

液体ヘリウムを用いた 暗黒物質の探索

石野宏和（岡山大学）

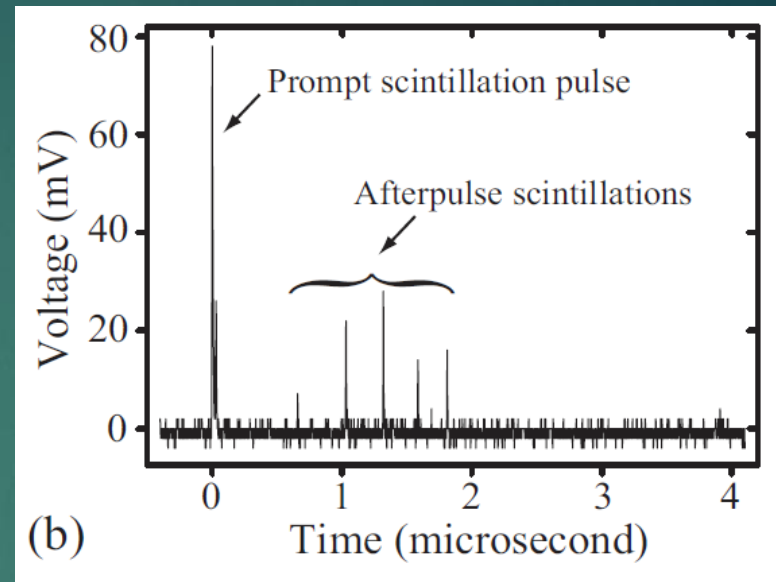
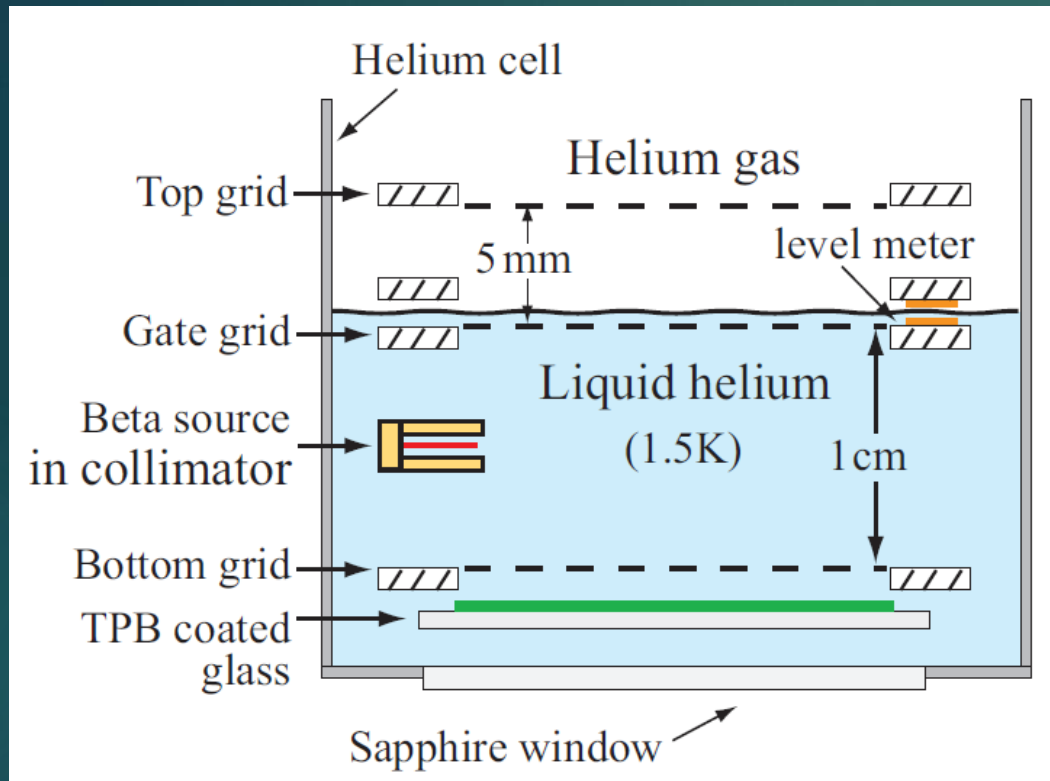
イントロダクション

- ▶ これまでの暗黒物質の探索は主に重い元素を用いていた。
 - ▶ Xe, NaI, Ge, Siなど
- ▶ そのため、質量が $10\text{GeV}/c^2$ 以下の軽い暗黒物質には感度が無かった。
 - ▶ 最近では、CDMSliteなどで軽い領域を探索できるようになった。
- ▶ ヘリウム4を用いた軽い暗黒物質に感度を持つ検出器が提案された
 - ▶ W. Guo and D. N. McKinsey, PRD 87, 115001 (2013).
 - ▶ 液体ヘリウムをアクティブ標的として用いる。
 - ▶ 液体ヘリウムからのシンチレーション光（波長 $80\text{nm}=16\text{eV}$ の深紫外線）を検出。
 - ▶ TPCによって、反跳位置を決定。また、イオン化量と励起量の比較により、反跳ヘリウムと反跳電子を分離。

講演の内容

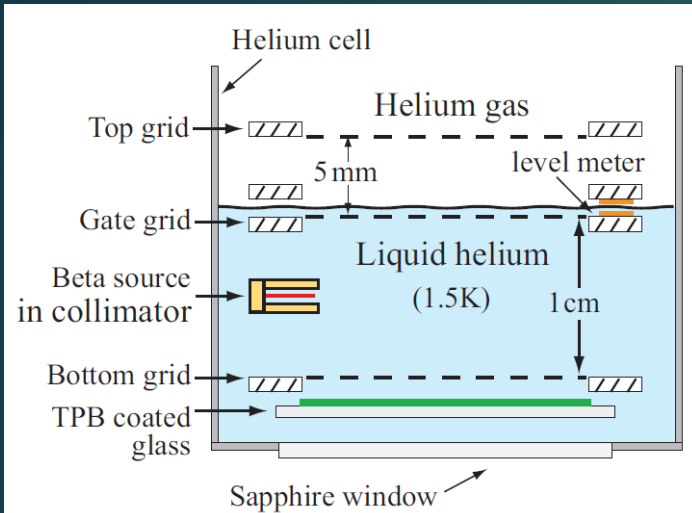
- ▶ 液体ヘリウムをアクティブ標的として用いた粒子検出
 - ▶ シンチレーション光検出の先行研究
 - ▶ 液体ヘリウムTPCの開発へ向けた予備知識
 - ▶ TPCを用いた検出器の設計の提案・感度・技術的課題
- ▶ 我々開発グループの取り組み
 - ▶ 液体ヘリウムシンチレーション光を検出するための超伝導検出器の紹介
 - ▶ 力学的インダクタンス検出器の紹介
 - ▶ 開発現状
 - ▶ 超伝導検出器の性能評価。
 - ▶ 読み出しシステムの開発。
- ▶ まとめ

先行研究の例

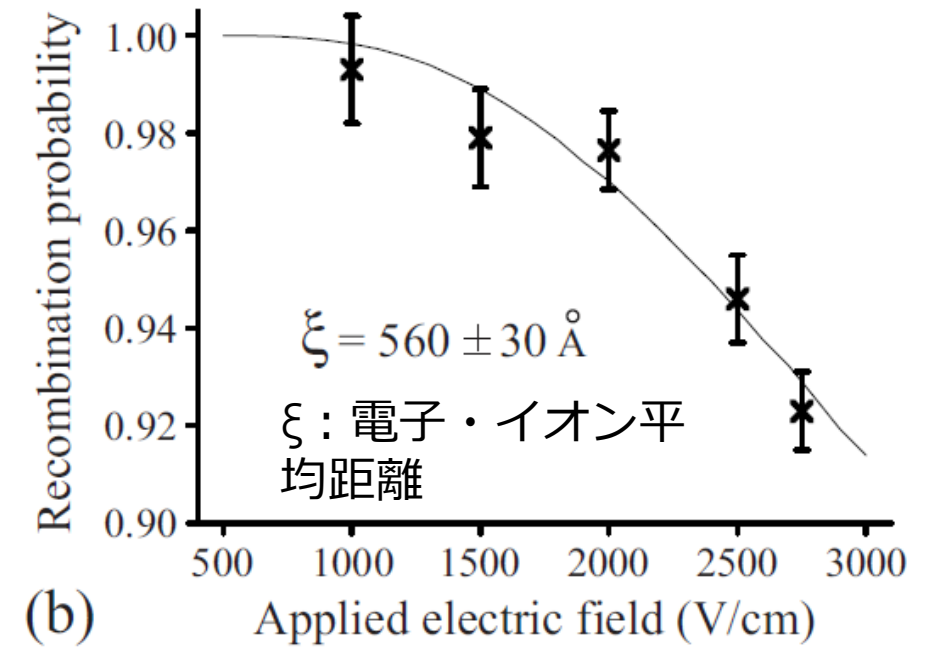
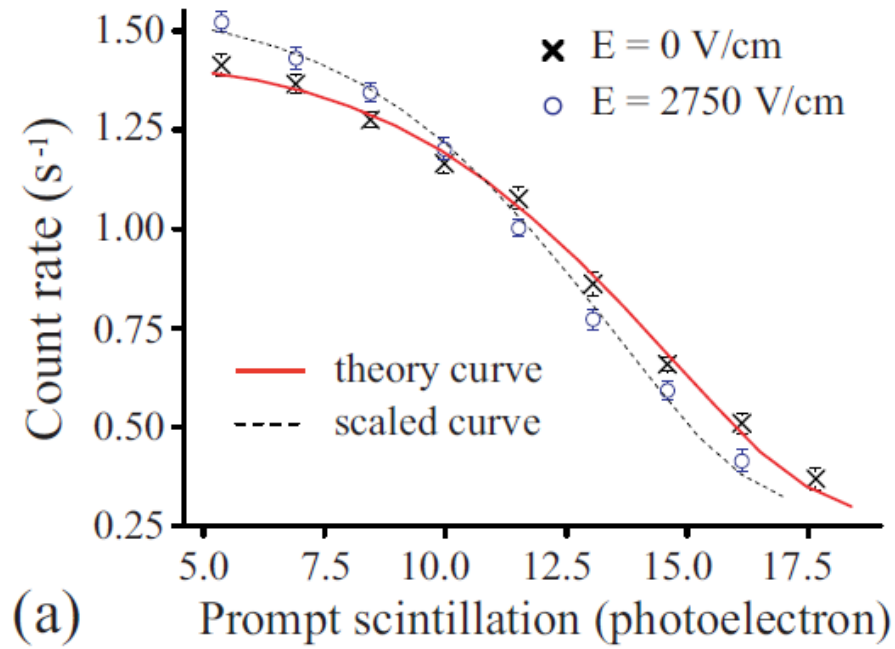


W. Guo et al., JINST 7 P01002 (2012).

- 液体ヘリウムでは、 16eV の光子のシンチレーション光が発生。
 シンチレーション光検出のために、波長変換板とPMTを使用
 →立体角と量子効率が低い、クライオの構造が複雑
 →直接シンチレーション光を検出できれば高い立体角を持つことができる



印加電場強度と、再結合確率の実測値



電子の液体ヘリウム内での振る舞い

▶ 電子の易動度

- ▶ 裸の電子は、液体ヘリウム内では、周りのヘリウムを押しつけて、半径約2nmの「泡」構造を作る。

- ▶ ヘリウム原子内の電子との干渉

- ▶ H. J. Maris, JPSJ 77, 111008 (2008)

- ▶ 約2g（2倍の重力加速度）の浮力を感じる。

- ▶ 電場にすると、 10^{-6} V/cmに相当。

- ▶ 1.6Kで、易動度 $\mu=10^{-5}$ m²/Vs

- ▶ $E=10$ kV/cm= 10^6 V/m で、 $v=10$ m/s

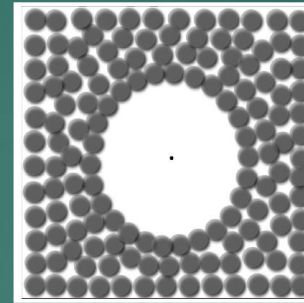
- ▶ 0.1Kでは $\mu=1$ m²/Vs。

- ▶ 液面表面から電子を取り出すためには、10m/s以上が必要。

- ▶ 40 m/sを超えると、量子渦を作り、エネルギーを損失。

▶ 電子とイオンの分離

- ▶ 再結合する前に分離するには10kV/cmが必要。



Physics process in superfluid helium ion catchers

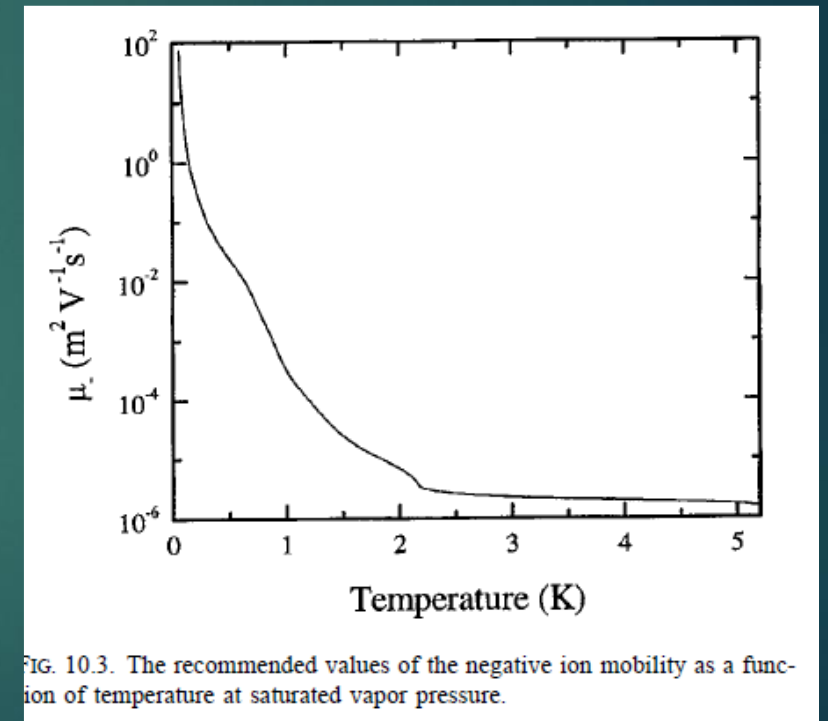
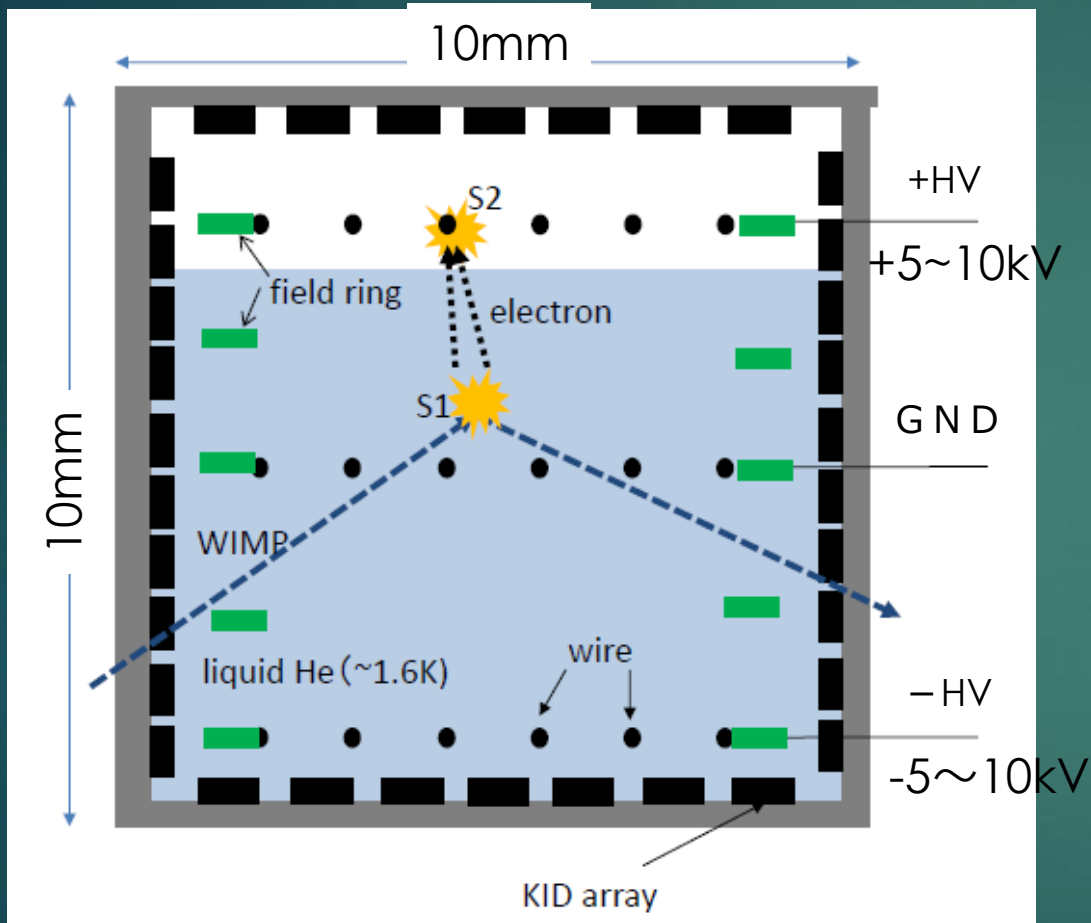


FIG. 10.3. The recommended values of the negative ion mobility as a function of temperature at saturated vapor pressure.

