{0.1}$	^{26}Al: 0.38$\pm^{0.19}_{0.14}$
Detector casings/ CuC2 copper[a]	3	0.025 ±0.015	0.033 ±0.016	0.038 ±0.010	<0.39	^{238}U< 1.4, ^{235}U< 0.9 ^{54}Mn: 0.024±0.010[b]

Astroparticle Physics 47 (2013) 1–9

Ge測定

- 素材サンプルのGe測定（@実験室D）

RCNP国際共同利用課題：
希釈冷凍機用極低バックグラウンド遮蔽材サンプルの微量放射能分析



溶接線サンプル

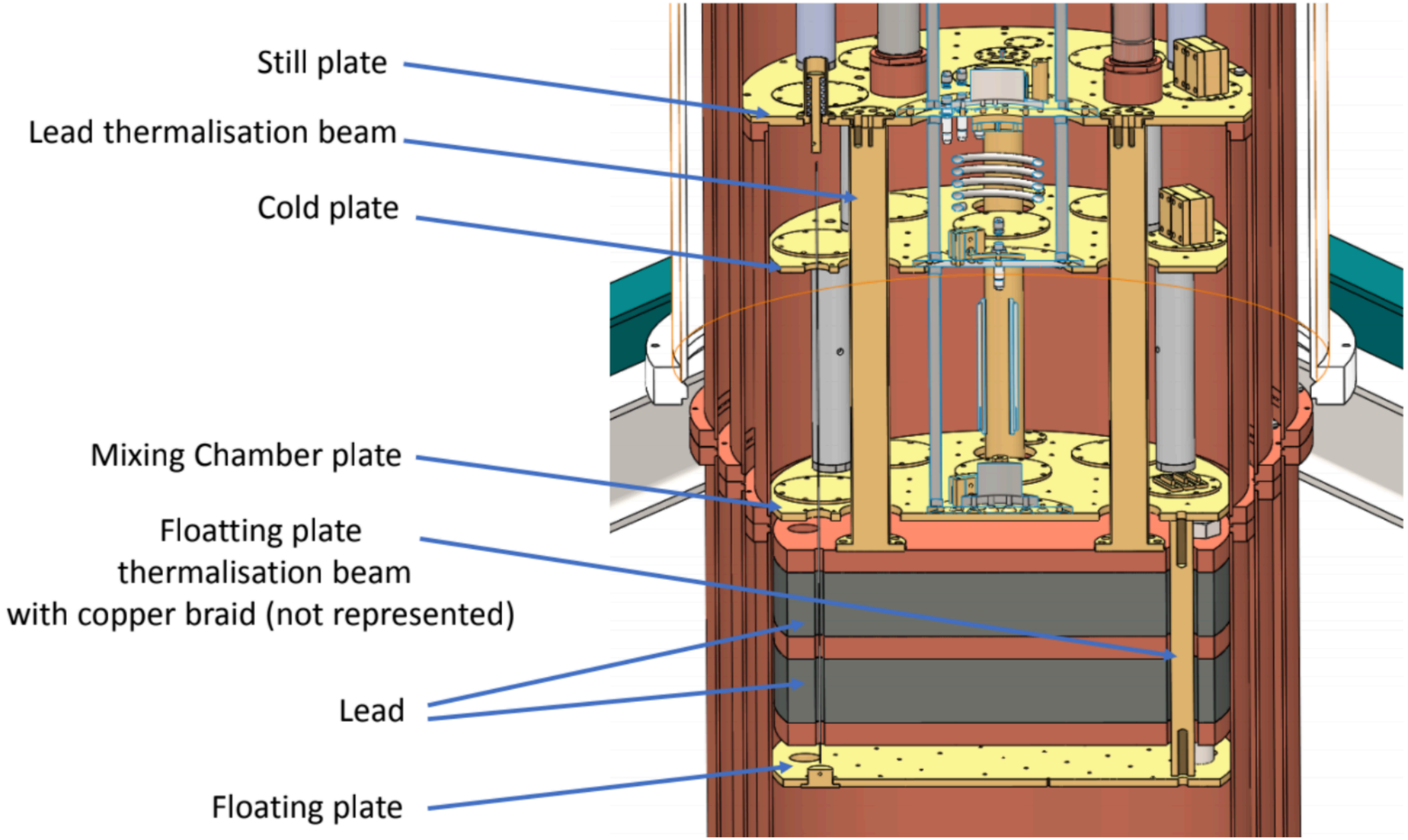


