マグノン検出器を用いたアクシオン探索実験

池田 智法[A]

身内賢太朗[A]、伊藤飛鳥[A]、早田次郎[A]、鹿野豊[B,C]

神戸大学[A]、慶応大量子[B]、チャップマン大量子科学研[C]

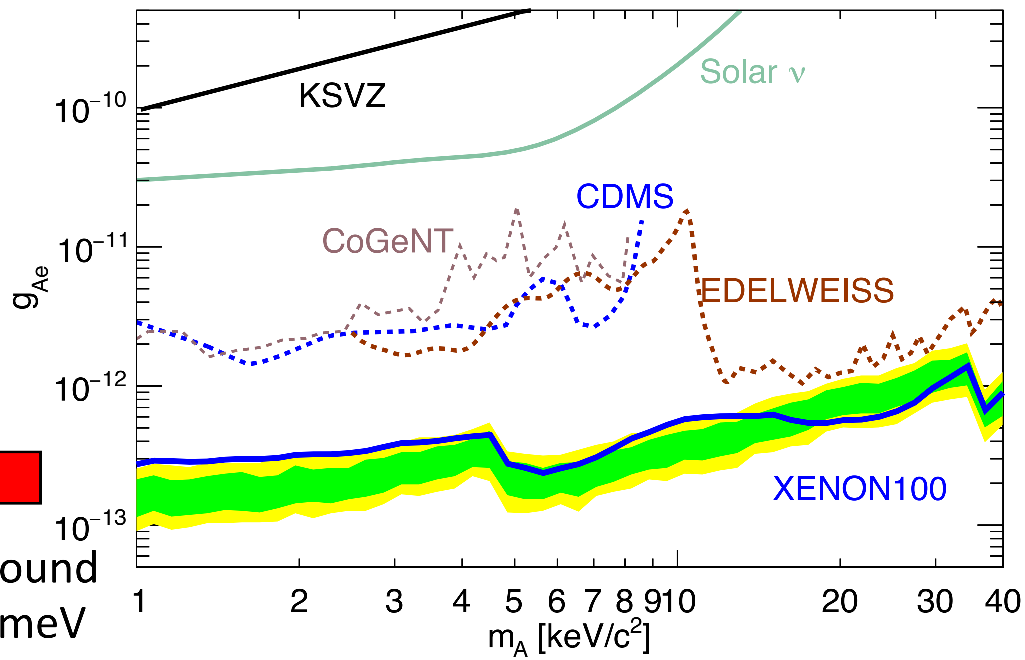
1. モチベーション
2. 観測原理
3. アクシオン探索実験結果
4. まとめ

モチベーション

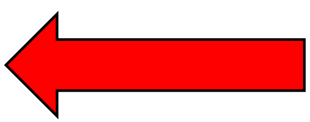
- ✓ 東京大学先端研究所センターでの研究室見学にて

→量子コンピュータ開発技術を暗黒物質探索実験に応用できないか

- ✓ DMハローアクシオンのg_{ae}(axion-electron coupling)直接観測



E. Aprile *et al.*
Phys. Rev. D 90, 062009



Astrophysical bound
1μeV～1meV

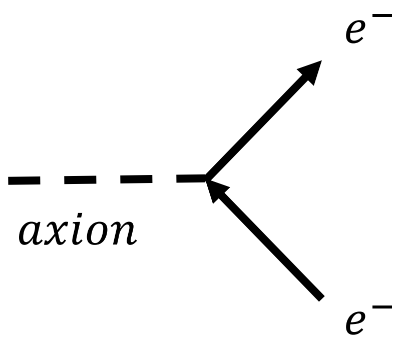
➢ **超低質量側を量子コンピュータ開発技術を応用して探索**

観測原理

アクシオンと電子の相互作用

✓ フェルミオンとのカップリング項

$$\mathcal{L} = g_{aff}\partial_\mu a(x)\bar{\psi}(x)\gamma^\mu\gamma_5\psi(x)$$



✓ 非相対論的なところでのアクシオンと電子の相互作用項

$$-\frac{g_{aee}\hbar}{2m}\hat{\sigma}\cdot\nabla a = -2\left(\frac{e\hbar}{2m}\right)\left(\frac{1}{2}\hat{\sigma}\right)\cdot\left(\frac{g_{aee}}{e}\nabla a\right)$$

μ_B:ボーア磁子　B_a:アクシオン磁場

S: 電子スピン

✓ アクシオン磁場の強さ

$$B_a = 3.3\times10^{-8}\times g_{aee}\times\left(\frac{\rho}{0.45GeV/cm^3}\right)^{1/2}\left(\frac{v_a}{220km/s}\right)[\mathrm{T}]$$

✓ 1電子あたりの相互作用は非常に小さい

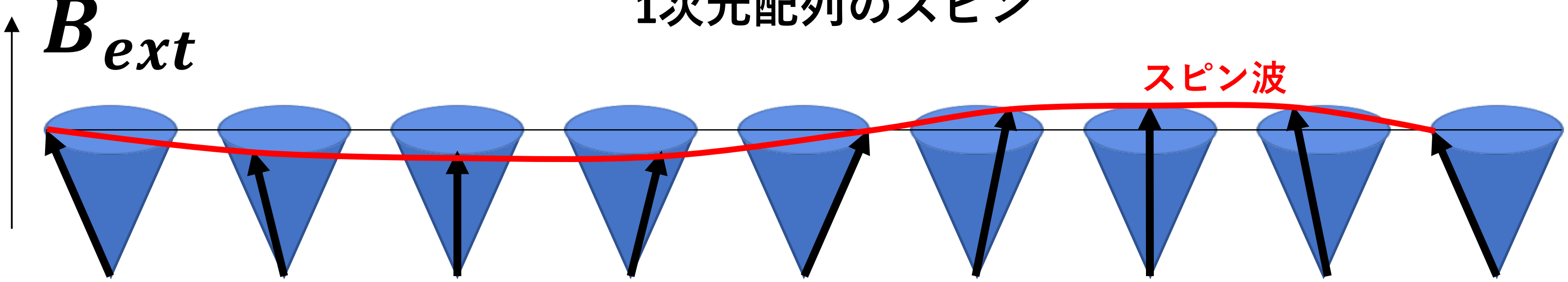
電子のスピン集団

✓ 強磁性体中のスピン同士の相互作用

$$\hat{\mathcal{H}} = -g\mu_{\rm B}B_z\sum_i \hat{S}_i^z - 2J\sum_{\langle i,j\rangle}\hat{\mathbf{S}}_i\cdot\hat{\mathbf{S}}_j,$$