R. J. Donnelly and C. F. Barenghi, J. Phys. Chem. Ref. Data 27, 1217 (1998).

液体ヘリウムTPCの概要

7



- 反跳粒子が周りのヘリウムを励起・イオン化する
- 励起したヘリウムは16eVの紫外線光子を放出(S1)
- イオン化で生じた電子は、電場により掃引され、ワイヤ付近で加速され、シンチレーション光を放出。ワイヤにより検出(S2)。
- S1/S2は、反跳電子とヘリウムによって違うので、両者を識別。
- 高効率で直接紫外線を検出するために、超伝導光検出器を使用。
 - Nbの量子効率 $\sim 80\%$
 - (c.f. PMT $\sim 20\%$ ただし可視光)

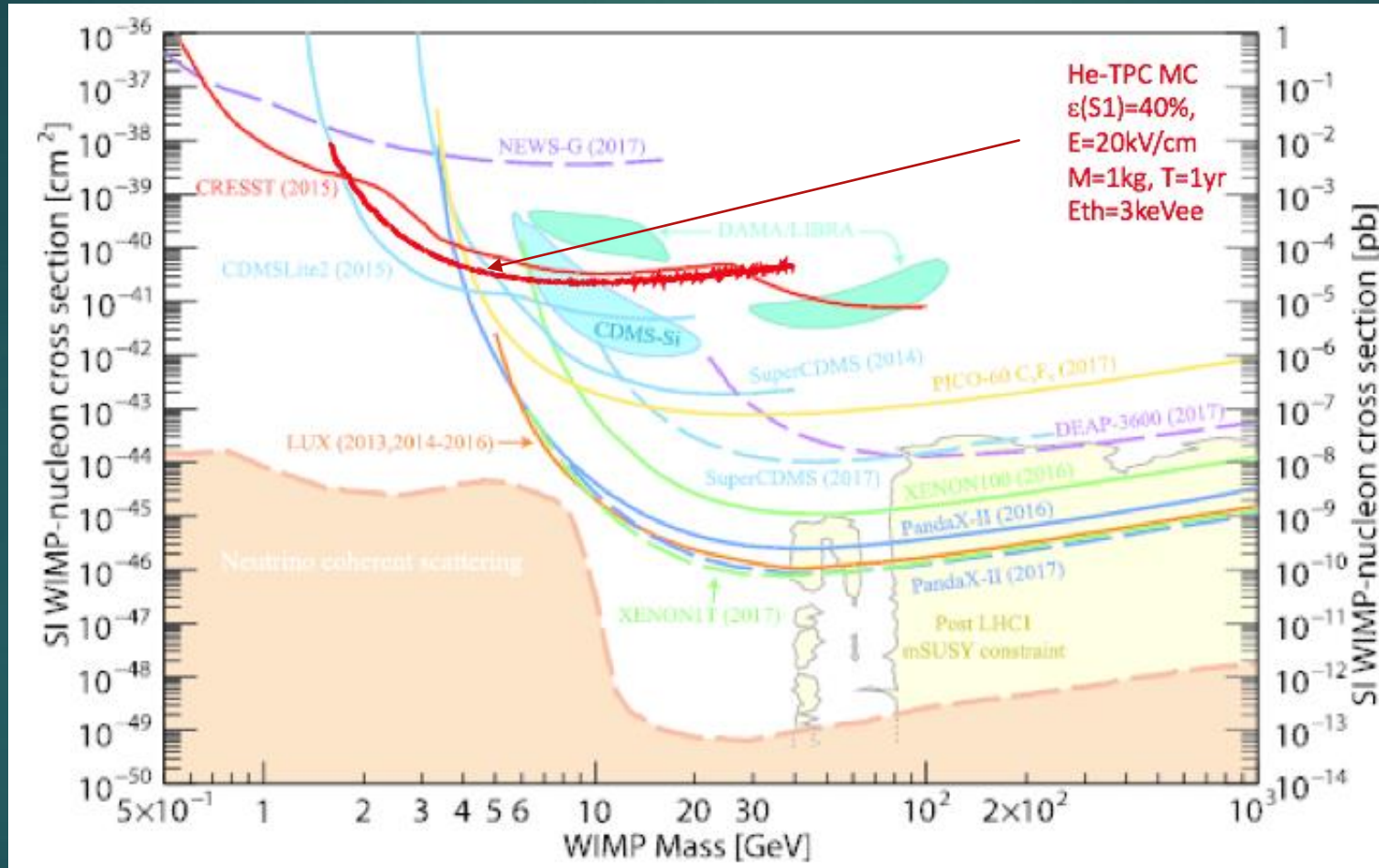
Guo and D.N. McKinsey, PRD 87, 15001 (2013)

H. Ishino et al. (TIPP2014) PoS 090 (2015) pp1-8.

暗黒物質に対する感度計算

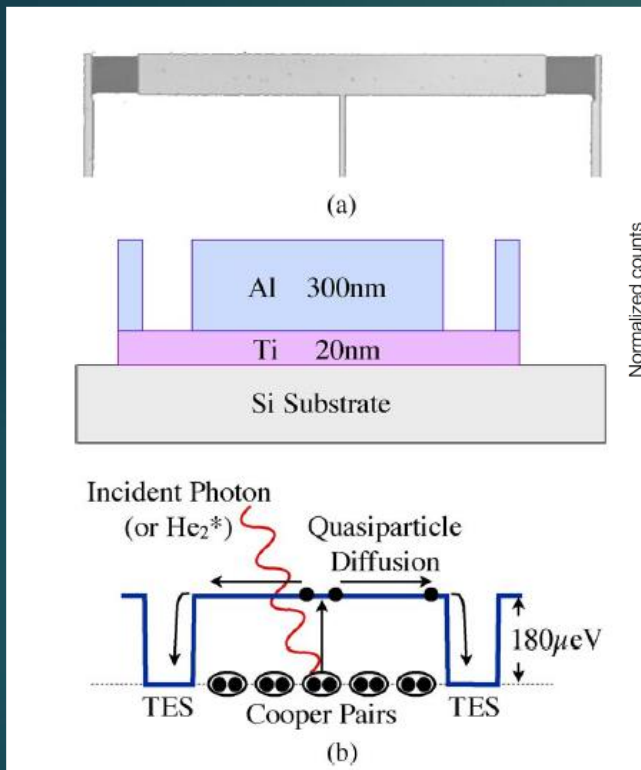
PDG2018

散乱断面積[cm^2]



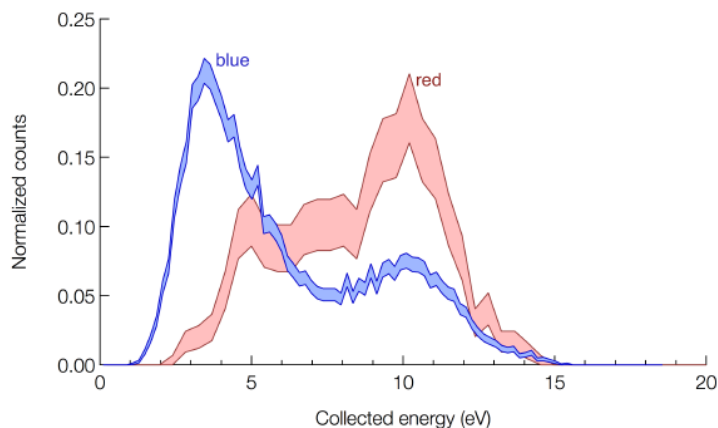
WIMPの質量[GeV]

海外の研究のとりくみ



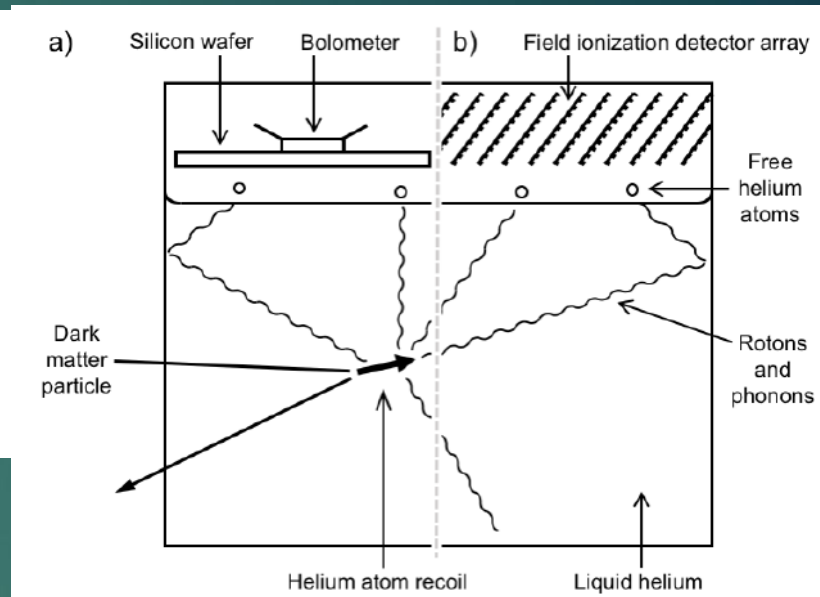
F. W. Carter et al., IEEE Trans. Appl. Supercon. 25 (2015) 1-7

超伝導Alでエネルギーを吸収、準粒子拡散でTiで熱に変換、吸収量をTESで測定



F. W. Carter et al., arXiv:1605.00694

Ti TESによって、0.1K液体ヘリウムシンチレーション光とスピン1の励起ヘリウム分子を観測



H. J. Maris et al. arXiv:1706.00117

液相表面のヘリウム原子を、フォノン・ロトンを使って蒸発させ検出する

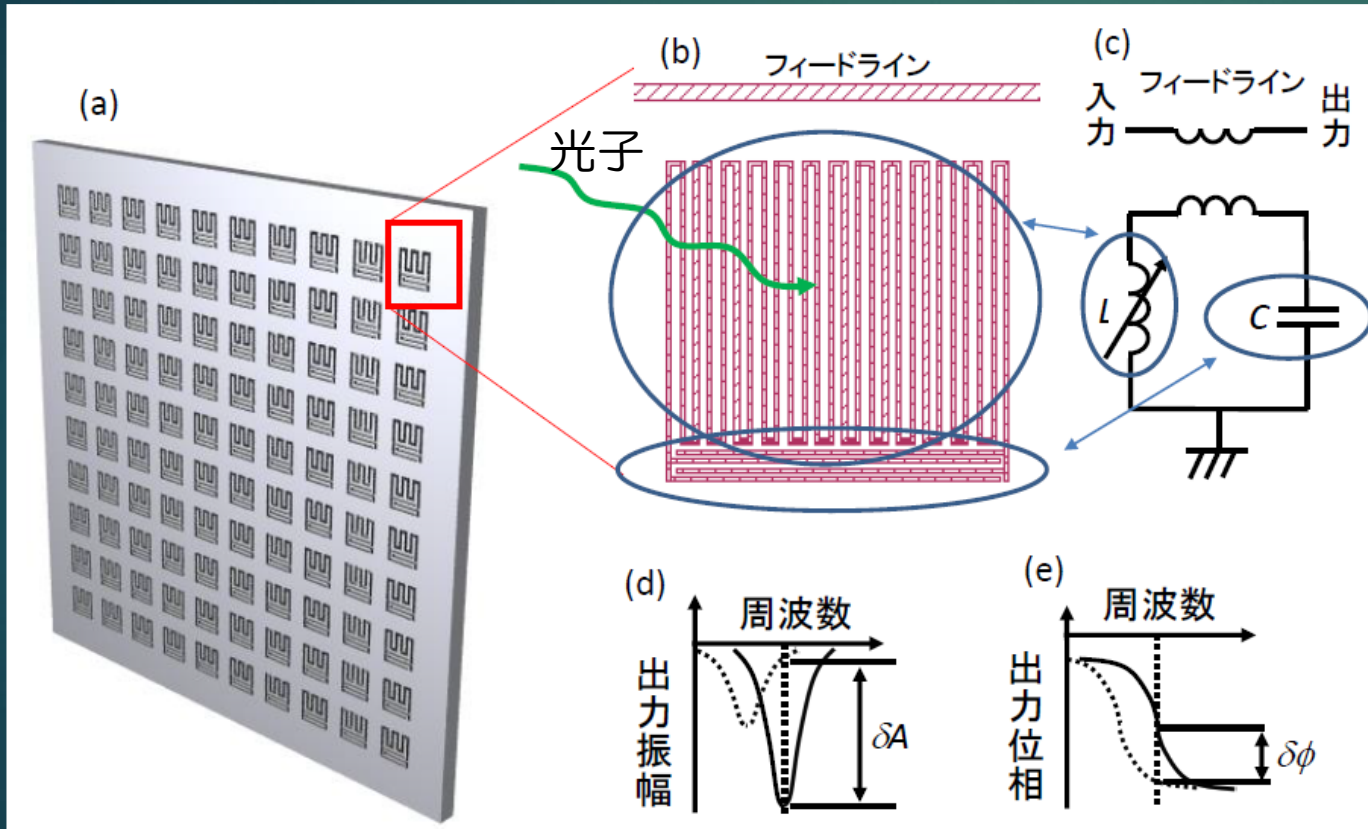
技術的課題

10

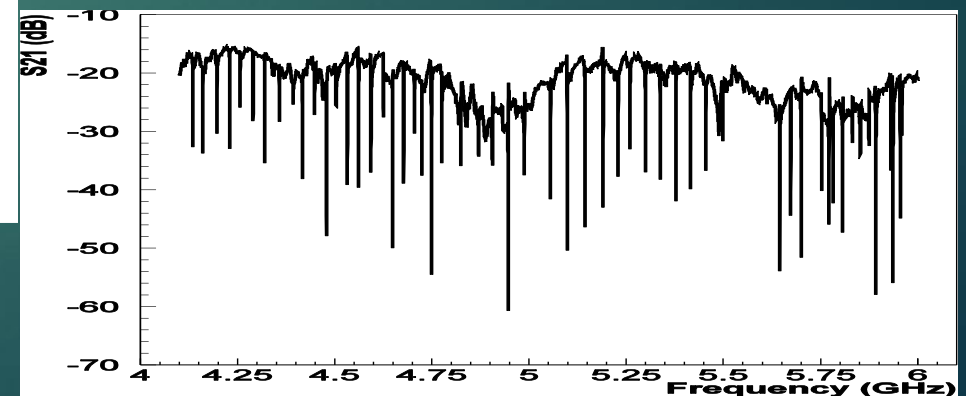
- ▶ 16eV光子に感度を持つ超伝導検出器の開発。
 - ▶ ポンピングのみでは1.6Kが限度。超伝導体としては、NbかNbNが候補。
 - ▶ 0.1Kまで冷却できれば、AlやTiNが候補。ただし冷凍機・断熱の要求技術のレベルが格段に高くなる。
- ▶ 液体ヘリウム内で10 kV/cm の電場勾配をつくる技術
 - ▶ 既存TPCの技術を流用できる？ フィードスルーは？
 - ▶ 液体ヘリウムTPCは、世界ではまだ誰も実現していない。
- ▶ 液体ヘリウムの液面高さの制御
 - ▶ ポンピングにより減った分を、液化して補給する冷凍機が必要。
 - ▶ 機械式冷凍機で制御も可能。予算次第。
- ▶ コンタミは？
 - ▶ 超流動になると、ヘリウム原子以外は、一つの原子でさえ自重で落ちる。
 - ▶ ヘリウム3が、電子の移動を妨げる可能性ある。