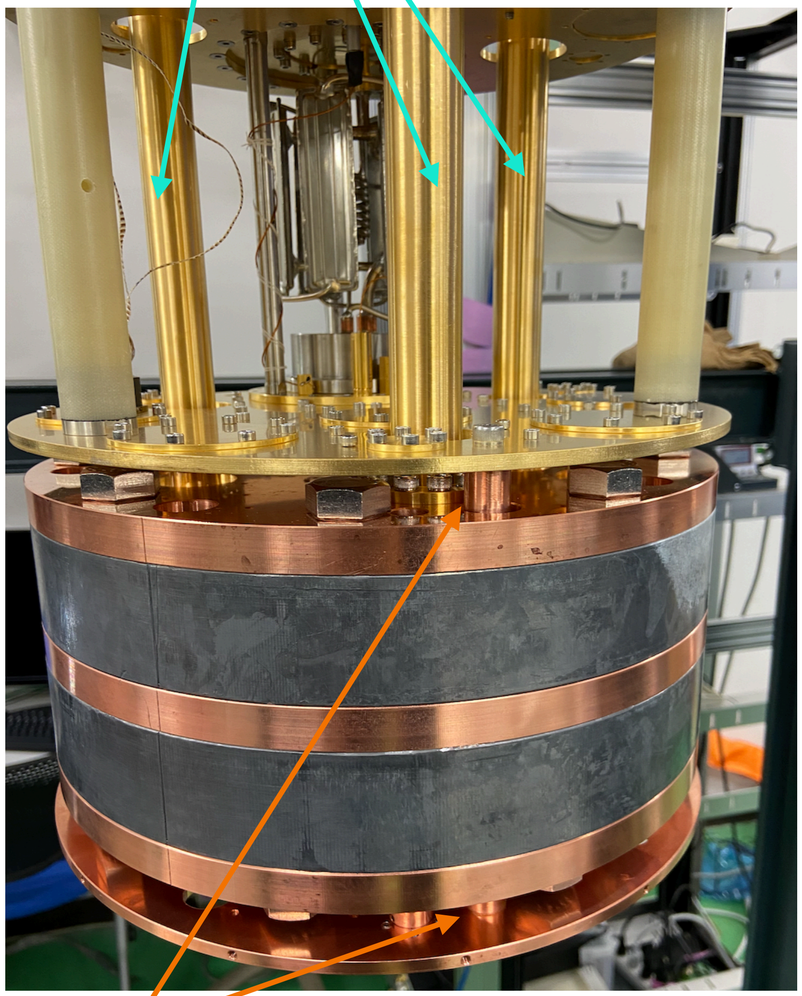
Material	Contamination [mBq/kg]							
	^{238}U	^{226}Ra	^{210}Pb	Th(^{228}Ac)	Th(^{228}Th 以下)	^{40}K	^{137}Cs	^{60}Co
KM-Cu-D(/kg)	131 ± 86	< 4.7	—	< 8.6(10.3 ± 6.0)	5.2 ± 3.2	< 38	< 2.0	< 1.7
KM-Cu-E(/サンプル)	< 83	< 2.4(10±8)	—	< 4.2 (3.8 ± 3.6)	< 3.5 (11 ± 8)	< 24	< 0.8	< 0.9