隣り合うスピンの相互作用
隣のスピンの向きをわずかに傾ける

1次元配列のスピン



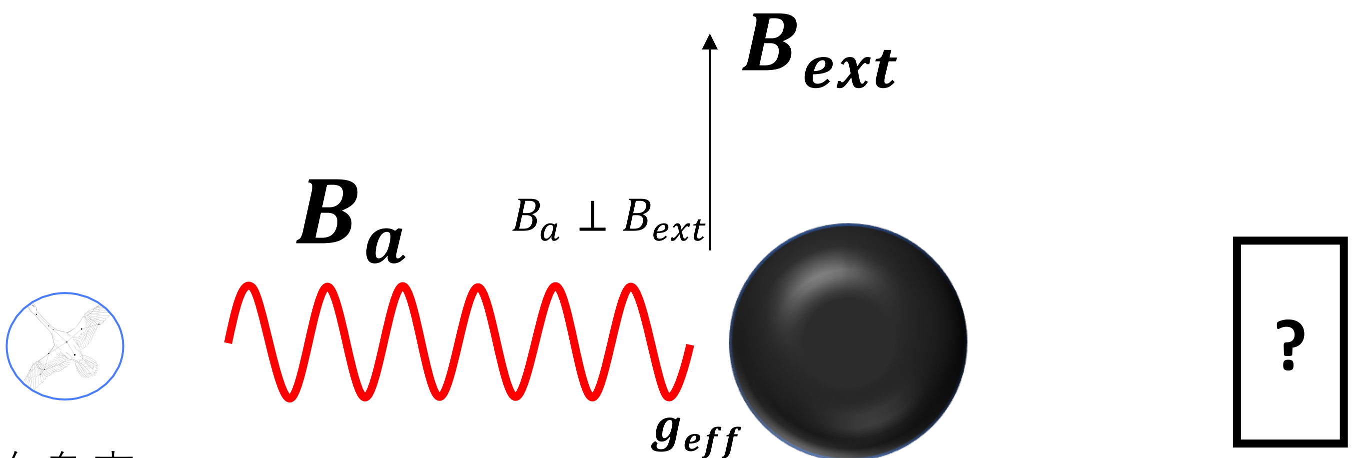
➢ スピン集団の励起状態は強磁性体中を伝わる波(**マグノン**)として記述できる

✓ マグノンとアクシオンの相互作用項

$$\mathcal{H}_{int} = \hbar g_{eff}(\hat{a}^\dagger\hat{c} + \hat{a}\hat{c}^\dagger),\quad \boxed{g_{eff} \equiv \frac{g\mu_B B_a}{2\hbar}\sqrt{2sN},}$$

$\sqrt{N}$倍大きい

アクシオンの検出方法



白鳥座

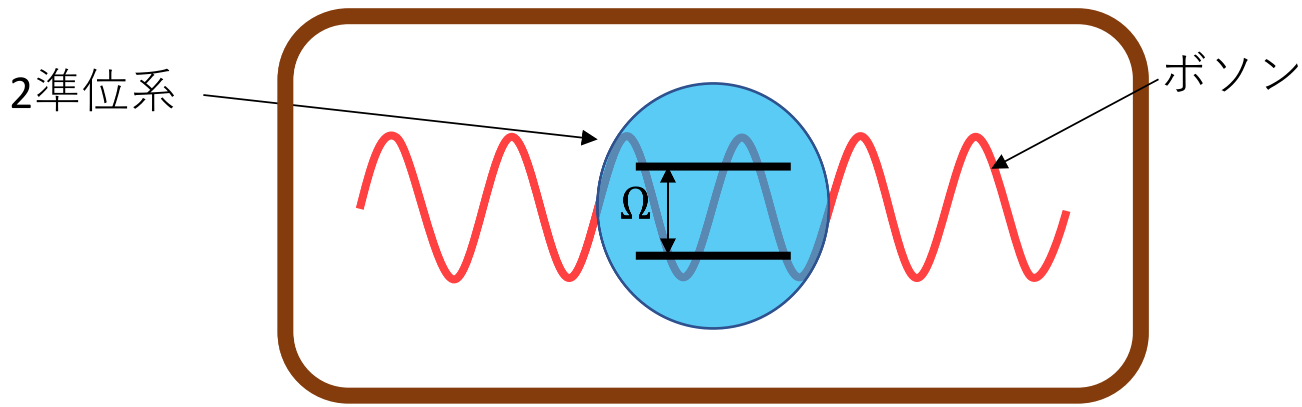
Ferromagnetic
(磁性体)

検出器
Amplitude・Phase測定
マグノン数測定

量子限界ノイズを超えた測定

→量子非破壊測定を使ったマグノンカウンティング

量子非破壊測定
(Quantum non demolition measurement)



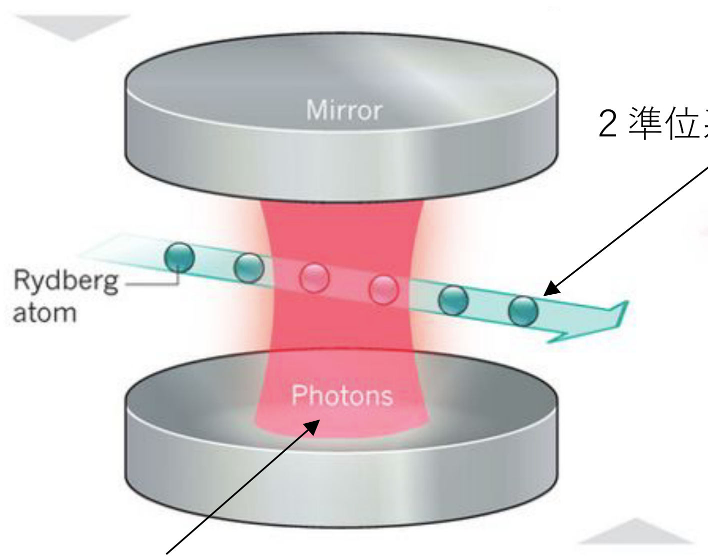
✓ 系のハミルトニアン

$$H = \hbar\omega_r\left(a^\dagger a + \frac{1}{2}\right) + \frac{\hbar}{2}\left(\Omega + \underbrace{\boxed{\frac{2g^2}{\Delta}a^\dagger a}}_{\text{ac-Stark shift}} + \underbrace{\boxed{\frac{g^2}{\Delta}}}_{\text{Lamb shift}}\right)\sigma^z \quad \text{, with } \Delta = \omega_r - \Omega$$