超伝導検出器:

Kinetic Inductance Detector (KID)

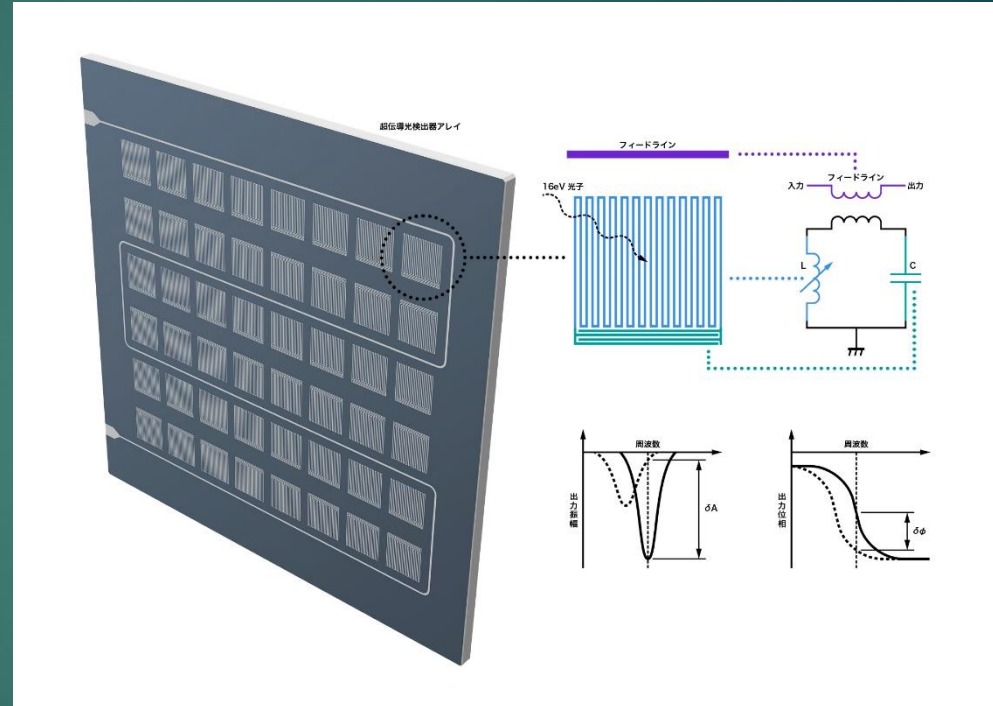


- 周波数領域読み出しにより、1本の配線で多数の素子を同時に読み出すことが可能
- 基板上に1層の超伝導薄膜のパターニングで容易に作製可能
- バイアスラインは不要
 - 代わりに励起マイクロ波 (~4GHz)を送る
- LEKID
 - Lumped Element KID



P. K. Day et al., Nature 425 (2003) 817-820

S. Doyle et al., J Low Temp. Phys. 151, 530 (2008)



開発グループメンバー

▶ 岡山大学

▶ 石野宏和・樹林敦子・山田要介・喜田洋介・秀平直人



▶ 産総研

▶ 山森弘毅・平山文紀・神代暁



▶ 高工ネ研

▶ 羽澄昌史・佐藤伸明



▶ 宇宙科学研

▶ 酒井和広 (現在はNASAに所属)



KIDの作製と評価

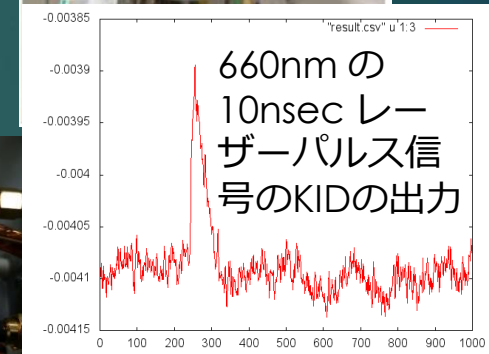


OKAYAMA
UNIVERSITY

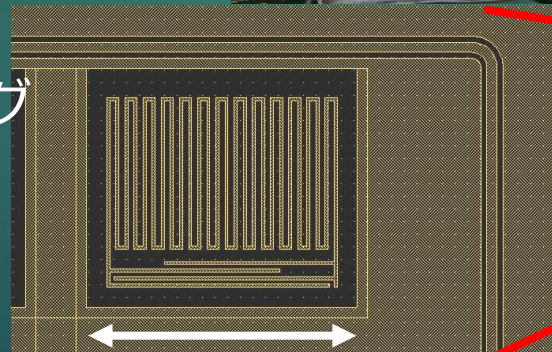
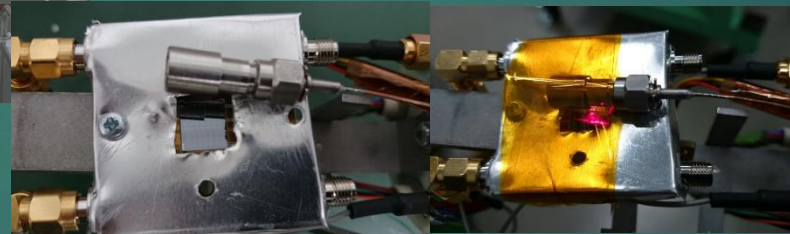
14



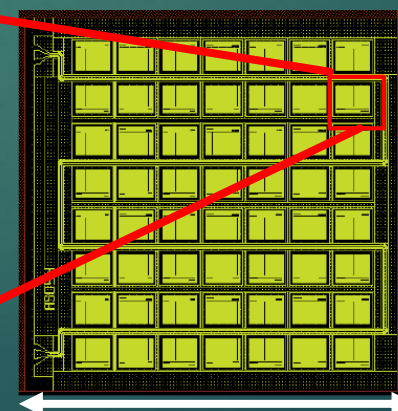
- 評価システム@岡山大
 - 液体ヘリウムデュワー
 - 1.6Kまで減圧冷却
 - 光ファイバーを通して可視光を照射
- 0.3K He-3ソープション冷凍機@KEK測定器開発室



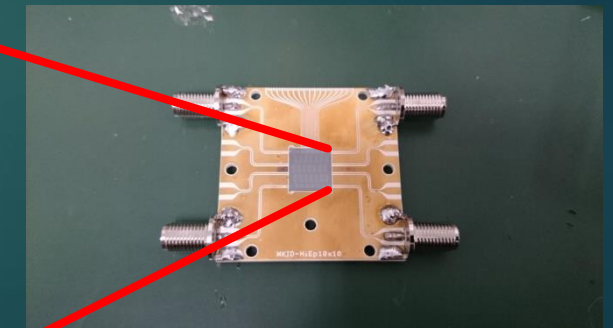
- リソグラフィー技術により作製
 - リフトオフ・エッチング
 - Nb 薄膜
- 産総研・KEKのクリーンルームを利用



1mm



10mm



10mm 角シリコン基板を
専用の治具にワニスで接着

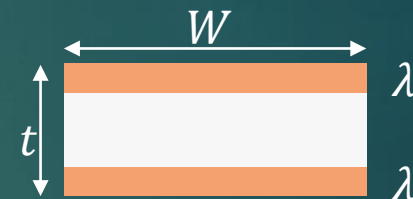
Kinetic Inductance (力学的インダクタンス) とは？

単位体積あたりのクーパ-対の運動エネルギー = $\frac{1}{2} n_s m_s v_s^2 = \frac{1}{2} \frac{m_s}{n_s q^2} J_s^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \lambda^2 J_s^2$

$\lambda = \sqrt{m_s / \mu_0 n_s q^2}$ は磁場侵入長

超伝導体のインダクタンス全エネルギー = $\frac{1}{2} L_k I^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \lambda^2 \int J_s^2 dV$

$W \gg t \gg \lambda$ $U_k = \frac{1}{2} L_k I^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \lambda^2 \left(\frac{I}{2W\lambda} \right)^2 2W\lambda\ell$ $L_k = \frac{\mu_0 \lambda}{2W} \ell$



$W \gg \lambda \gg t$ $U_k = \frac{1}{2} L_k I^2 = \frac{1}{2} \mu_0 \lambda^2 \left(\frac{I}{Wt} \right)^2 Wt\ell$ $L_k = \frac{\mu_0 \lambda^2}{Wt} \ell$



正確な式は $L_k = \frac{\mu_0 \lambda}{4W} \ell \left[\coth \left(\frac{t}{2\lambda} \right) + \frac{t}{2\lambda} \operatorname{cosec}^2 \left(\frac{t}{2\lambda} \right) \right]$

L_k はクーパ-対密度 n_s に依存

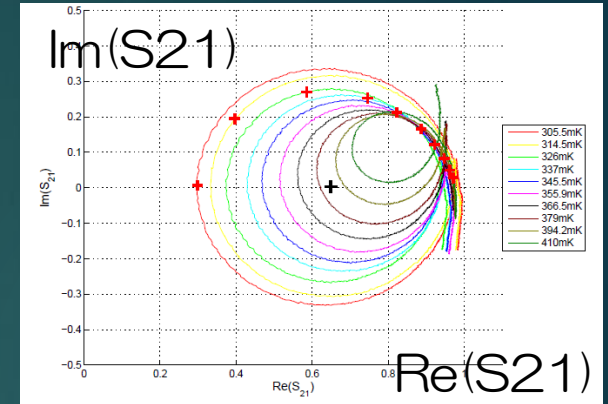
KIDの感度計算

16

外部エネルギー付与によりクーパ対が破壊され準粒子が生成される。
一個の準粒子(Quasi Particle) が生成されたときの、励起マイクロ波の位相の変化を計算。

$$\frac{d\theta}{dN_{qp}} = \frac{\exp(-\zeta)[(2\Delta(0) + \hbar\omega)I_0(\zeta) - \hbar\omega I_1(\zeta)]}{[1 - 2 \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T}\right) \exp(-\zeta)I_0(\zeta)][k_B T + 2\Delta(0)]} \frac{\sqrt{2}}{3N(0)\sqrt{\Delta(0)k_B T}} \cdot \frac{\alpha Q}{V}$$

$$\zeta = \frac{\hbar\omega}{k_B T}, \quad I_0, I_1 \text{は修正ベッセル関数}$$



Nbについてのパラメータを代入し、数値計算をすると、 $\frac{d\theta}{dN_{qp}} = 8.4 \times 10^{-9} [\text{rad}] \frac{\alpha Q}{V}$

$$\alpha = \frac{L_k}{L_{tot}} = \frac{L_k}{L_g + L_k} \quad \text{は全インダクタンスに対する力学的インダクタンスの比}$$

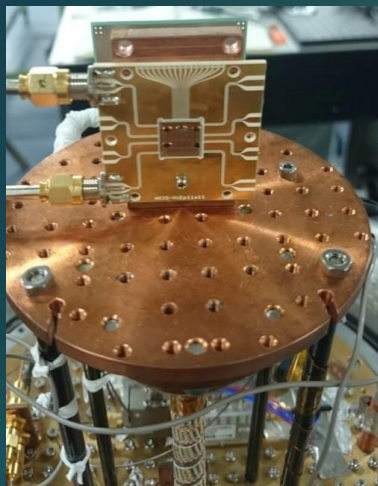
Q は共振器の Q 値($\sim 2 \times 10^4$)、 V は共振器の体積($1.8 \times 10^5 \times t \mu\text{m}^3$, $t[\mu\text{m}]$ は厚さ)

16eVの光子が入射して生じる準粒子の数 $= \frac{h\nu\eta}{\Delta} = 6.5 \times 10^3$ 個

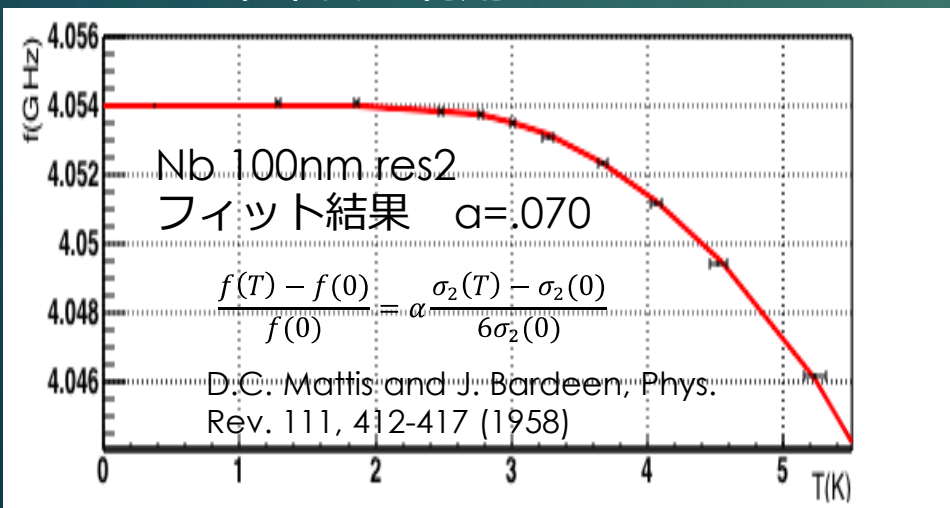
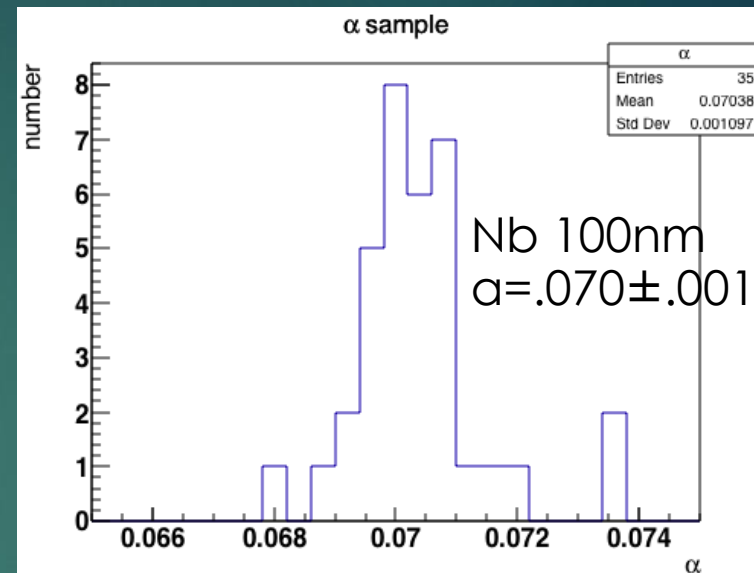
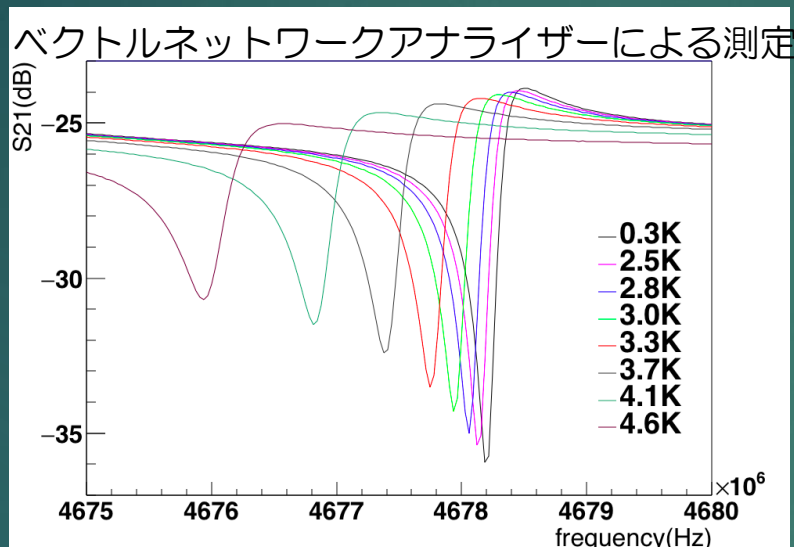
厚さ50nm = 0.05 μm のKIDは、 $\alpha = 0.15$ なので、 $d\theta = 1.8 \times 10^{-5}$ rad
雑音は評価中。