「第七回極低放射能技術」の吉田さんスライドより

インストール

Fridge after upgrade

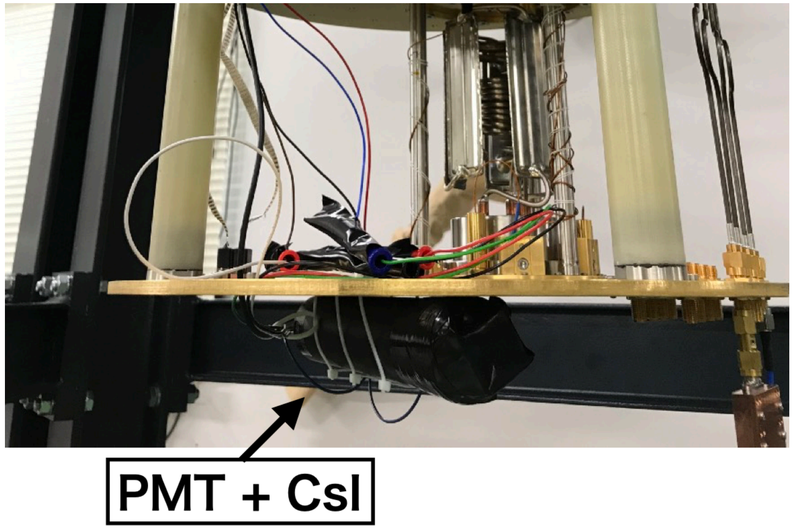


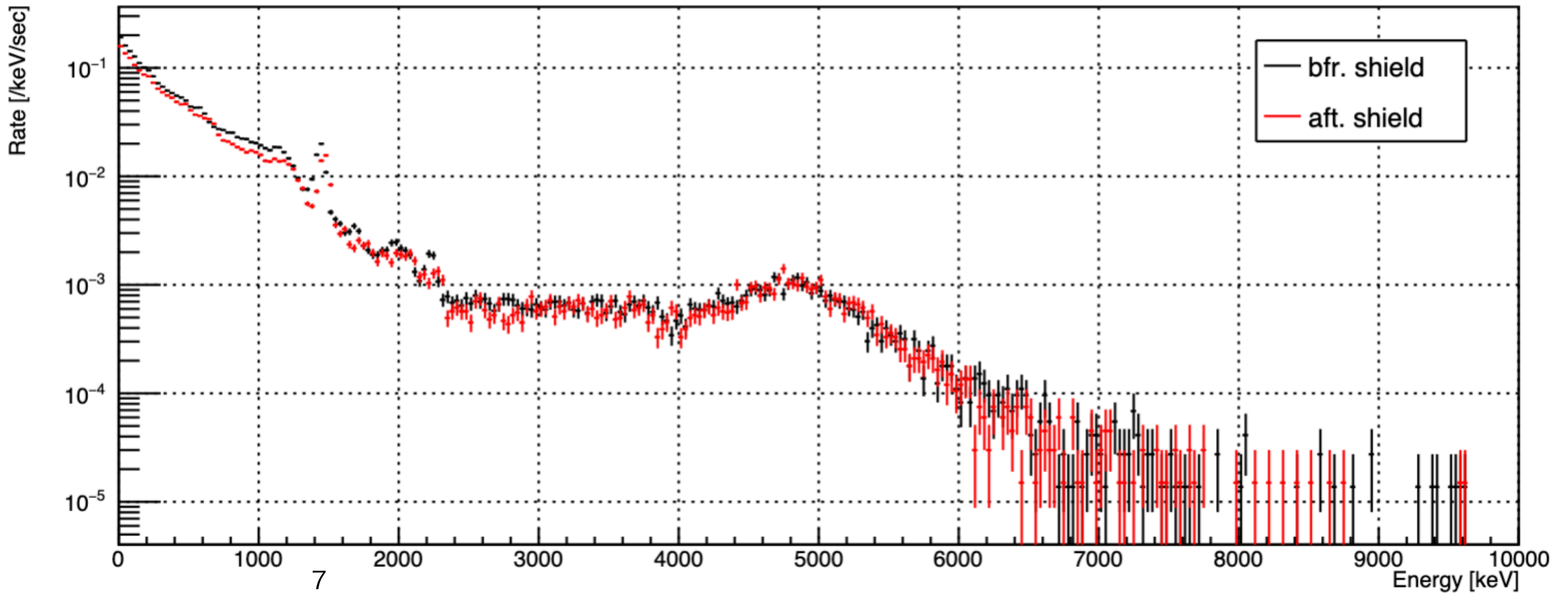


空間線量測定 by 細川さん



- PMT:: H10493-001
- CsI (Tl)
- エルジェン製
  オプティカルグリス EJ-550
- 適当なシリコンテープと
  ブラックテープ
- USBオシロ
  UDS-1G02S-64M





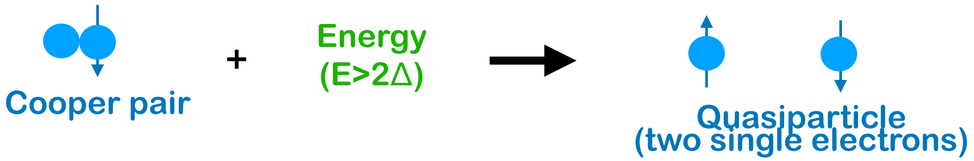
低温検出器の多重読み出し

多重読み出しに有利な超伝導検出器: Kinetic inductance detector (KID)