2準位系の遷移周波数がボソン数に依存

➢ **2準位系の遷移周波数を測定することでボソンの状態を変えることなくボソン数を決定できる (QND measurement)**

リドベルグ原子を使った光子数の量子非破壊測定



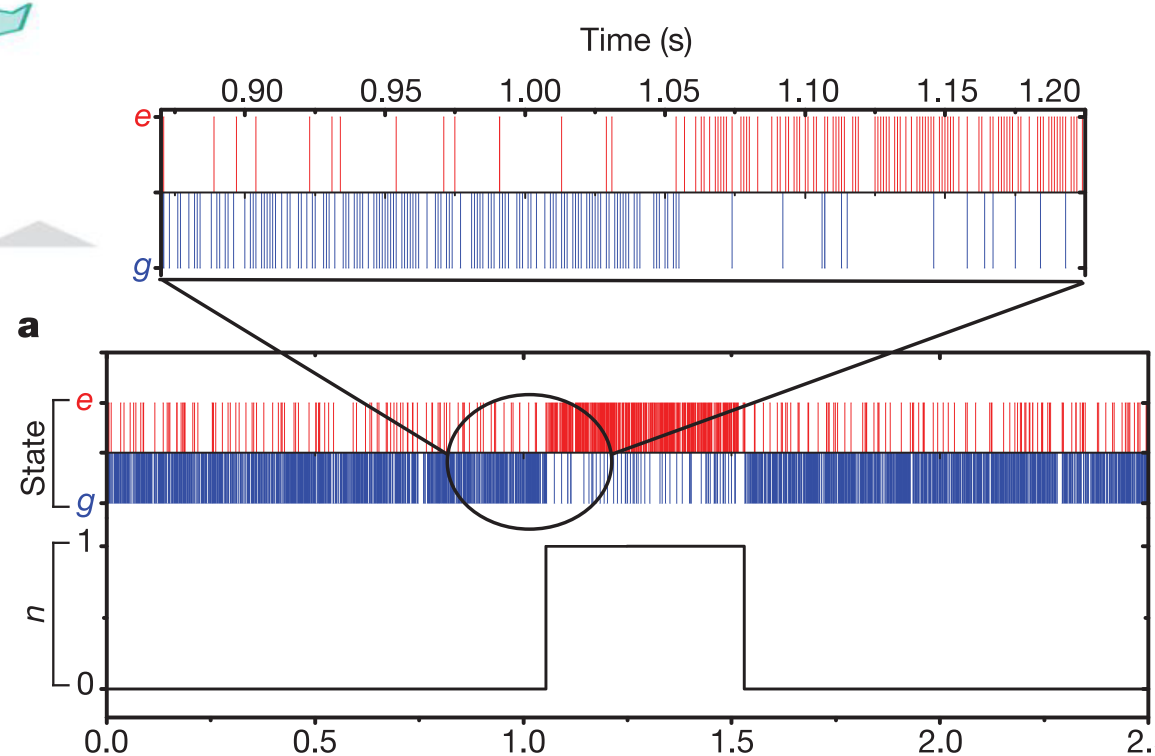
2 準位系

|e>　n=1

|g>　n=0

ボソン数 n

S.Gleyzes et al, Nature, 446, 297(2007)



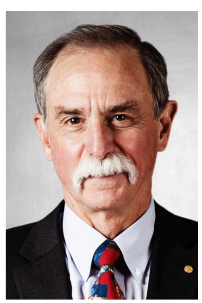
https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2012/summary/

The Nobel Prize in Physics 2012

© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Serge Haroche

Prize share: 1/2



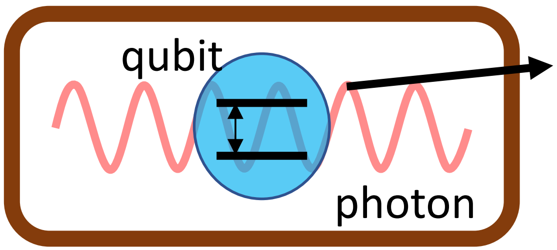
© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

David J. Wineland

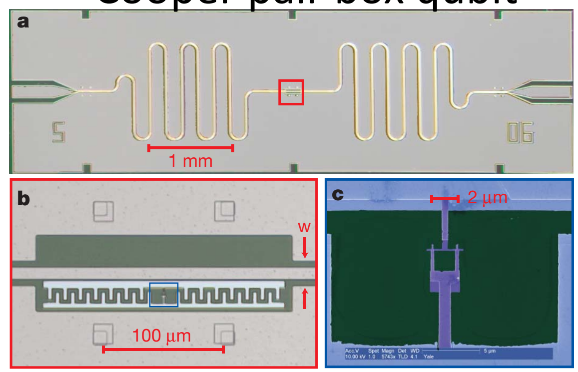
Prize share: 1/2

人工原子(Qubit)を使った光子数測定

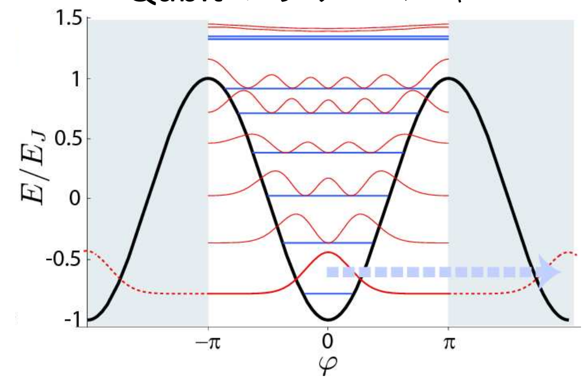
✓ リドベルグ原子から人工原子(Qubit)へ **D.I.Schuster, et.al., Nature 445 515(2007)**