α の測定

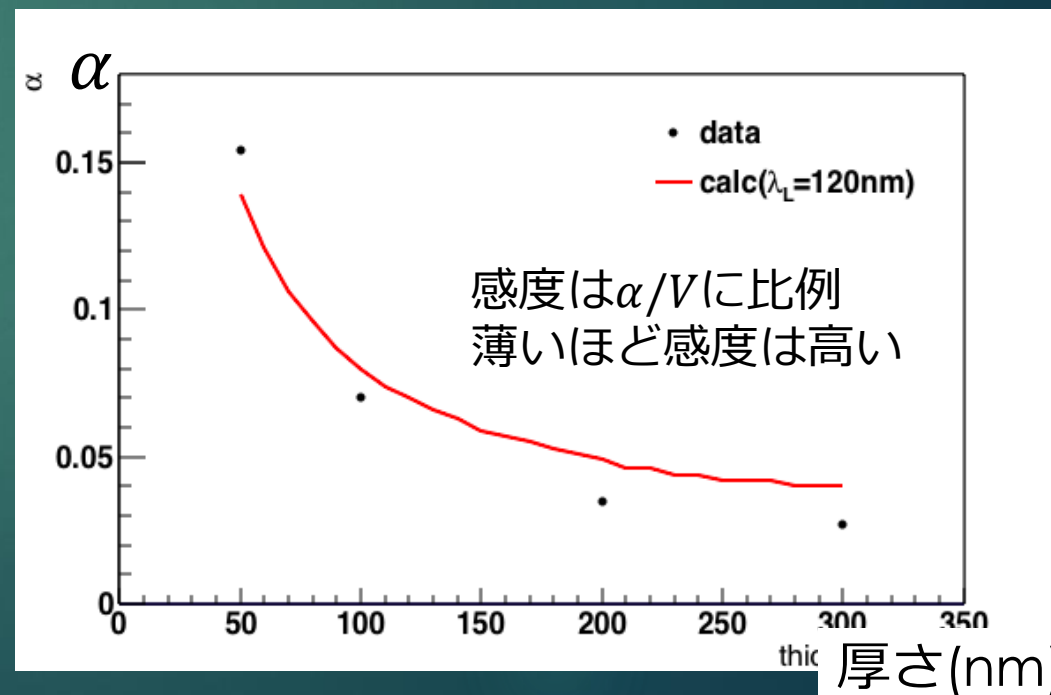
共振周波数の温度依存性から測定。



KEK クリーンルームの0.3K冷凍機を利用



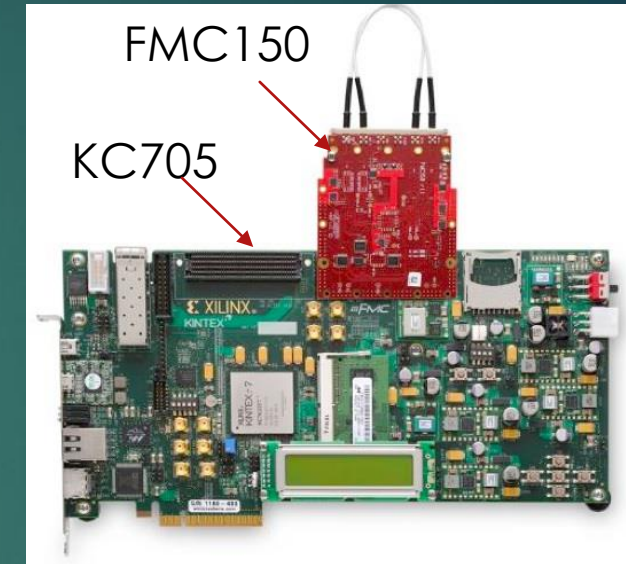
それぞれの共振器の共振周波数の温度依存性をフィットしてαを求める。



KID読み出し装置の仕様

18

- ▶ KIDは周波数領域での多重化が可能
 - ▶ 1本の配線で多数の素子の信号を同時に読み出すことが可能
- ▶ 開発中のKIDは時定数約 $\sim 1 \mu\text{sec}$
 - ▶ Nbの場合、時定数はQ値に依存： $\tau = Q/\pi f_0$
- ▶ 光子のパルス信号を検出
 - ▶ 周波数領域から時間領域に変換してセルフトリガーをかける
- ▶ 読み出しハードウェア
 - ▶ 市販のXilinx Kintex-7 DSP board KC705 とFMC150
 - ▶ DACの帯域幅240MHz
 - ▶ 共振器の帯域($\sim 2\text{MHz}$)を考慮し、KIDの共振周波数間隔を6MHzに設定。 $-60 \sim +60\text{MHz}$ で最大20素子読み出し。
 - ▶ CMB用KIDやX線用TESの読み出しで、使用の実績あり
 - ▶ K. Hattori et al., NIMA 732, 306 (2013); K. Sakai et al., JLTP 184, 519 (2016).
 - ▶ PCとのインターフェイス
 - ▶ SiTCP: T. Uchida IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, 1631 (2008).



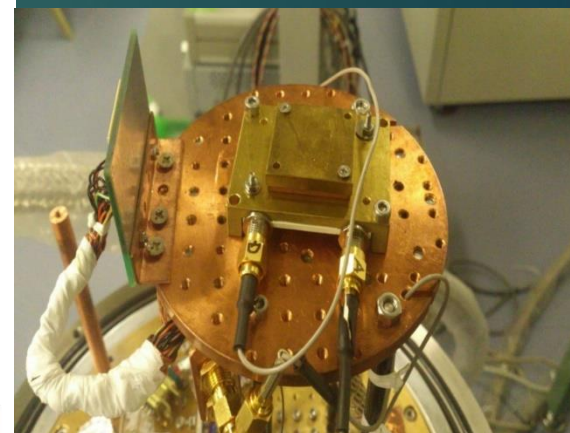
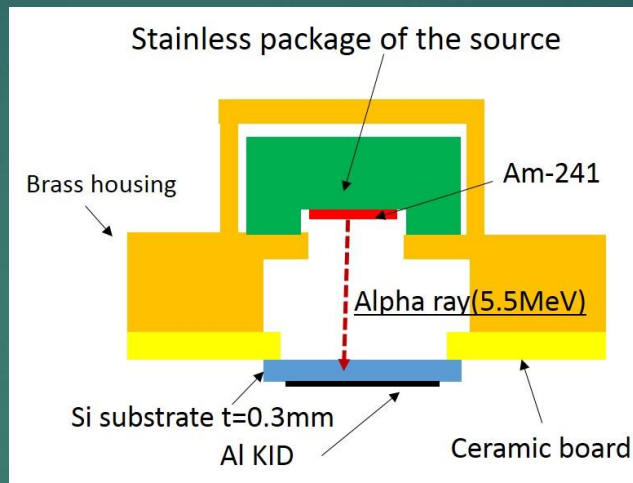
KID読み出し装置の実演

FPGAファームウェアの開発

- ・ 周波数コムの生成
- ・ 変調して、LPFをかけて、周波数領域から時間領域へ変換
- ・ FIFOとセルフトリガー機能で、閾値を超えたパルス信号の周辺の時系列データのみSiTCPでPCへ転送

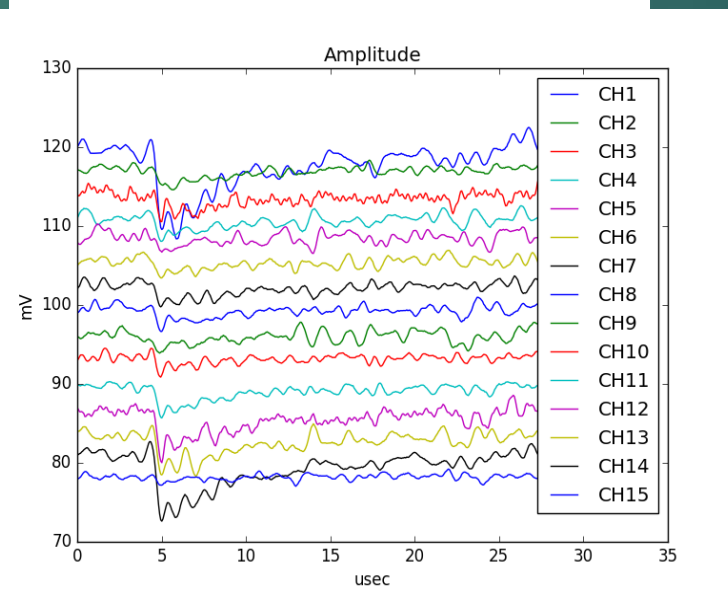
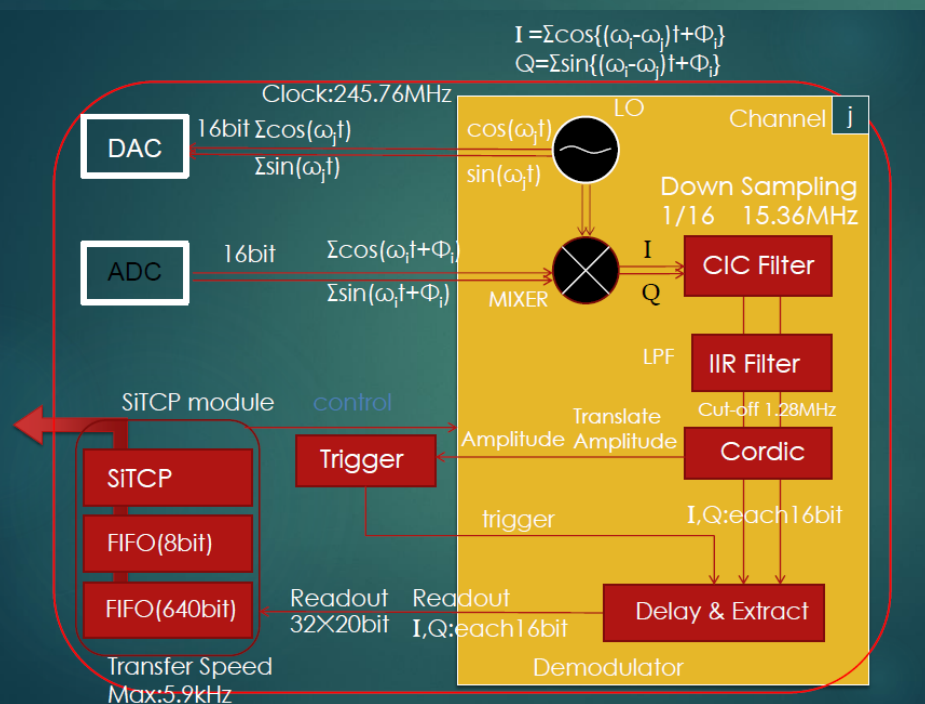
Am-241からの α 線をKIDの基板の裏から照射：
フォノン信号を生成

AI KIDで0.3Kで測定



$$I = \sum \cos\{(\omega_f - \omega_j)t + \Phi_j\}$$

$$Q = \sum \sin\{(\omega_f - \omega_j)t + \Phi_j\}$$



15共振器のフォノンによるパルス信号データを、1本の配線で取得することに成功

Y. Yamada et al., JLTP 193, 518-524 (2018).

まとめ

- ▶ 液体ヘリウムを用いた暗黒物質探索
 - ▶ 暗黒物質探索ではまだ使われたことがない標的
 - ▶ $10\text{GeV}/c^2$ 以下の軽い暗黒物質に感度を持つ
- ▶ アクティブ標的TPCとしての技術的な課題
 - ▶ 大きな立体角でシンチレーション光を直接検出→超伝導検出器
 - ▶ 1.6Kは減圧で容易に達成できるが、10kV/cmを印加が必要
 - ▶ 0.1Kは超伝導検出器の選択範囲も増えるが、それなりの冷凍技術が必要
- ▶ 我々の開発状況
 - ▶ 超伝導検出器(Kinetic Inductance Detector)の開発
 - ▶ 1.6Kでの使用を前提に、Nb薄膜を用いた開発
 - ▶ デザイン最適化・性能の理解・読み出しシステムの開発

謝辞

- ▶ この研究の一部は、科学研究費(26287047)助成を受け、また、高エネルギー加速器研究機構の測定器開発室および産業技術総合研究所のサポートの下で行われました。

計算（シミュレーション）による α の評価

C.Giordano Doctor Thesis "MKID arrays: panoramic detectors for CMB experiments"

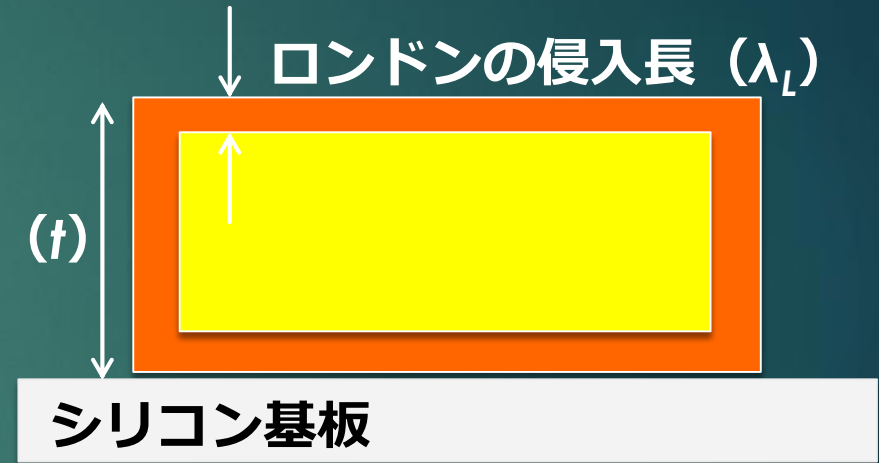
(2009)