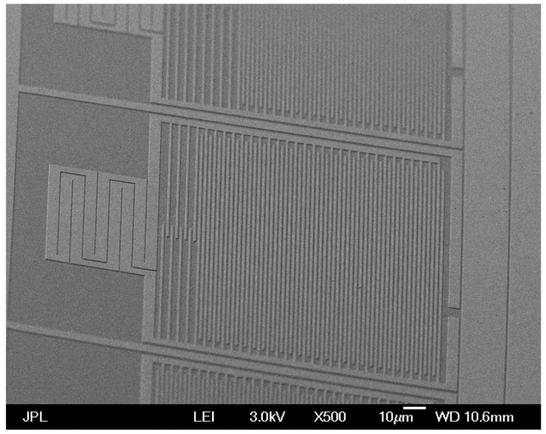
超伝導体: 電気抵抗=0Ω, インダクタンス≠0

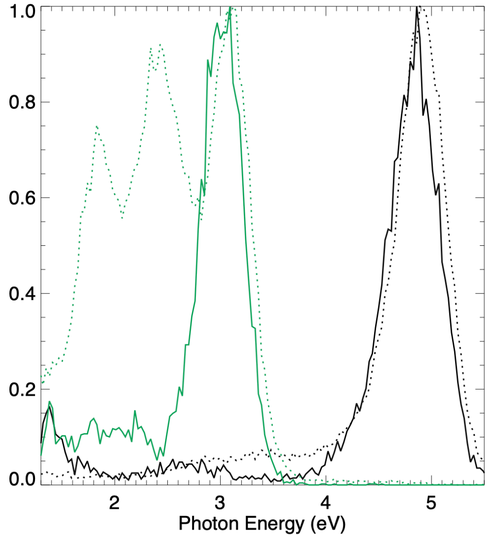
力学的インダクタンス: クーパー対密度

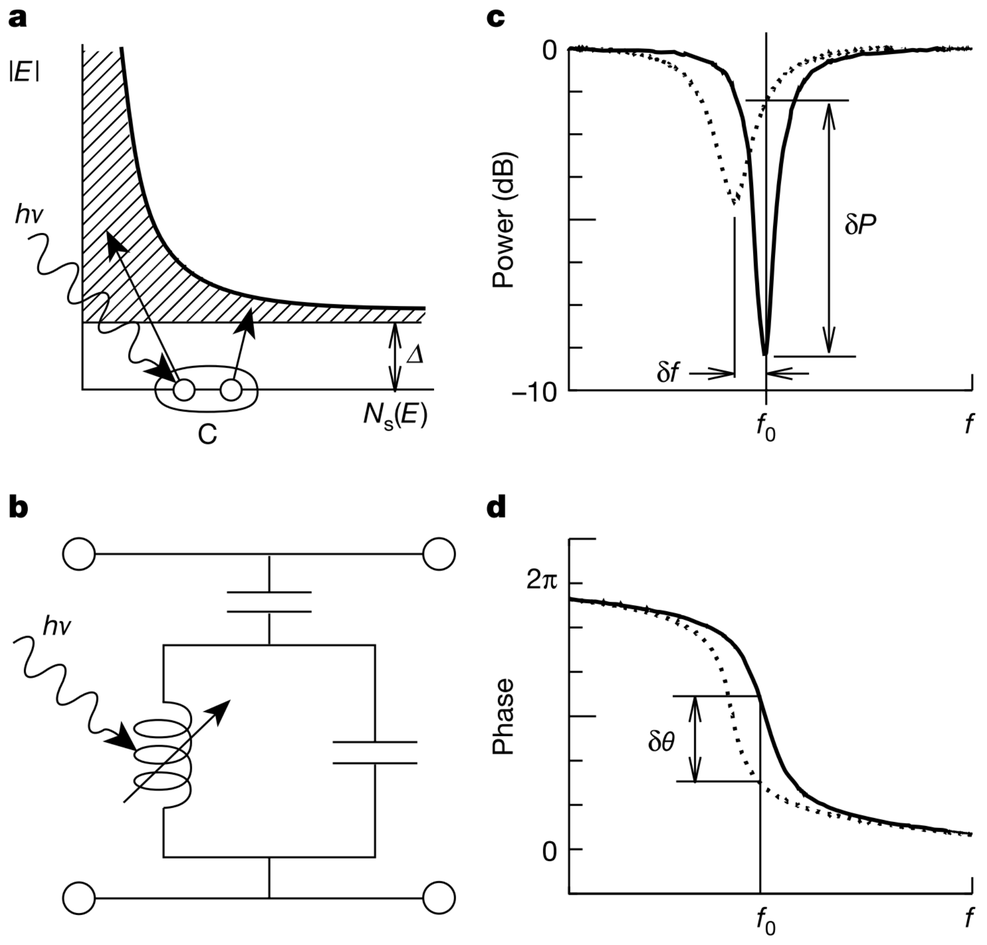
クーパー対密度: 入力エネルギーで変化



超伝導体薄膜で使った共振回路: KID



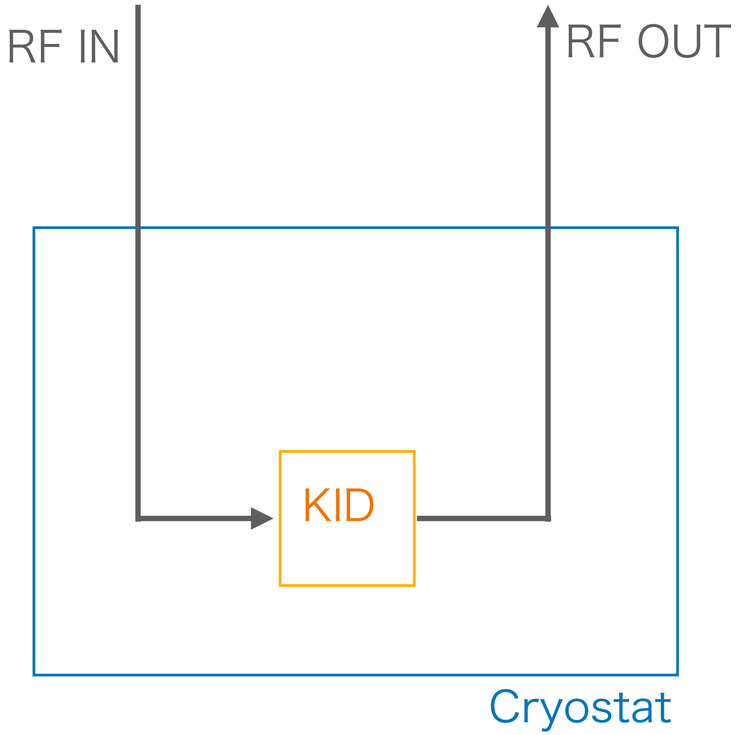