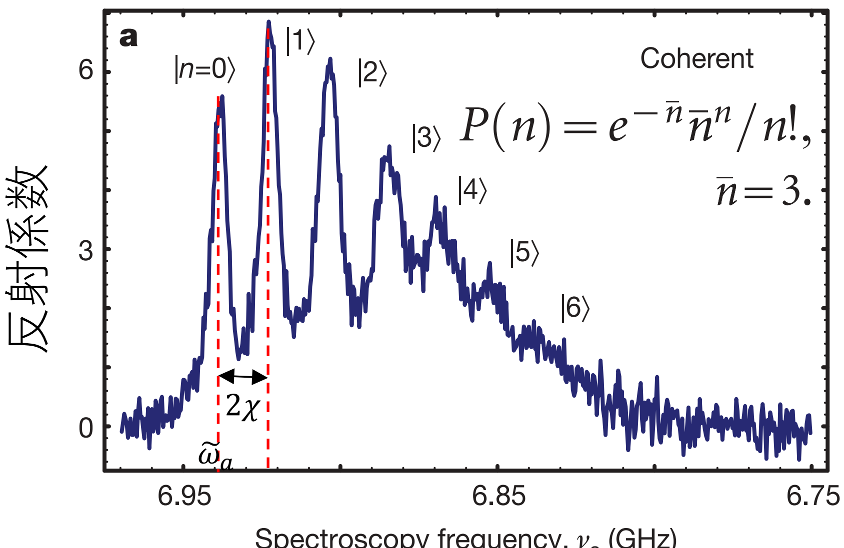
Cooper pair box qubit



Qubitのポテンシャル



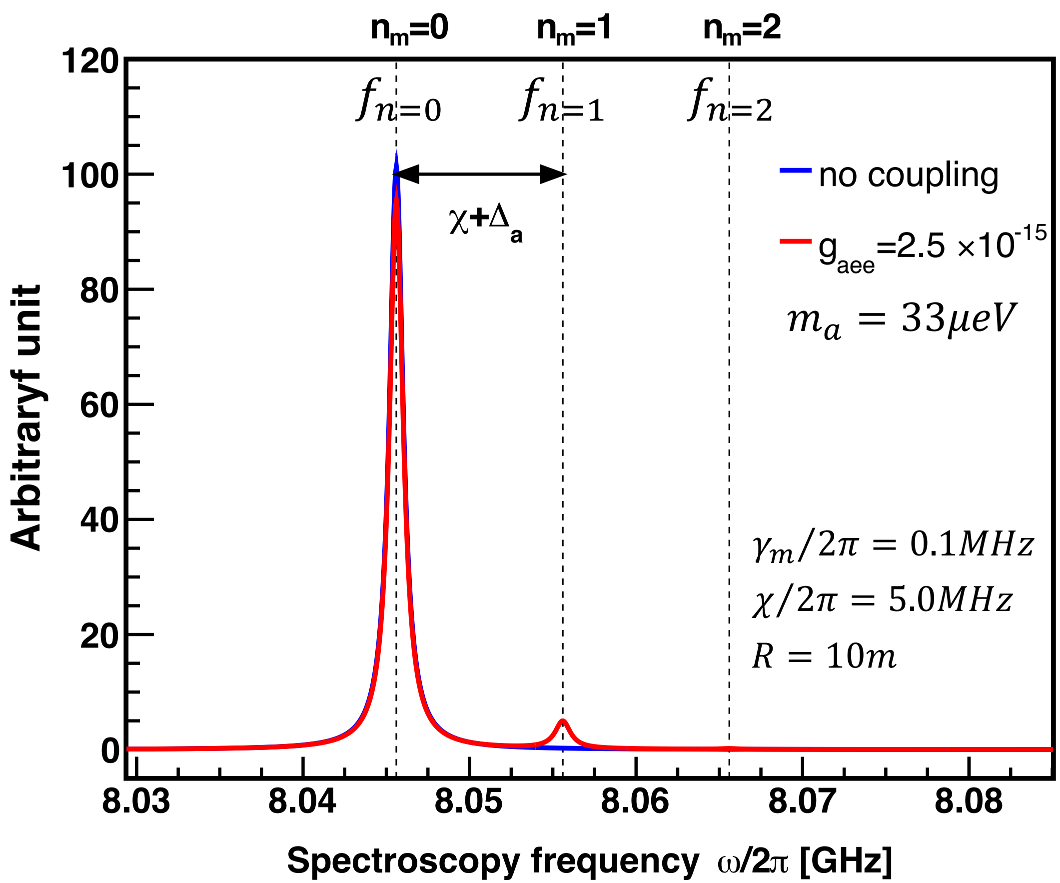
J.Koch, et.al, Phys.Rev.A76,042319(2007

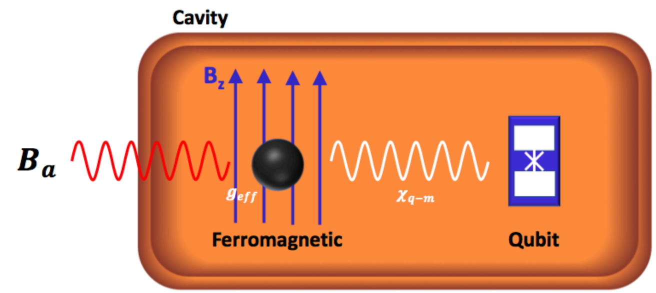


$$H_{\mathrm{eff}} = \hbar\omega_r \hat{a}^\dagger\hat{a} + \frac{\hbar}{2}\left(\tilde{\omega}_a + 2\chi\hat{a}^\dagger\hat{a}\right)\hat{\sigma}_z$$