表面インダクタンス L_s

$$L_s = \mu\lambda_L \left(\coth \frac{t}{\lambda_L} + \operatorname{cosech} \frac{t}{\lambda_L} \right)$$

産総研のSQUIDで λ_L を測定
sonnetで $\lambda_L=120\text{nm}$ のときの
 ω_0 を計算

Nbの厚み (t)



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(L_k + L_g)C}} \quad \omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{L_g C}} \quad \frac{\omega_0}{\omega'_0} = \sqrt{\frac{L_g}{L_k + L_g}}$$

$$\alpha = \frac{L_k}{L_k + L_g} = 1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega'_0} \right)^2$$

感度・エネルギー分解能

24

▶ 周波数の温度依存性

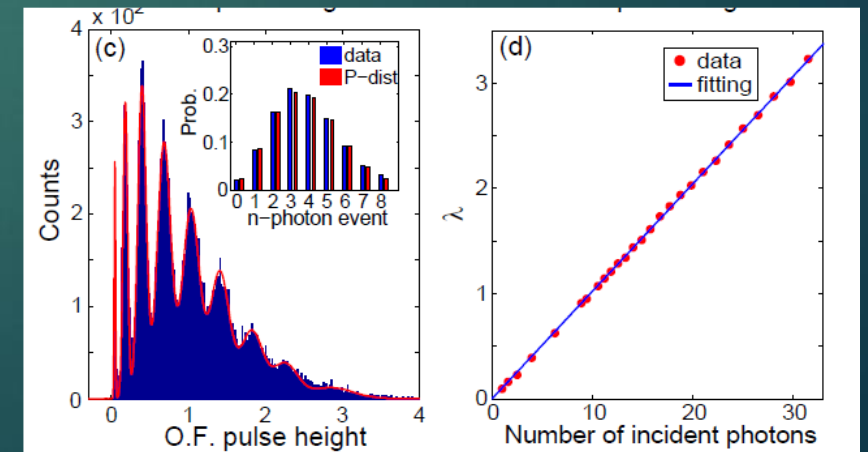
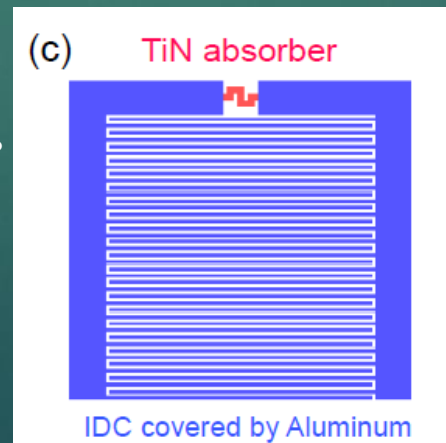
- ▶ 温度が上がるとクーパー対密度が減る。
- ▶ 温度の上昇と、外部エネルギー付与によるクーパー対密度に対応させることが可能。

- ▶ 位相の変化のクーパー対密度による微分：
$$\frac{d\theta}{dN_{qp}} = k \frac{\alpha Q}{V}$$

▶ 原理的にどこまでエネルギー分解能があるか？

- ▶ 原理的な限界は、クーパー対の個数の揺らぎ： $\sim \sqrt{\eta EF/\Delta}$
- ▶ 実際には、読み出し回路・環境雑音が影響。一般的に温度が低いほど分解能は高い。
- ▶ 実機の例：

- ▶ W.Guo et al. arXiv:1702.07993
- ▶ $\lambda=1550\text{nm}$ の光子7個まで見えた。
- ▶ エネルギー分解能0.22eV
- ▶ 原理的限界より約12倍悪い。



Off-the-shelf readout board

Xilinx Kintex-7 DSP board

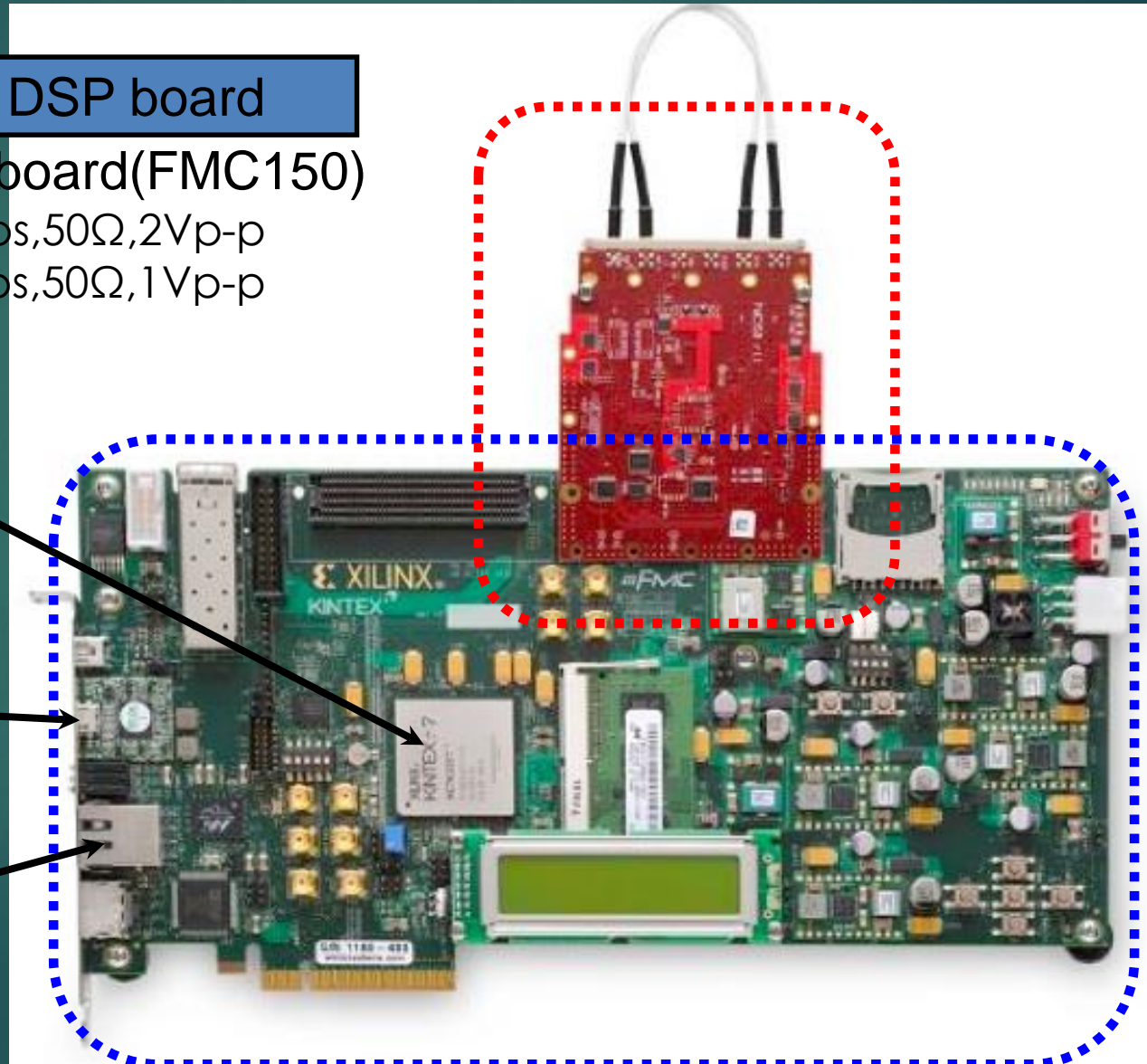
Analog Daughter board(FMC150)

ADC:2ch,14bit,250Msps,50Ω,2Vp-p
DAC:2ch,16bit,800Msps,50Ω,1Vp-p
CLOCK:491.52MHz

FPGA: Kintex-7

micro-USB (JTAG)

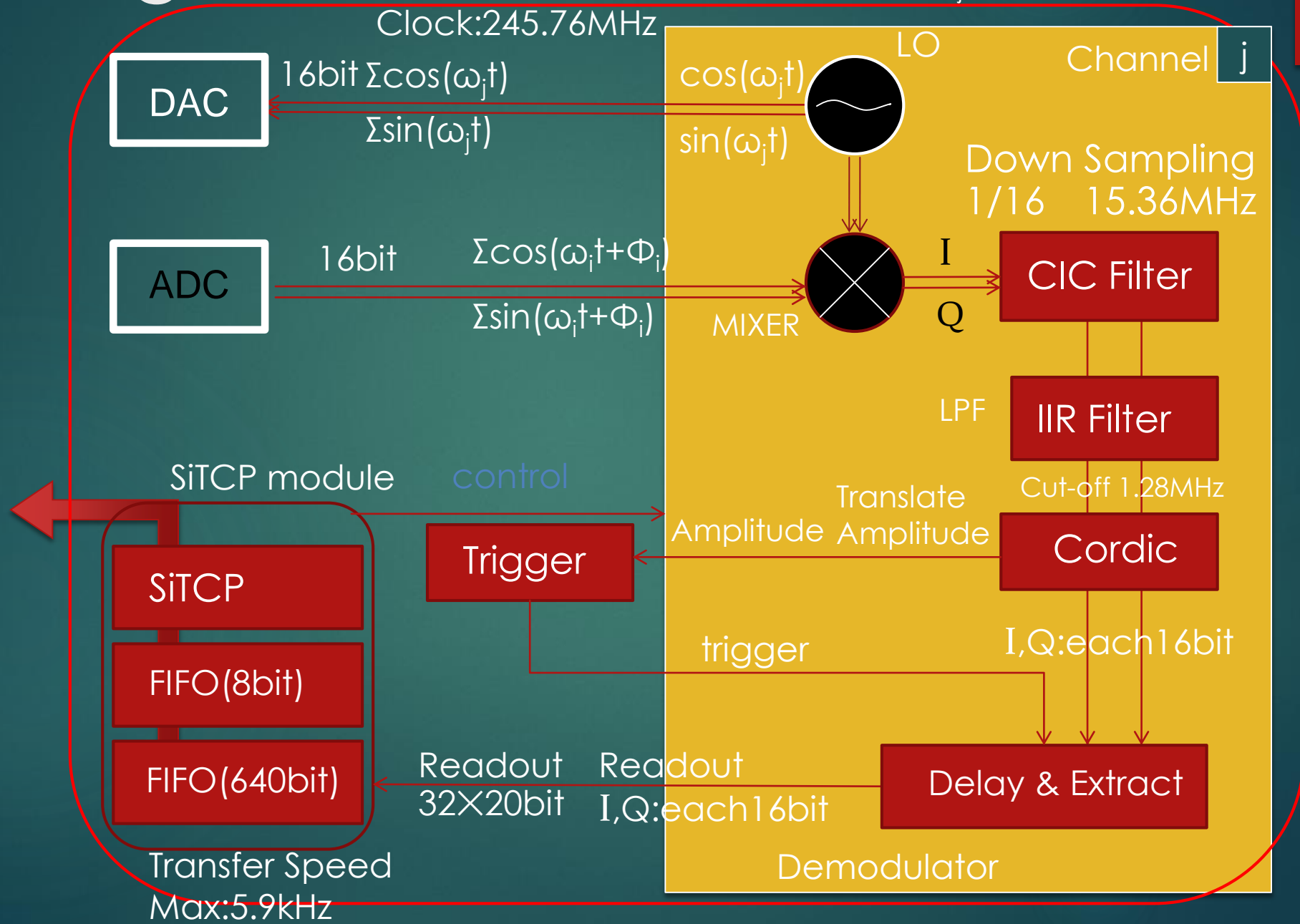
LAN port
→ SiTCP (Max.
1Gbps)



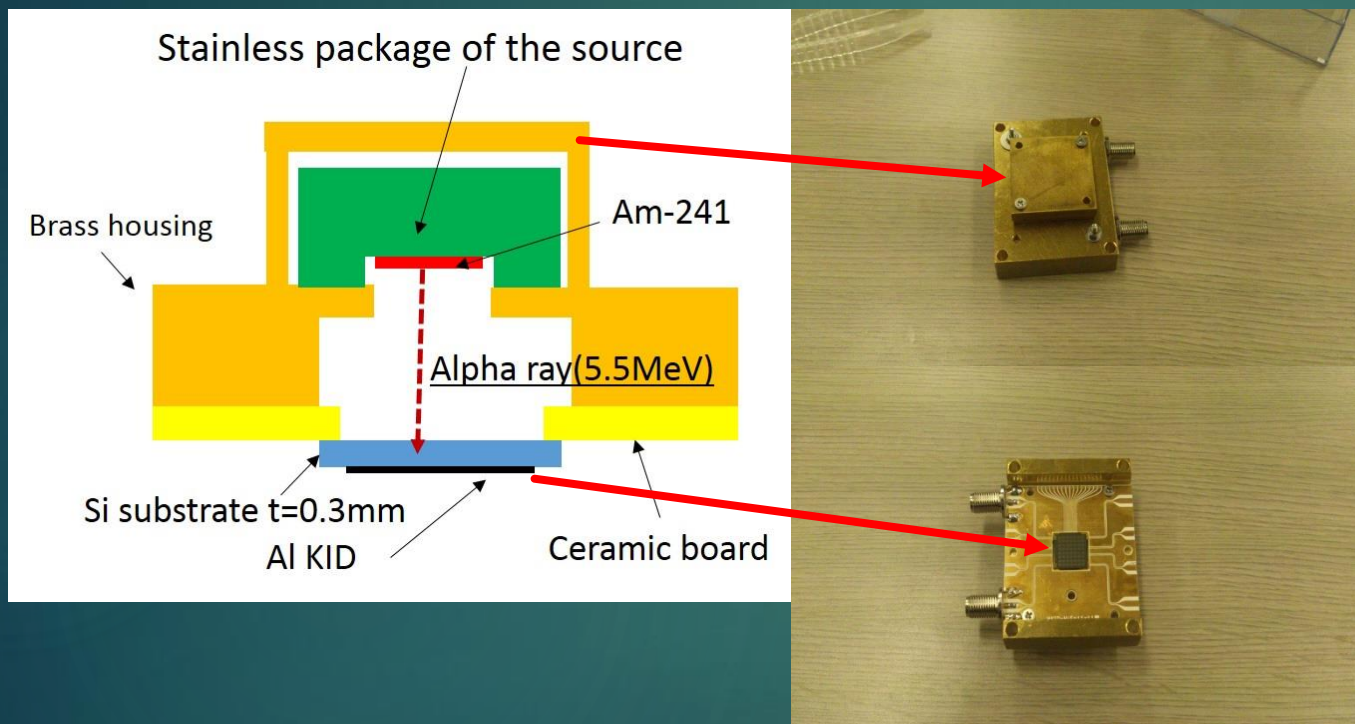
Digital logic

$$I = \sum \cos\{(\omega_i - \omega_j)t + \Phi_j\}$$
$$Q = \sum \sin\{(\omega_i - \omega_j)t + \Phi_j\}$$

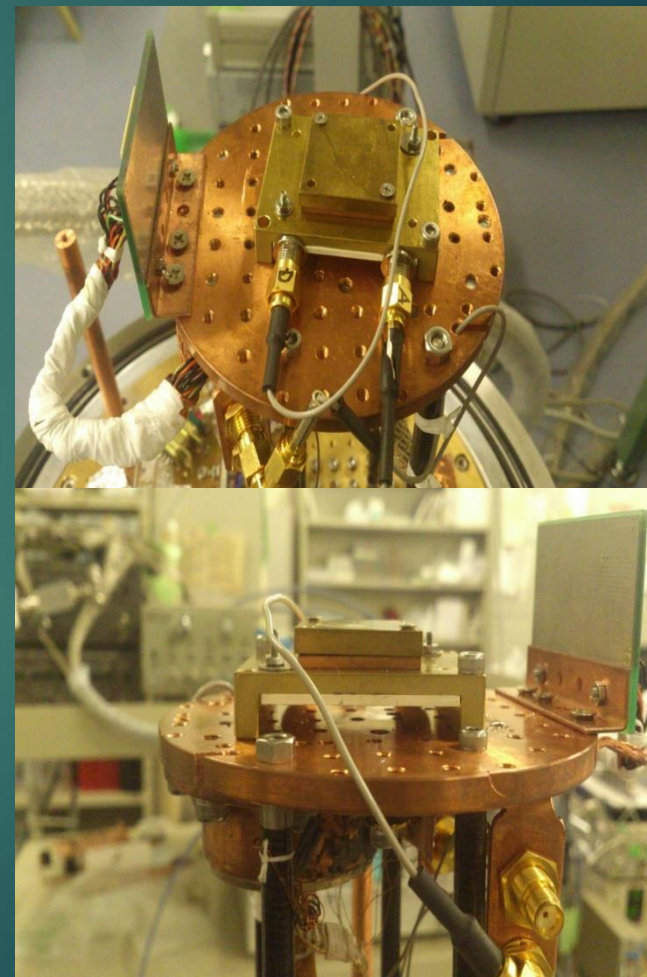
26



Measurement system for the readout demonstration



0.3 K fridge



We fabricated $10 \times 10 \text{ mm}^2$ KID with 100nm Al layer.