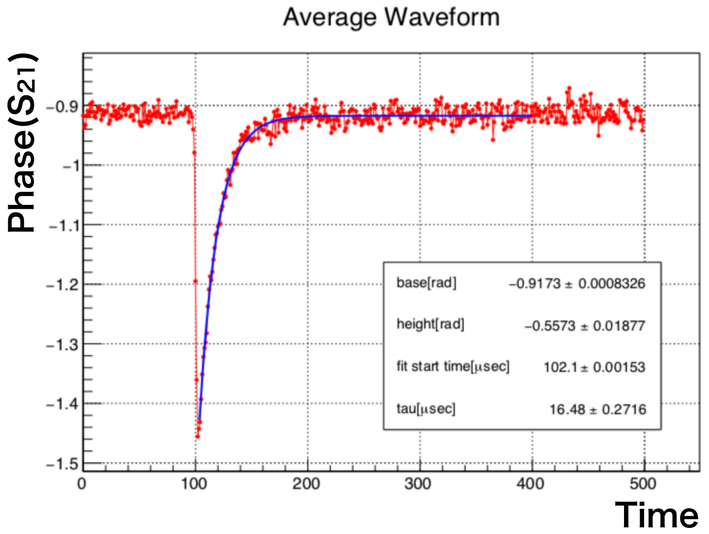


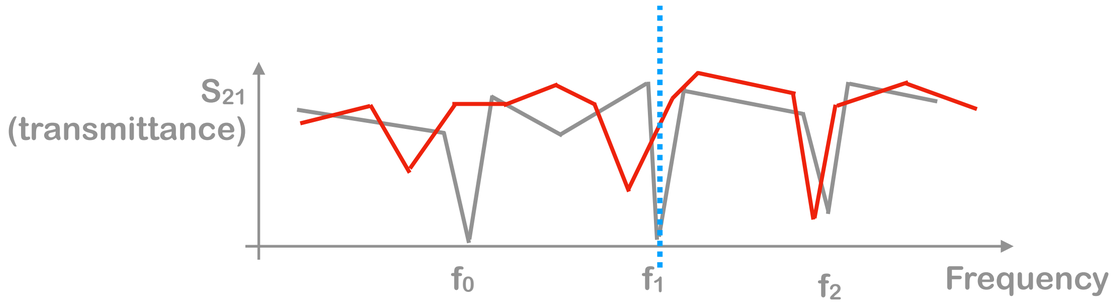
Nature 425, 817 (2003)

Proceedings Volume 8453, High Energy, Optical, and Infrared Detectors for Astronomy V; 84530B (2012) https://doi.org/10.1117/12.924904