➢ **Qubitの遷移周波数から光子数を決定できている**

アクシオン-マグノン結合の期待されるスペクトル





✓ アクシオンとマグノンの結合力

$$g_{eff} \equiv \frac{g\mu_B B_a}{2\hbar}\sqrt{2sN},$$

✓ 平均マグノン数

$$\bar{n}^m_{\pm} = \frac{g^2_{eff}}{\gamma^2_m/4 + (\Delta_a \pm \chi)^2},$$

➢ **アクシオンとマグノンが結合していれば、Qubitの遷移周波数$f_{n=1}$にピークがたつ**

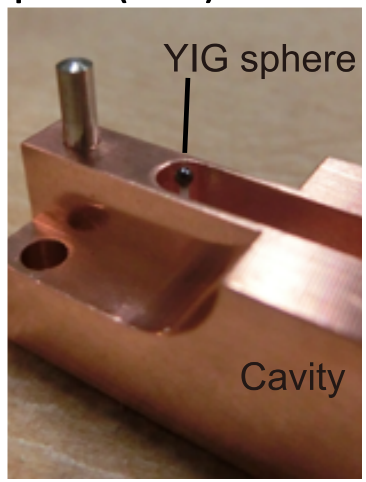
実験結果

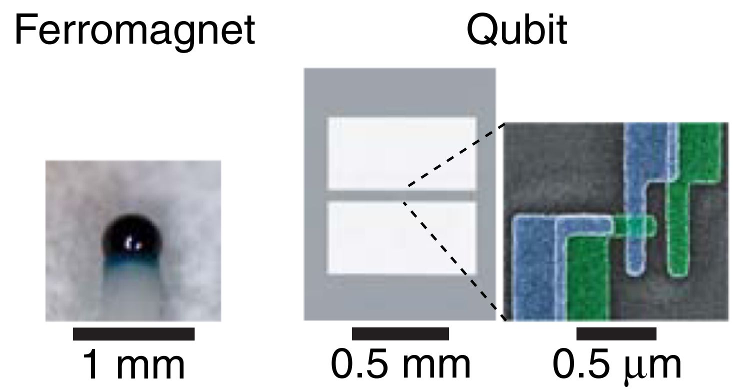