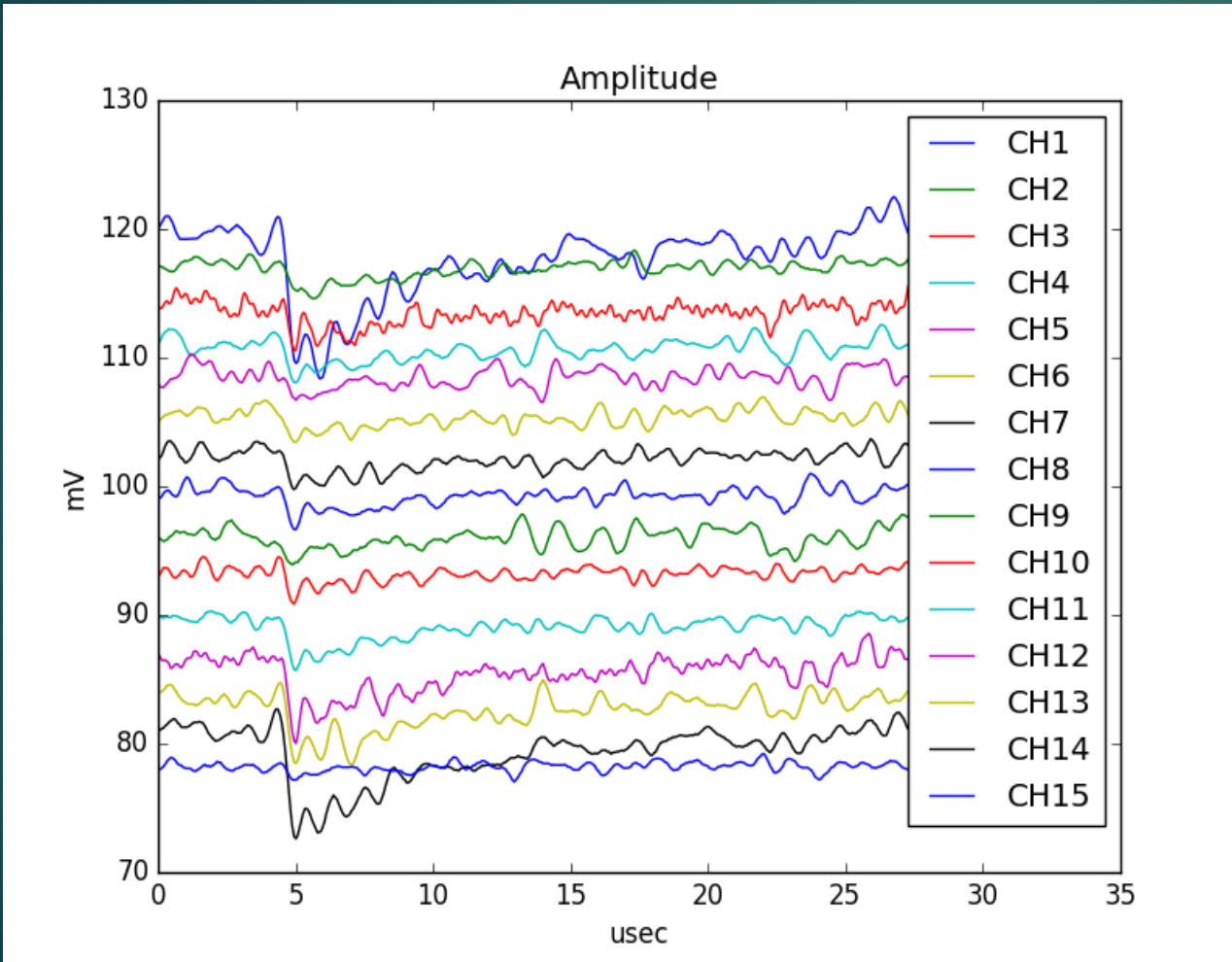
We try to detect phonon pulse signals produced by the alpha rays from Am-241.

Phonon signal

Yamada

28

- We chose 15 resonant frequencies from 4.0 to 4.22 GHz.



We successfully took phonon pulse signals of the 15 resonators simultaneously with the frequency domain multiplexing.

We accumulated 1000 events of phonons with about 10 Hz rate without any trouble.

The data are being analyzed.

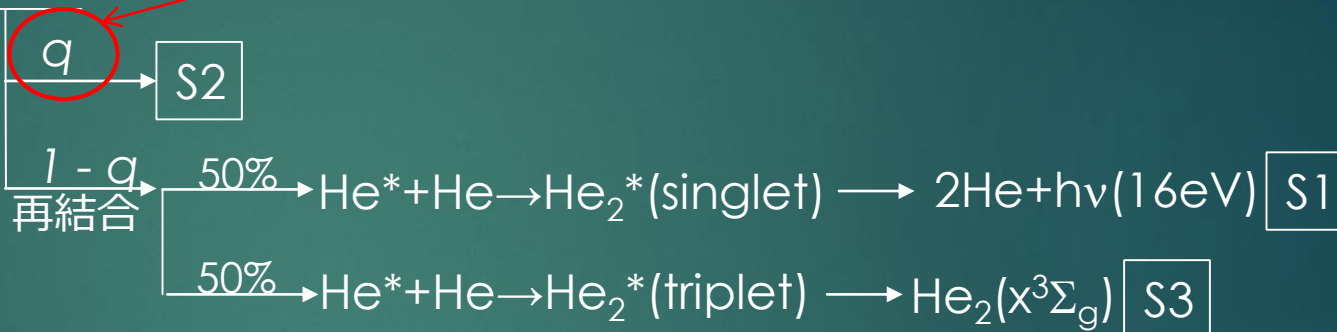
液体ヘリウム内の相互作用 (反跳ヘリウムの場合)

29

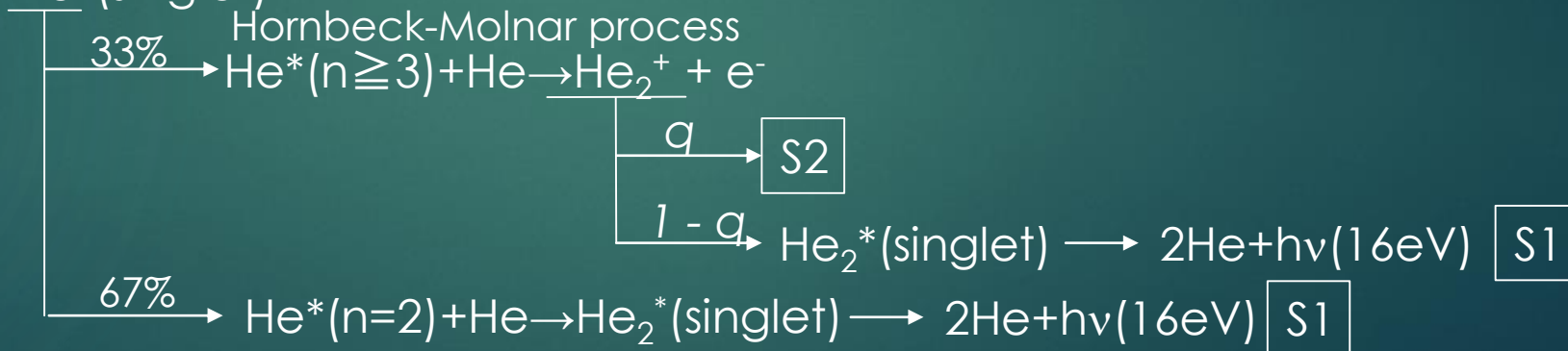
イオン化：



電荷収集効率：印加電場の関数

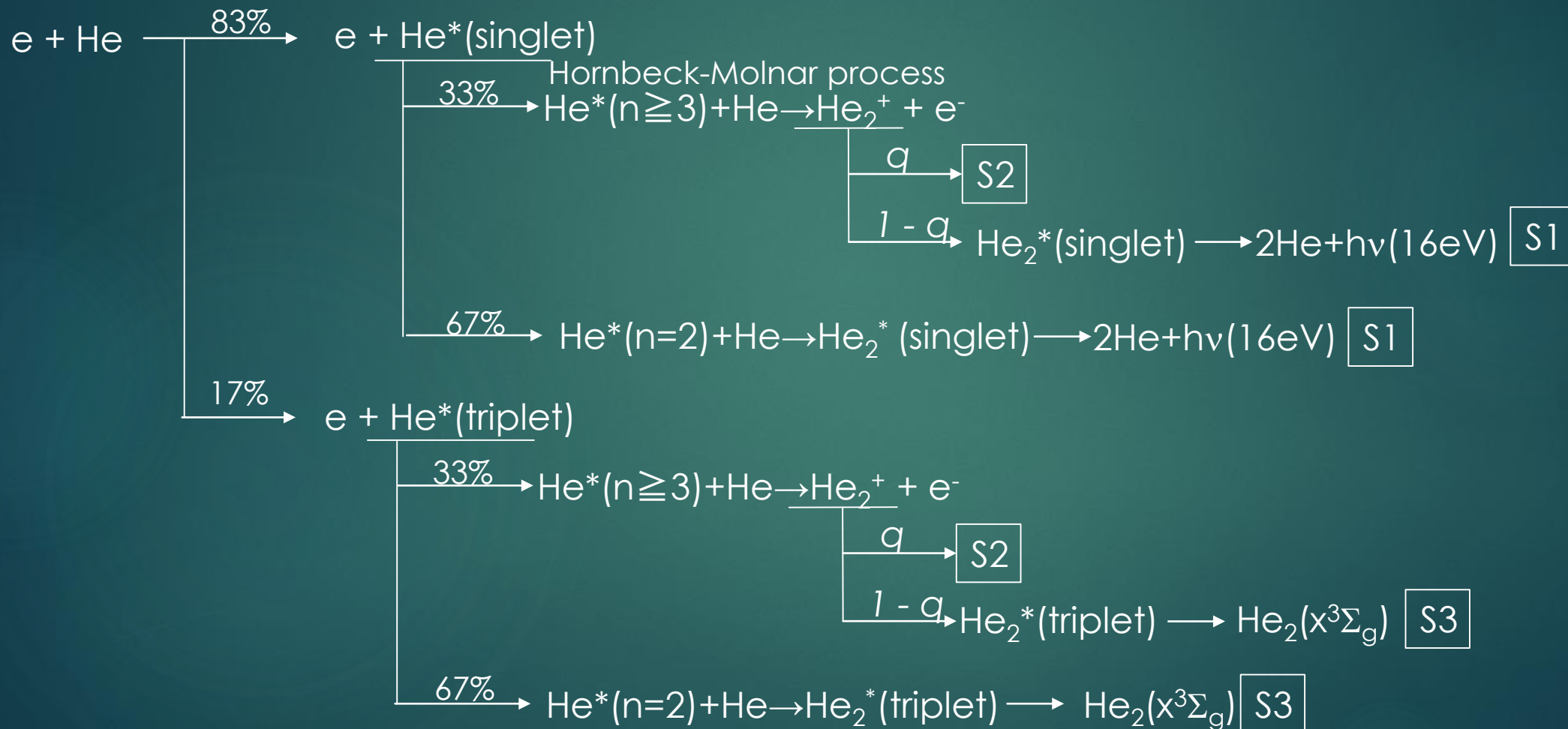


励起：



液体ヘリウム内の相互作用 (反跳電子の場合)

励起 :



信号強度の期待値

31

反跳ヘリウム

$$S1 = E\left[\frac{1}{2}Y_{el}(1-q) + \frac{2}{3}Y_{ex} + \frac{1}{3}Y_{ex}(1-q)\right]$$

$$S2 = E\left(Y_{el} + \frac{1}{3}Y_{ex}\right)q$$

$$S3 = EY_{el}\frac{1}{2}(1-q)$$

反跳電子

$$S1 = E\left[\frac{1}{2}Y_{el}^e(1-q) + 0.57Y_{ex}^e + 0.29Y_{ex}^e(1-q)\right]$$

$$S2 = E\left(Y_{el}^e + \frac{1}{3}Y_{ex}^e\right)q$$

$$S3 = E\left[\frac{1}{2}Y_{el}^e(1-q) + 0.093Y_{ex}^e + 0.047Y_{ex}^e(1-q)\right]$$

Y_{el} : 単位エネルギーあたりのイオン化原子数

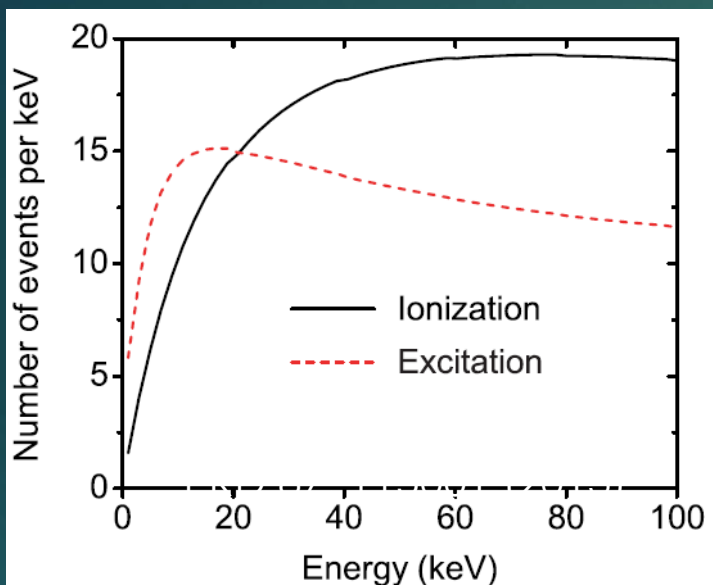
Y_{ex} : 単位エネルギーあたりの励起原子数

S3は、スピントリプレットヘリウム分子数

液体ヘリウムTPCに関するパラメターの値

32

反跳ヘリウム



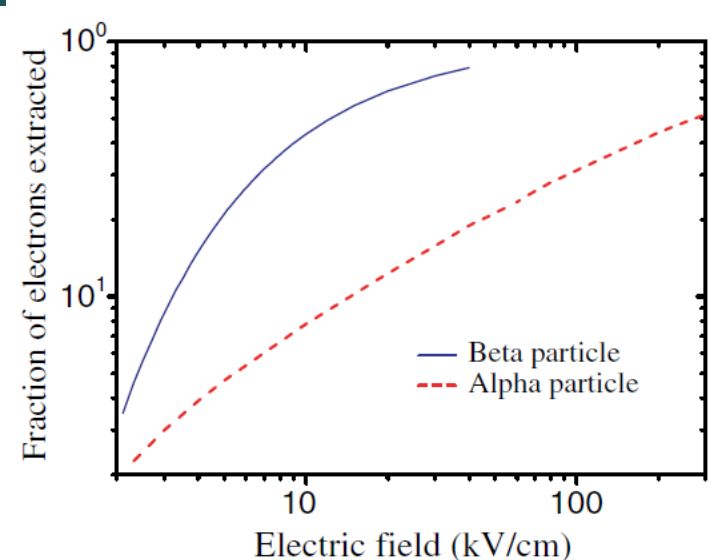
反跳電子

$$Y_{el}^e = 22.7 / \text{keV}$$

$$Y_{ex}^e = 10.2 / \text{keV}$$

Bull. Chem. Soc. Jpn 49, 933 (1976)