KID読み出しのコンセプト



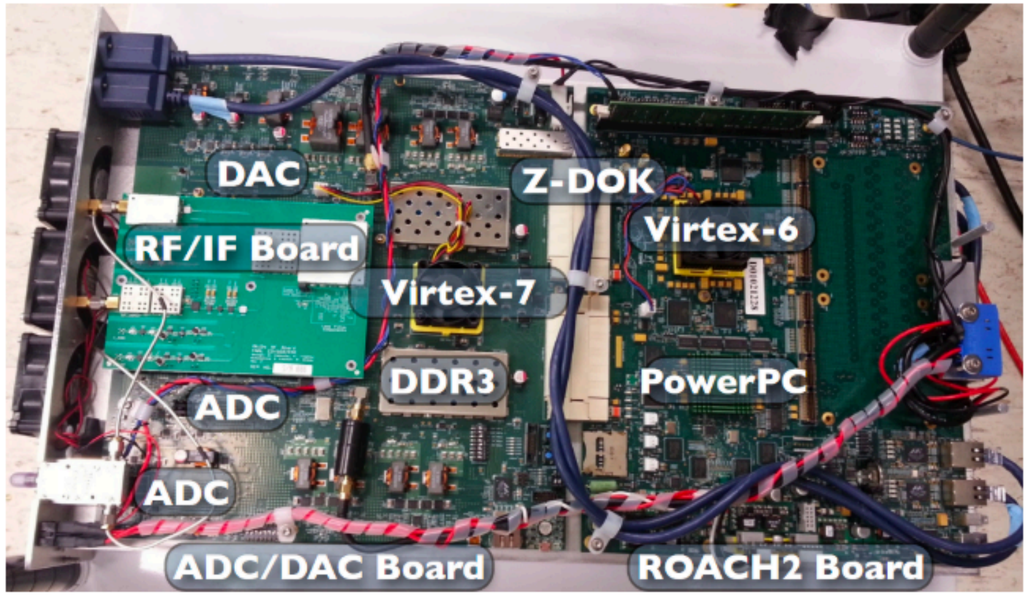


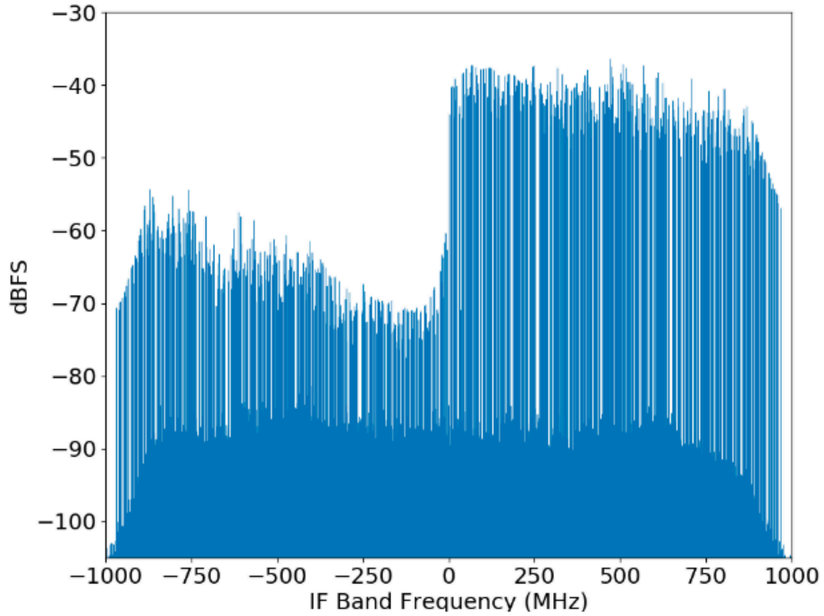


周波数空間で多重読み出し可能

KIDの多重読み出しの実例

1024読み出しの例



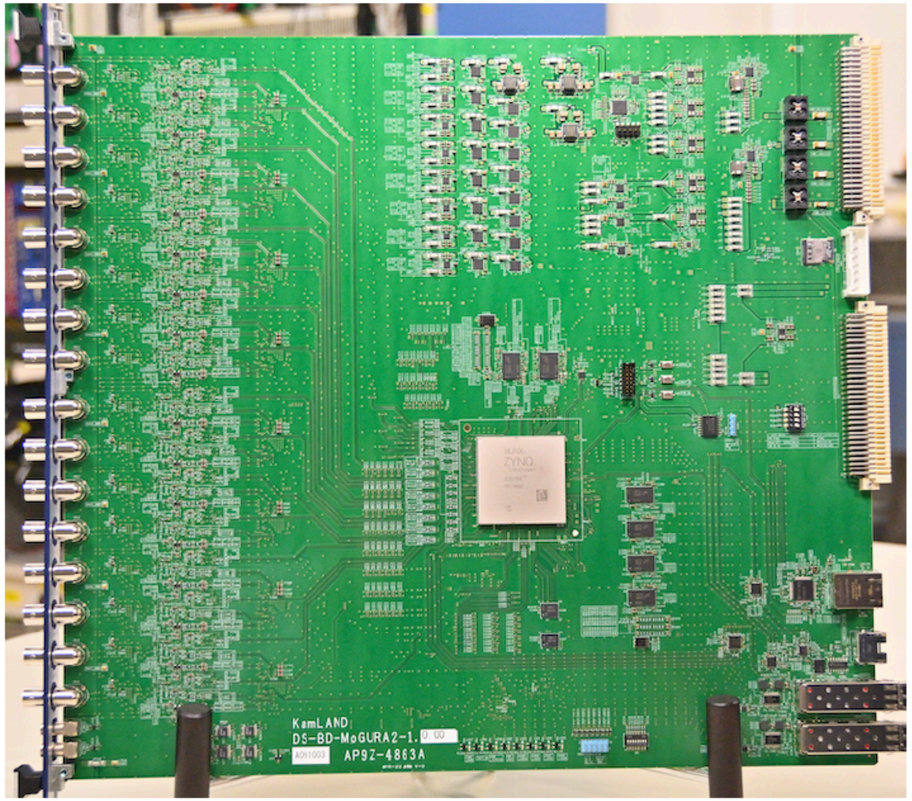


Review of Scientific Instruments **91**, 124705 (2020)