セットアップ

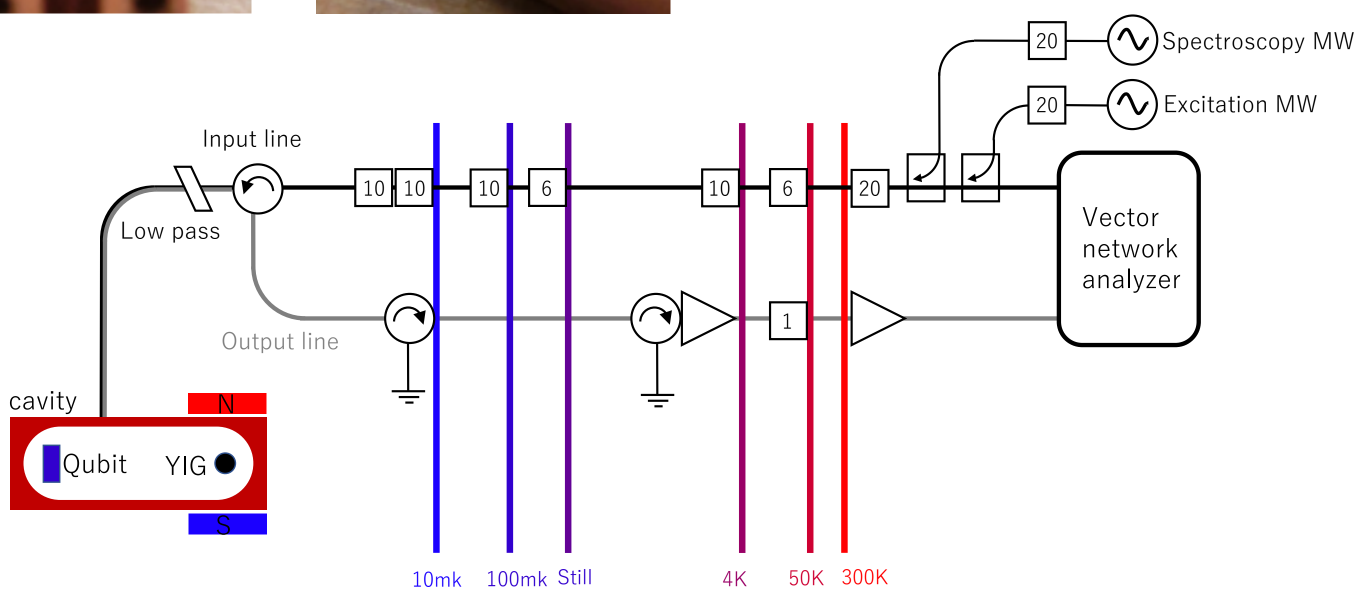
✓ 東大先端研にてセットアップ

D.Lachance-Quirion, et.al., Sci.Adv. 2017;3:e1603150

C. R. Physique 17 (2016) 729–739

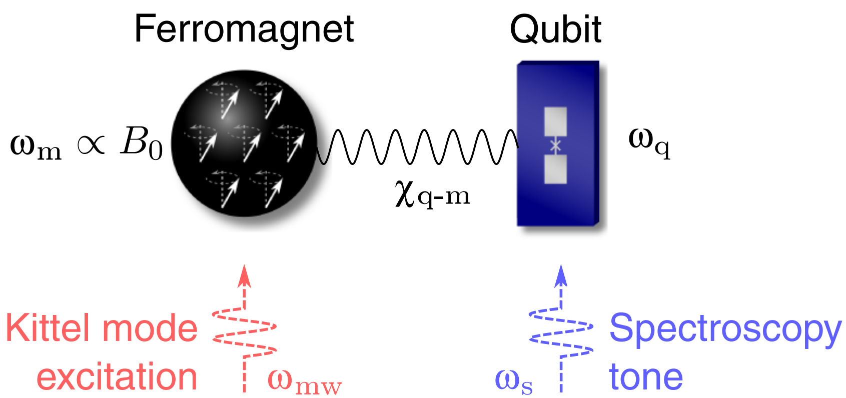


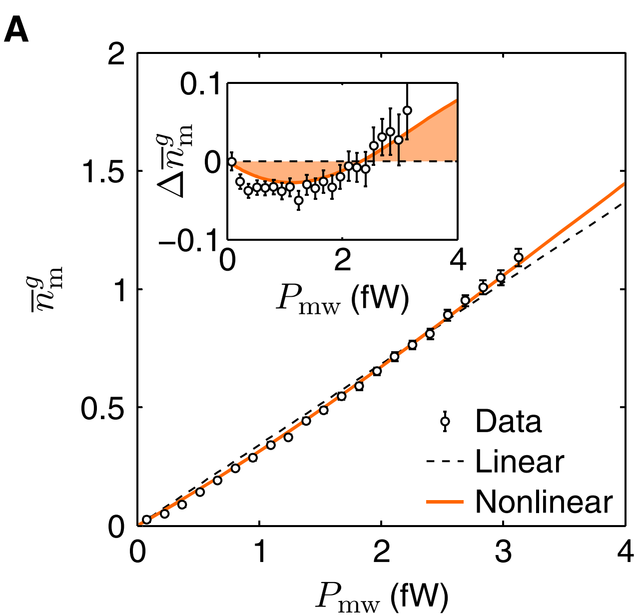


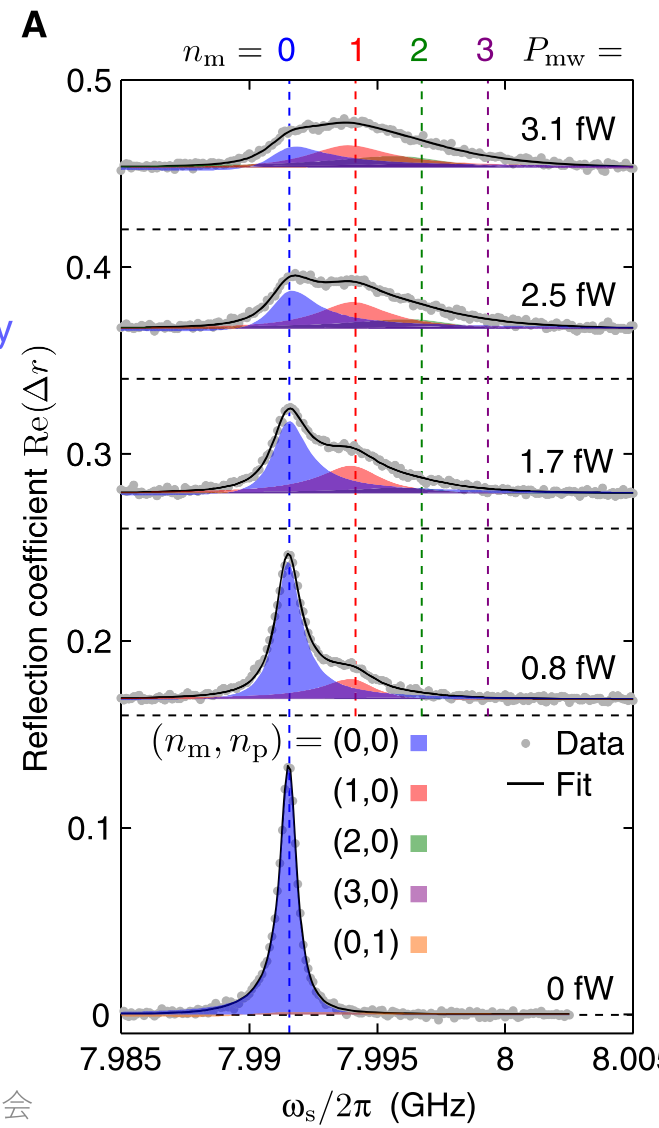


キャリブレーションRUN

D.Lachance-Quirion, et.al., Sci.Adv. 2017;3:e1603150