Bull. Chem. Soc. Jpn 47, 2174 (1974)



電荷収集効率 q

電子、ヘリウム : JINST 7, P01002 (2012)

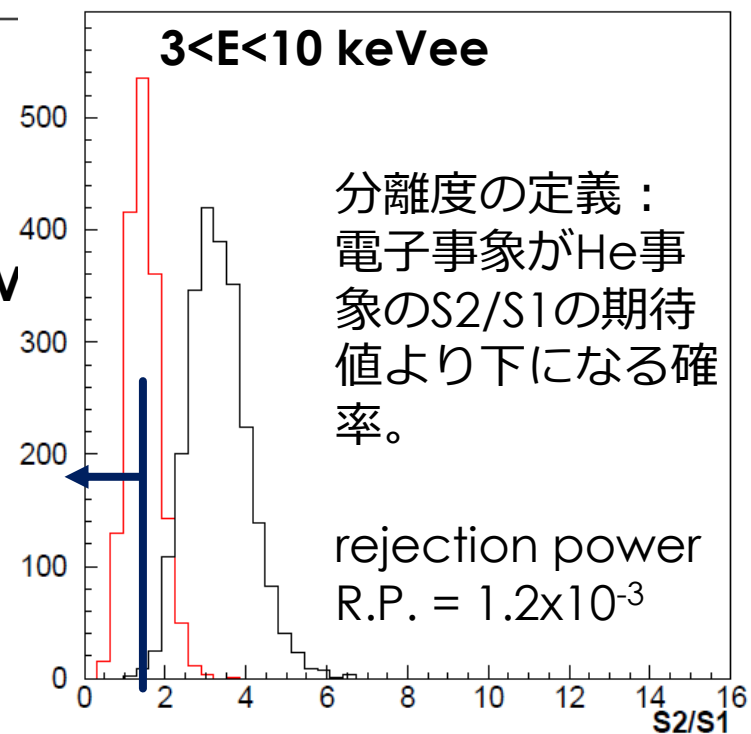
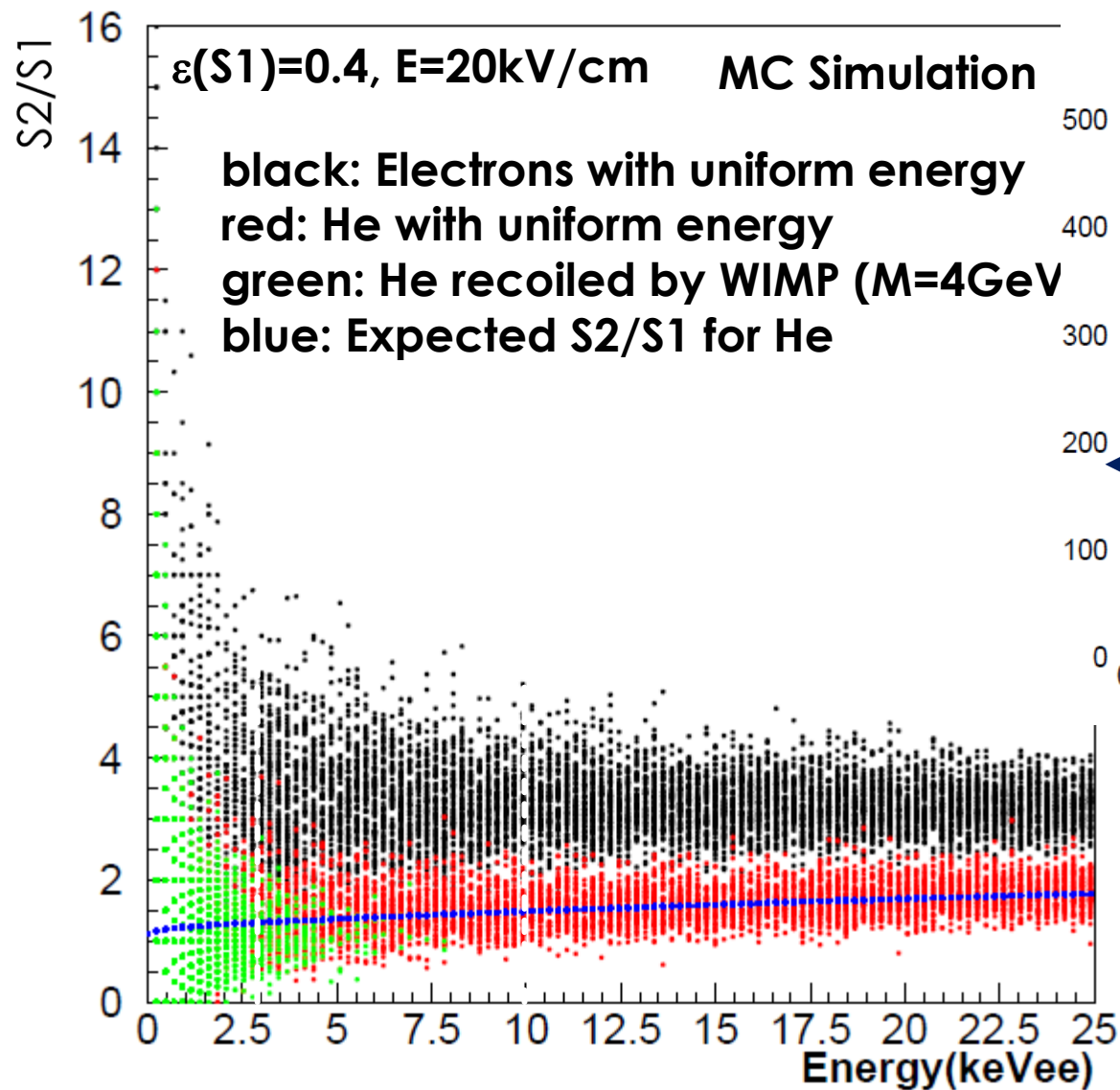
アルファ線 : PRA 85, 042718 (2012).

電場が10kV/cmでおおよそ $S1 \sim 10/\text{keV}$

液体ヘリウムTPCのシミュレーション

33

- ▶ S1, S2の計算方法
 - ▶ EY_{el} , EY_{ex} を期待値に持つポアソン分布
 - ▶ 励起状態、スピン状態、電荷回収率を各確率でランダムに選択→S1, S2を事象毎に計算
 - ▶ S1の検出効率20, 40%の二つのオプション
 - ▶ S2は80%と仮定
 - ▶ 電場は、10 kV/cm と20 kV/cmのオプション
- ▶ 事象生成
 - ▶ 反跳ヘリウム・電子ともに0~30keVに均一に生成
 - ▶ ヘリウム・電子分離率の評価
 - ▶ 暗黒物質(WIMP)による反跳ヘリウムを生成
 - ▶ WIMPは、マクスウェル・ボルツマン分布に従うと仮定
 - ▶ 2体弾性散乱により反跳エネルギーを計算



$\epsilon(S1)$	E [kV/cm]	Rejection Power
0.2	10	1.1×10^{-2}
0.2	20	0.60×10^{-2}
0.4	10	0.28×10^{-2}
0.4	20	0.12×10^{-2}

暗黒物質に対する感度計算

(1) マクスウェル・ボルツマン分布を仮定 $f(v)dv = \frac{4}{v_0^3 \sqrt{\pi}} v^2 e^{-\frac{v^2}{v_0^2}} dv$
 → 速さ v を生成
 $v_0 = 220 \text{ km/s}$

(2) 2体弾性散乱と仮定。重心系で一様な方向に散乱角度を振り、実験室系に戻す。

(3) WIMPの質量を変えながら、それぞれ10万事象生成し、 $3 < E < 10 \text{ keVee}$ の測定エネルギー範囲に入る事象数より、検出効率 ε を計算。

(4) 次の式から90%C.L. として、 $R < 2.3(\text{Signal, B.G.}=0)$ とし、断面積の上限を求める。

$$R = \varepsilon \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\rho_0 v_0}{M_\chi} \frac{\mu_i^2}{\mu_n^2} A^2 \sigma_{0,n}^{SI} |F(q)|^2 \frac{M_T}{M_N} T$$

$\rho_0 = 0.4 \text{ GeV/cm}^3$ $\mu_i (\mu_n)$: ヘリウム(中性子)とWIMPの換算質量

$A = 4$: ヘリウムの質量数 $\sigma_{0,n}^{SI}$: Spin-Independent 断面積

$|F(q)|$: 形状因子、=1とおく。 M_T : 標的質量

M_N : ヘリウム原子の質量 T : 観測時間

M_χ : WIMPの質量

ちなみにHERONでは

36

- ▶ 液体ヘリウム温度：40mK
 - ▶ 電子の易動度： $1.7 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{Vs}$
 - ▶ 電場0.02 V/mで40m/sに達してしまう。
 - ▶ ヘリウム3を30ppm混ぜると、量子渦の発生が抑えられる
 - ▶ 300V/mで分離し、液面に10kV/mの電場をかけることを提案。
- ▶ 検出器は、MMC (Metallic Magnetic Calorimeter)
 - ▶ $\Delta E \sim 10\text{eV}$ for 16eV photon
 - ▶ 常磁性体にエネルギー（熱）が加わると、磁束が変化。それをSQUIDで読み出す。50mK以下で作動。
- ▶ MMCを多チャンネルで読む
 - ▶ 配線からの熱流入は問題になると予想される。

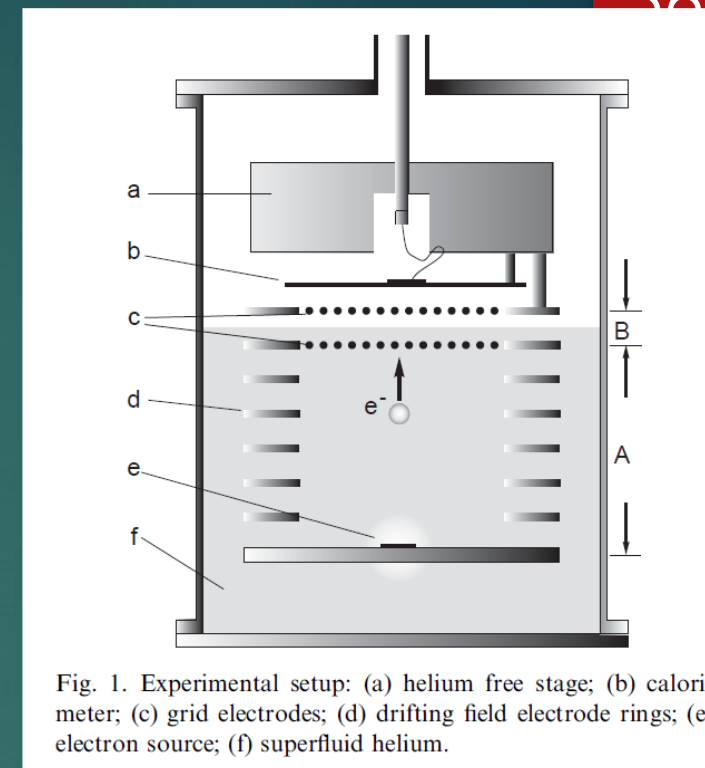
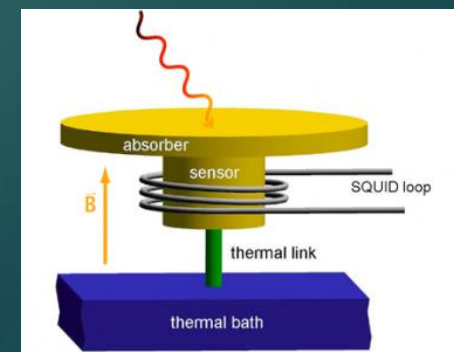


Fig. 1. Experimental setup: (a) helium free stage; (b) calorimeter; (c) grid electrodes; (d) drifting field electrode rings; (e) electron source; (f) superfluid helium.

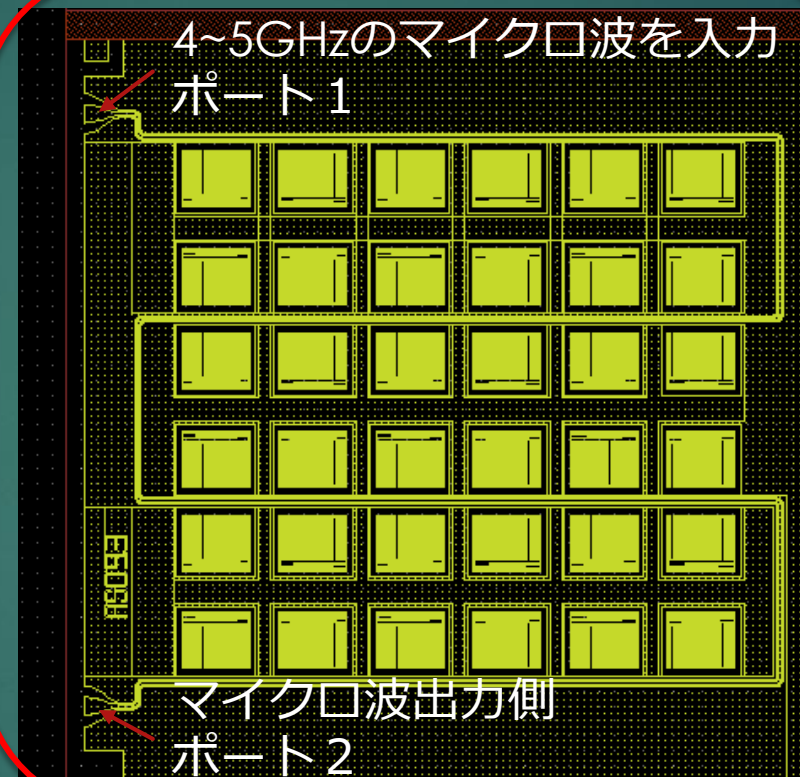
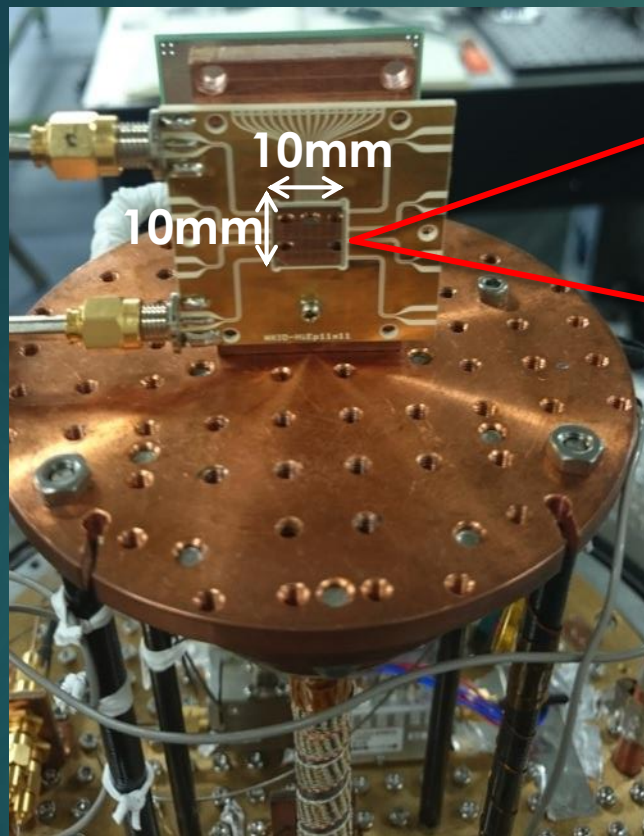
B. Sethumadhavan et al., NIM A 520 (2004) 142-144.