我々のアプローチ

A01がRFSoCを使ったフロントエンド回路開発

RFSoC: programmable logic, processing system, RF ADC, RF DAC

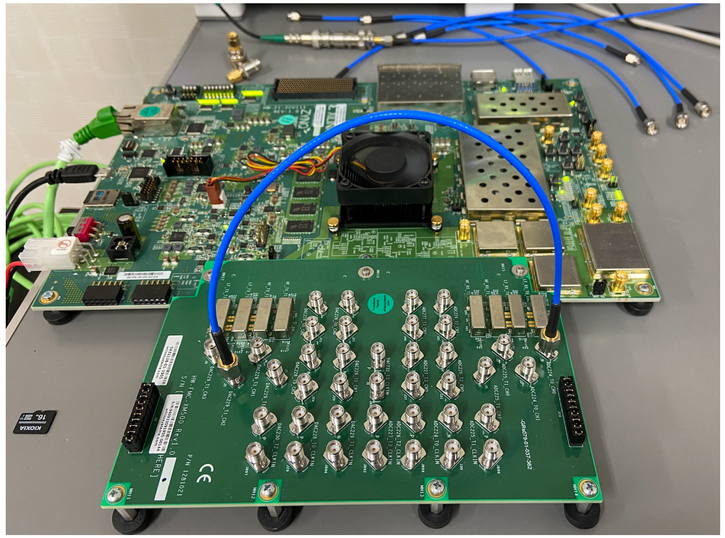


KID読み出しに応用

Supported from U.S.-Japan Science and Technology Cooperation Program in high Energy Physics

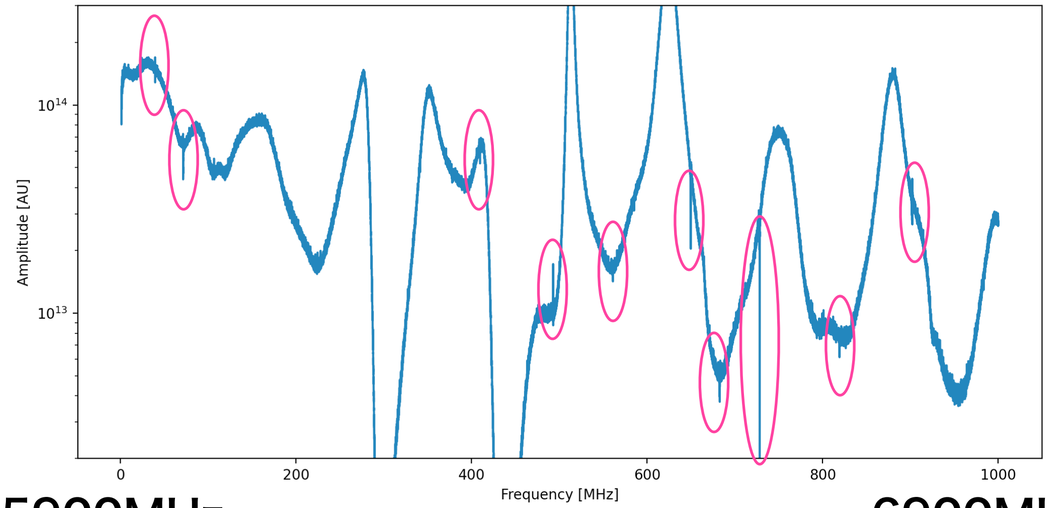
現状

Use of ZCU111



12-bit, 4.096GSPS RF-ADC	8
14-bit, 6.554GSPS RF-DAC	8
System Logic Cells (K)	930
Memory (Mb)	60.5
DSP Slices	4,272
33G Transceivers	16*
Maximum I/O Pins	371