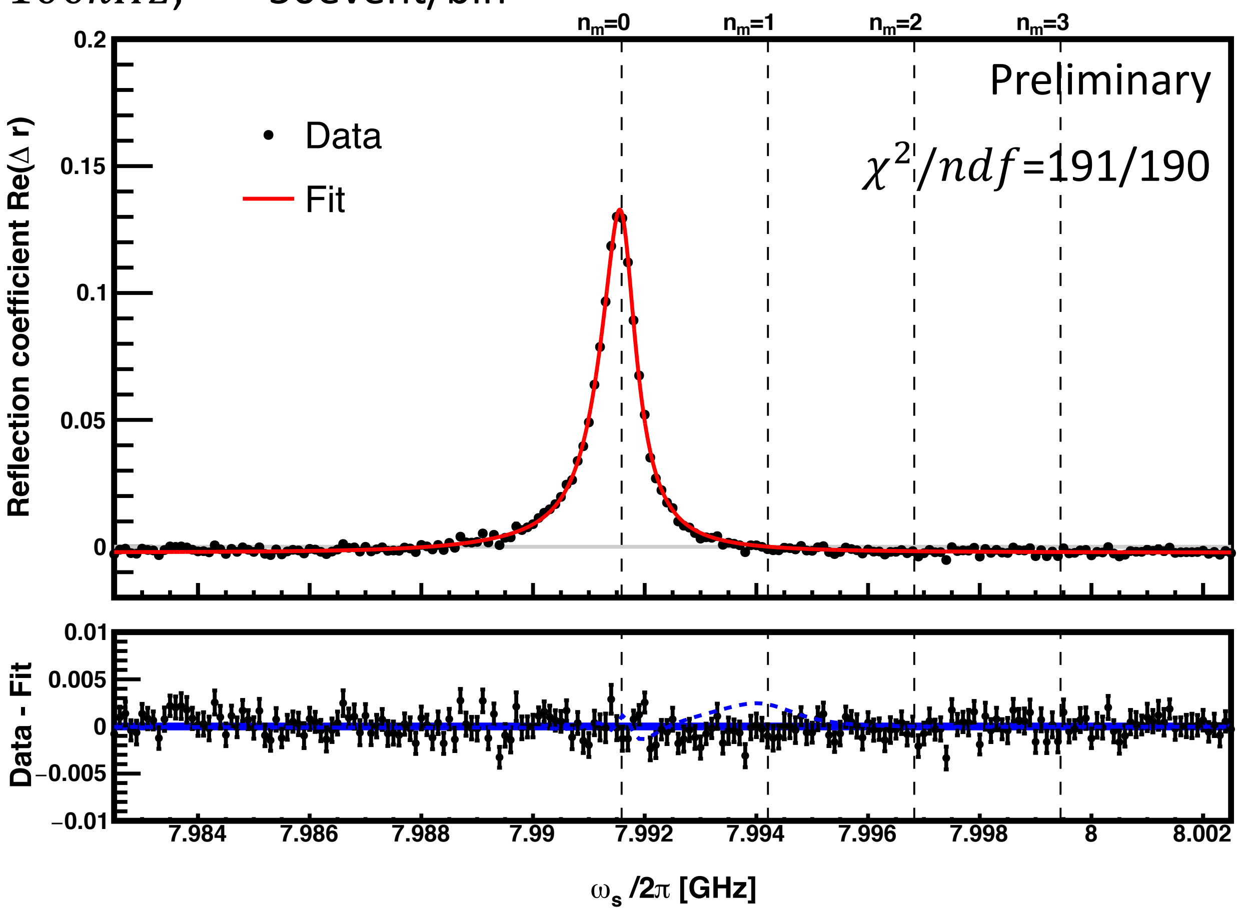






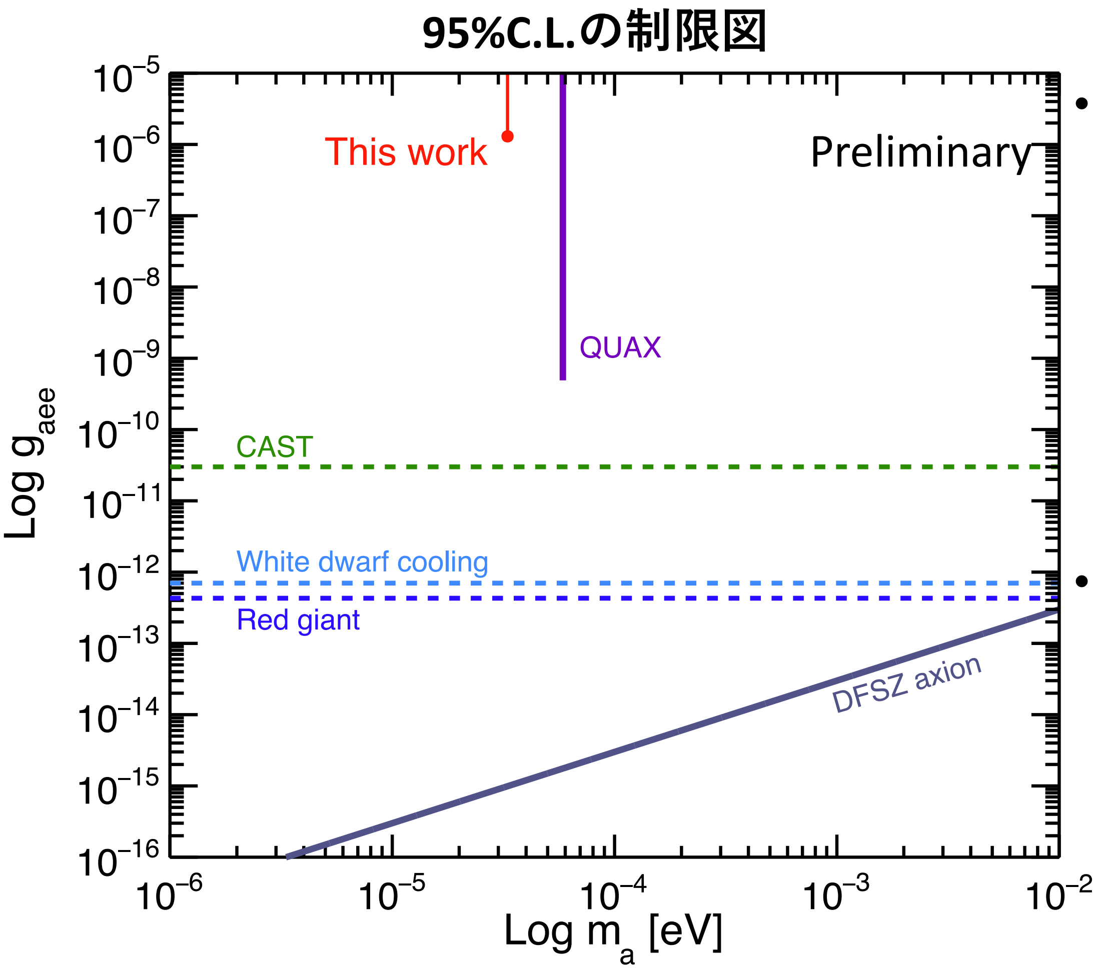
DMRUN

- 2015年8月に取得された4時間分のデータ
  $\Delta f = 100kHz,$ 50event/bin



➢ **統計的に有意な差は見られなかった**

制限図



- アクシオン質量33μeVについて、95%信頼度の上限を与えた

$$B_a < 4.1 \times 10^{-14}\ [\mathrm{T}].$$

$$g_{aee} < 1.3 \times 10^{-6}$$

- 感度を制限している要因
  - ✓ 強磁性体のQ値(約1000)