MMC



共振周波数の温度依存性の測定装置

37



- 高エネルギー加速器研究機構の測定器開発室が持つ、0.3K冷凍機を利用
- 温度を0.3Kから6.5Kまで変えて、ベクトルネットワークアナライザーで、ポート1からの入力とポート2での出力の比 S_{21} を測定。

温度依存性の理論式

- ▶ 共振周波数の温度依存性($f(T)$)は、BCS理論に基づき計算。

$$\frac{f(T) - f(0)}{f(0)} = \alpha \frac{\sigma_2(T) - \sigma_2(0)}{6\sigma_2(0)}$$

- ▶ ここで、 $\sigma_2(T)$ は、Mattis and Bardeenによって与えられた式。

$$\frac{\sigma_2(T)}{\sigma_n} = \frac{1}{\hbar\omega} \int_{\Delta-\hbar\omega}^{\Delta} d\epsilon \frac{[1 - 2f(\epsilon + \hbar\omega)](\epsilon^2 + \Delta^2 + \hbar\omega\epsilon)}{\sqrt{\Delta^2 - \epsilon^2} \sqrt{(\epsilon + \hbar\omega)^2 - \Delta^2}}$$

$$f(\epsilon) = \frac{1}{e^{\epsilon/kT} + 1}$$

$\Delta(T)$ は、BCS理論のギャップ方程式から求まる。

- ▶ α を自由パラメータとして、共振周波数の温度依存性をフィット。

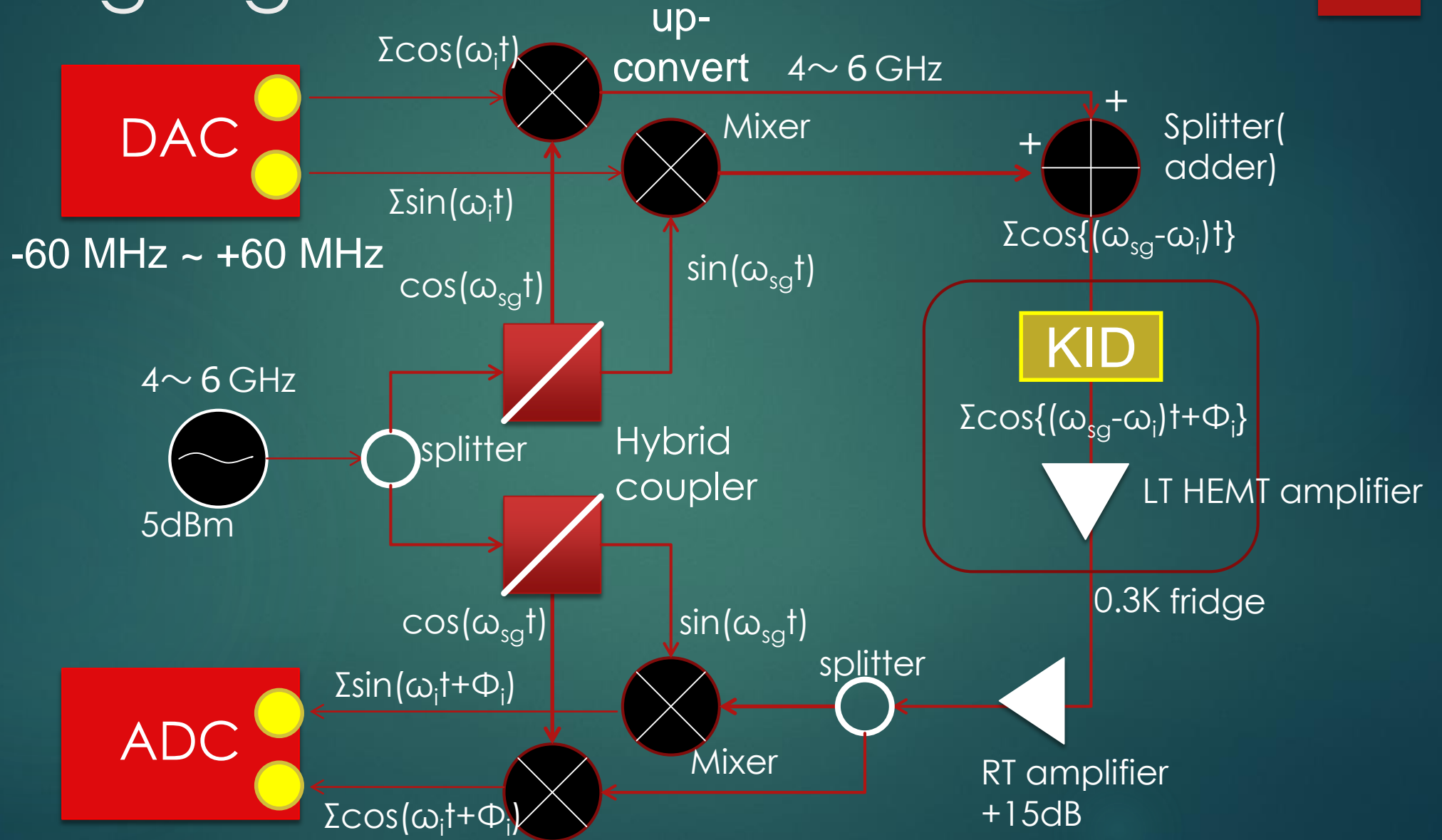
D.C. Mattis and J. Bardeen, Phys. Rev. 111, 412-417 (1958)

Specification of a readout system

39

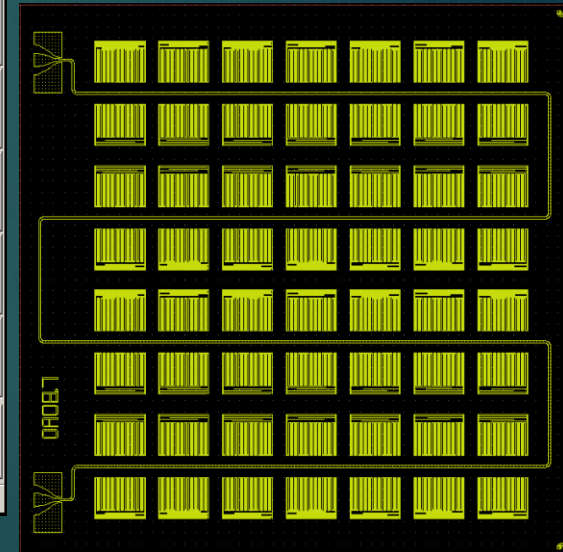
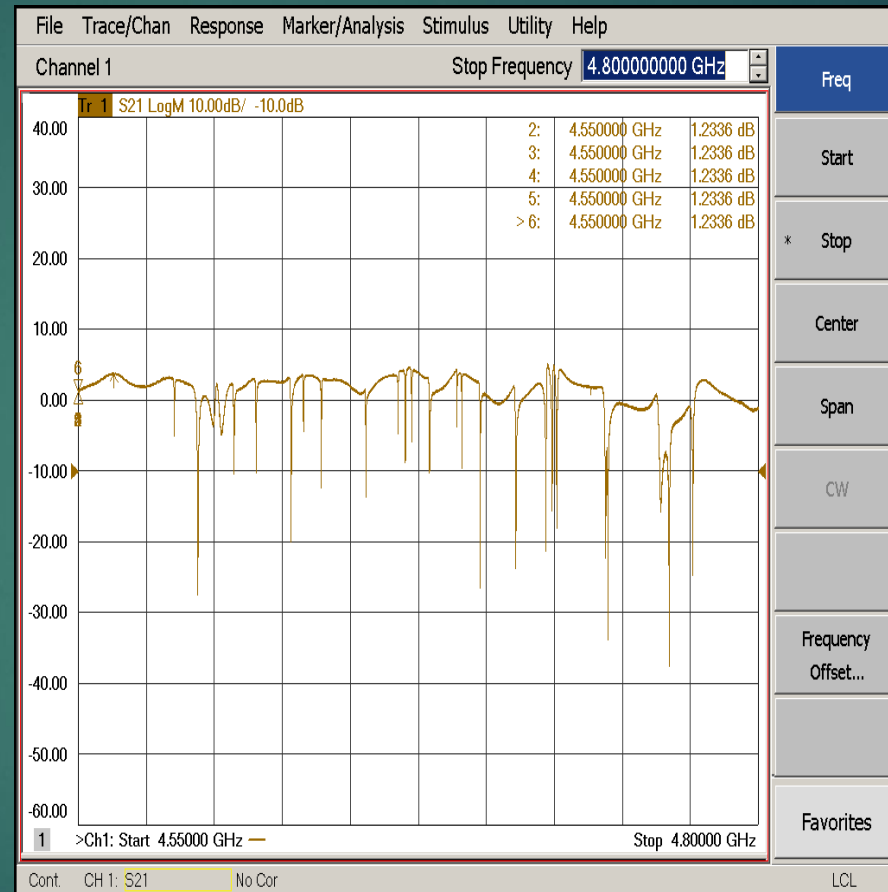
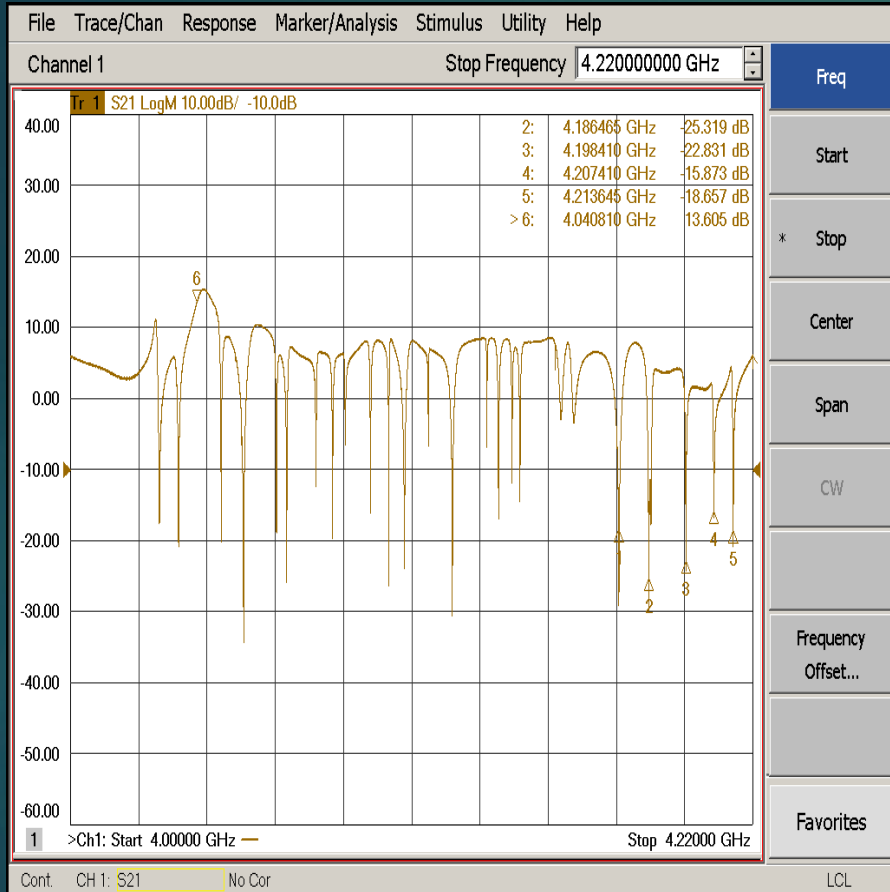
- ▶ Frequency domain multiplexing
 - ▶ Readout of ~500 nsec pulse signals for multiple channels simultaneously.
- ▶ Self-trigger system
 - ▶ To extract pulse signals with limited bandwidth
- ▶ Interface to PCs
 - ▶ We employ SiTCP technology
 - ▶ T. Uchida, IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, 1631 (2008).
- ▶ We use Xilinx Kintex-7 DSP board; KC705 with an analog daughter board FMC150
 - ▶ The DAC bandwidth ~240 MHz.
 - ▶ We use -60 ~ +60 MHz for the readout; 20 channels with 6 MHz spacing.
- ▶ The readout system has mainly been developed by Yosuke Yamada (Okayama U.)

Analog logic



AI KID resonant peaks

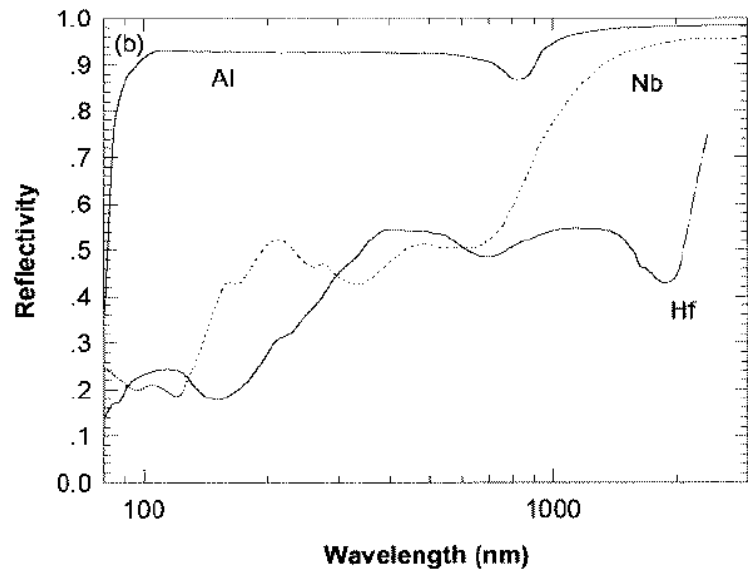
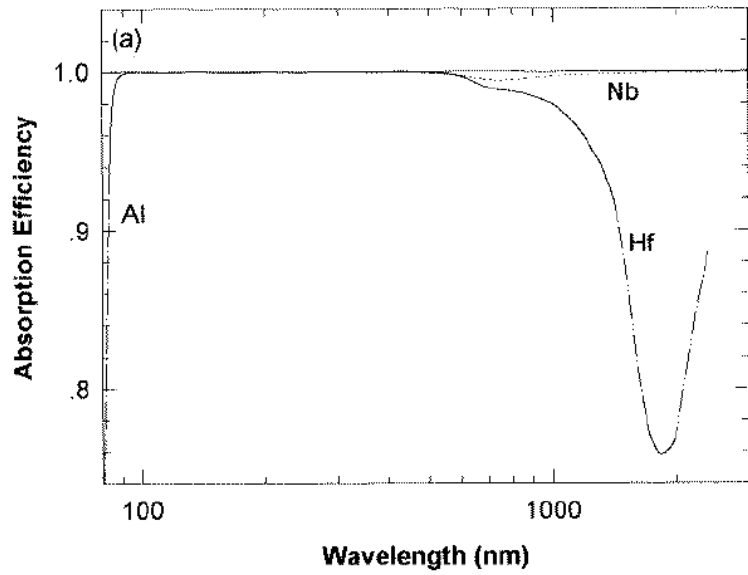
@0.3K



4.0GHz

4.22GHz 4.55GHz

4.8GHz



PRB 7, 4311 (1972)