Example of frequency sweep



5900MHz　　6900MHz

皮算用

16,000 (~1,024 x 4 x 4)の読み出し

RFSoCの応用

CMB実験, Q-bit, 量子重力実験

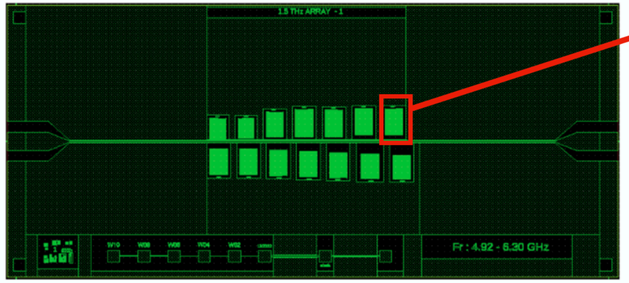
挑戦的研究「開拓」に応募中

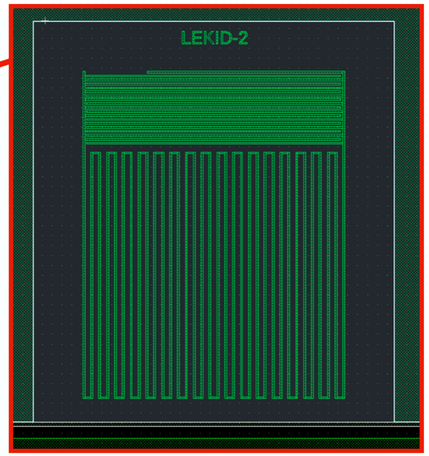
東北大学　大塚先生、学習院大学 松本先生

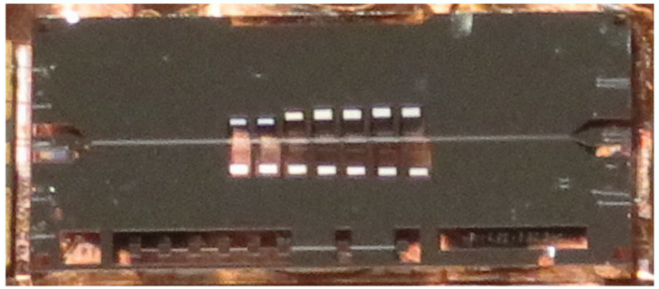
KID開発 with 埼玉大学, 理研

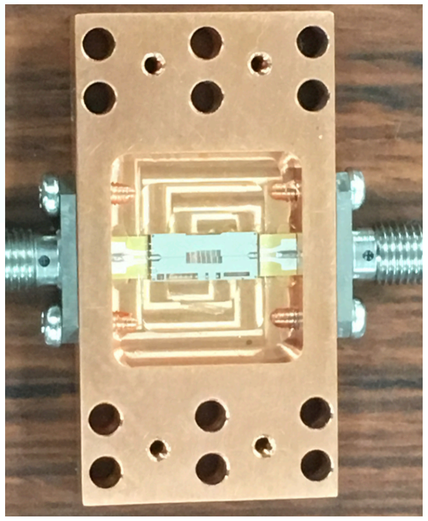
Developments of KID on CaF2

- to have knowhow and experience of KID
- to search for low-mass DM with spin-dependent interaction



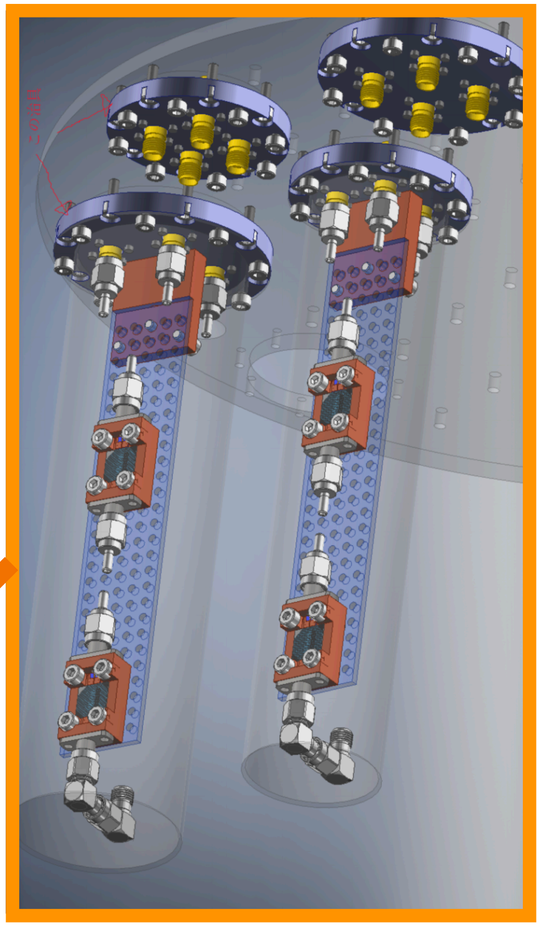












KID開発

No radioactive sources which are used in low-temperature vacuum condition.

Energy threshold: evaluation with several assumptions

$$E^{\delta\phi} = \frac{1}{\eta_\phi} \frac{N_0 V \Delta_0^2}{\alpha S_2(f_0, T) Q} \delta\phi,$$

Appl. Phys. Lett. 110, 033504 (2017);

1 - 7 keV threshold
(KID intrinsic noise level: ~ 100 eV)

	σ_E (eV)	σ_E^{amp} (eV)	σ_E^{PSD} (eV)	η (%)	$\sigma_E \times \eta$ (eV)
KID-1	400	147	484	3.1 ± 0.4	12.4
KID-2	262	60	253	3.4 ± 0.4	8.9
KID-3	205	75	233	6.1 ± 0.7	12.5
KID-4	204	50	184	5.5 ± 0.6	11.2
SUM	154	42		18 ± 2	27.7

Appl. Phys. Lett. 107, 093508 (2015);

Ten times worse results from CALDER

55Fe will be available in this autumn.

まとめ

冷凍機の低放射能化

-> 放射線シールドの導入

ミューオンveto用のプラシンを導入して再評価の予定

大きな有効体積

-> 多重読み出しが得意なKIDの利用

RFSoCを使った読み出しシステムの開発

KIDの開発:

- 現状: E ~ O(keV), 秋以降に線源での実測予定
- フォトン検出用のKID開発

➡ 低エネルギー閾値かつ大きな有効体積の検出器