$$\bar{n}^m_{\pm} = \frac{g^2_{eff}}{\gamma^2_m/4 + (\Delta_a \pm \chi)^2},$$

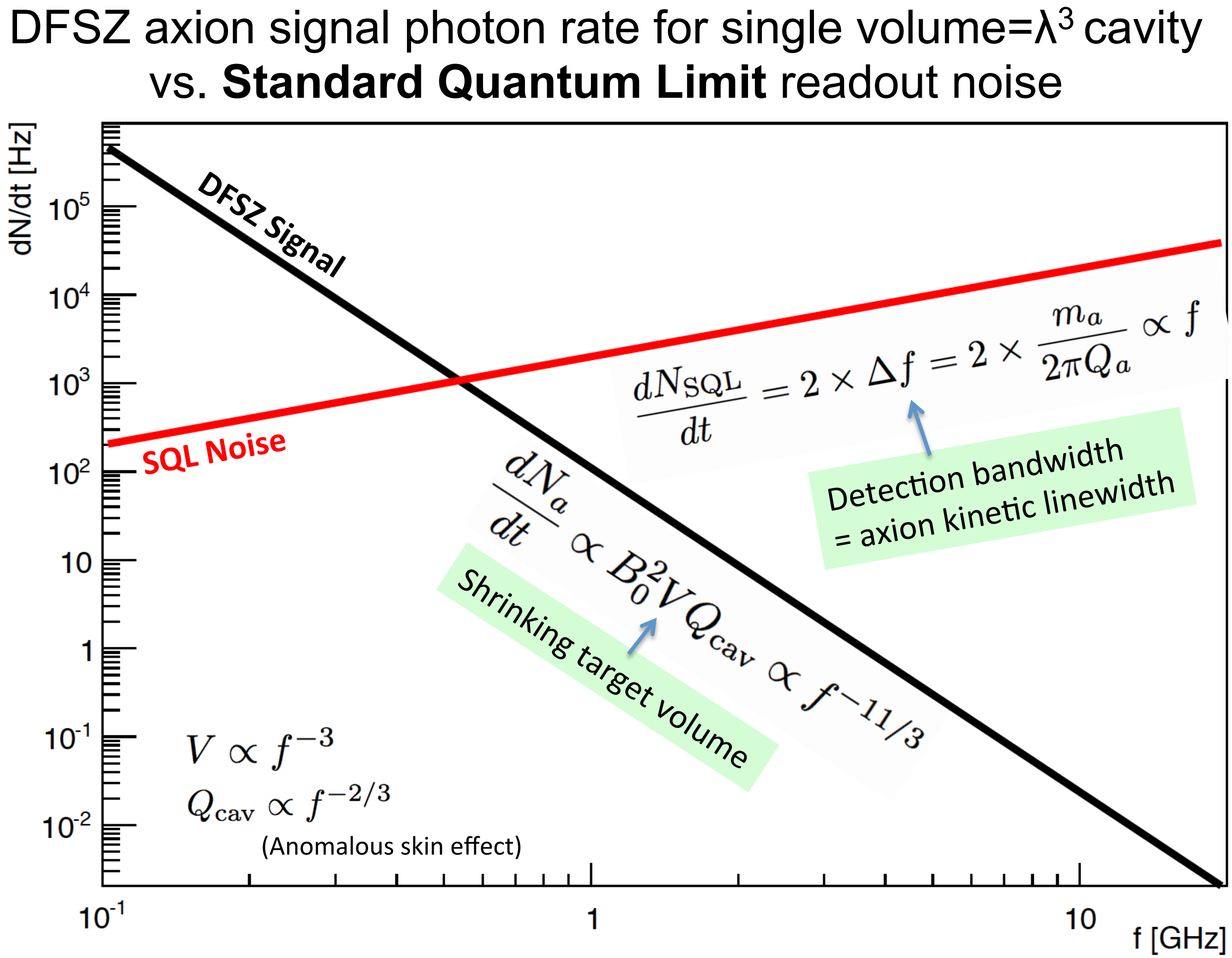
現状CavityのQ値より3桁悪い

まとめ

- マグノン数検出器を用いて暗黒物質アクシオンの探索を行った
- アクシオン質量33μeVについて、$95\% C.L.$ の制限値$g_{aee} <$ 1.3×10^{-6}を与えた
- 現状感度を制限している要因はマグノンのQ値であり、量子限界を超えた感度を達成するには3桁の向上が必要

量子限界

Aaron S. Chou FNAL
Northwestern University HEP Seminar
October 3, 2016
のスライドから



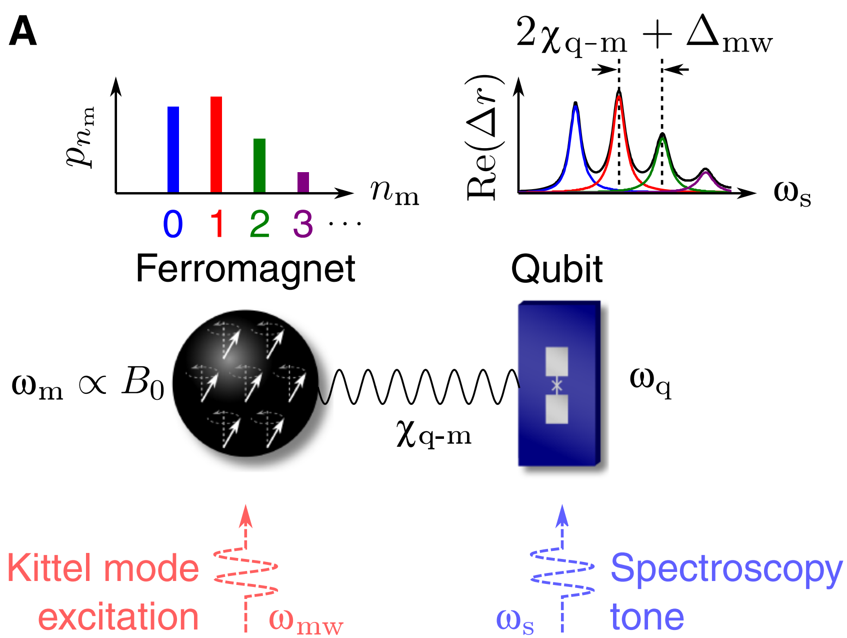
arXiv

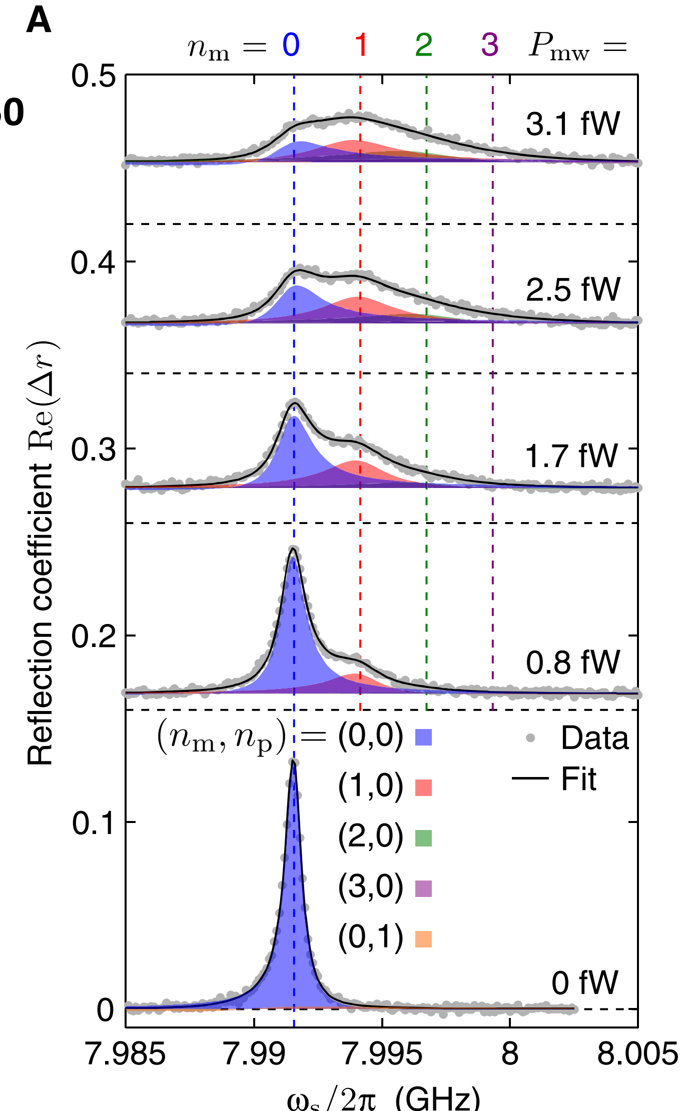
言う

マグノン量子数測定

✓ マグノン数の測定へ

D.Lachance-Quirion, et.al., Sci.Adv. 2017;3:e1603150

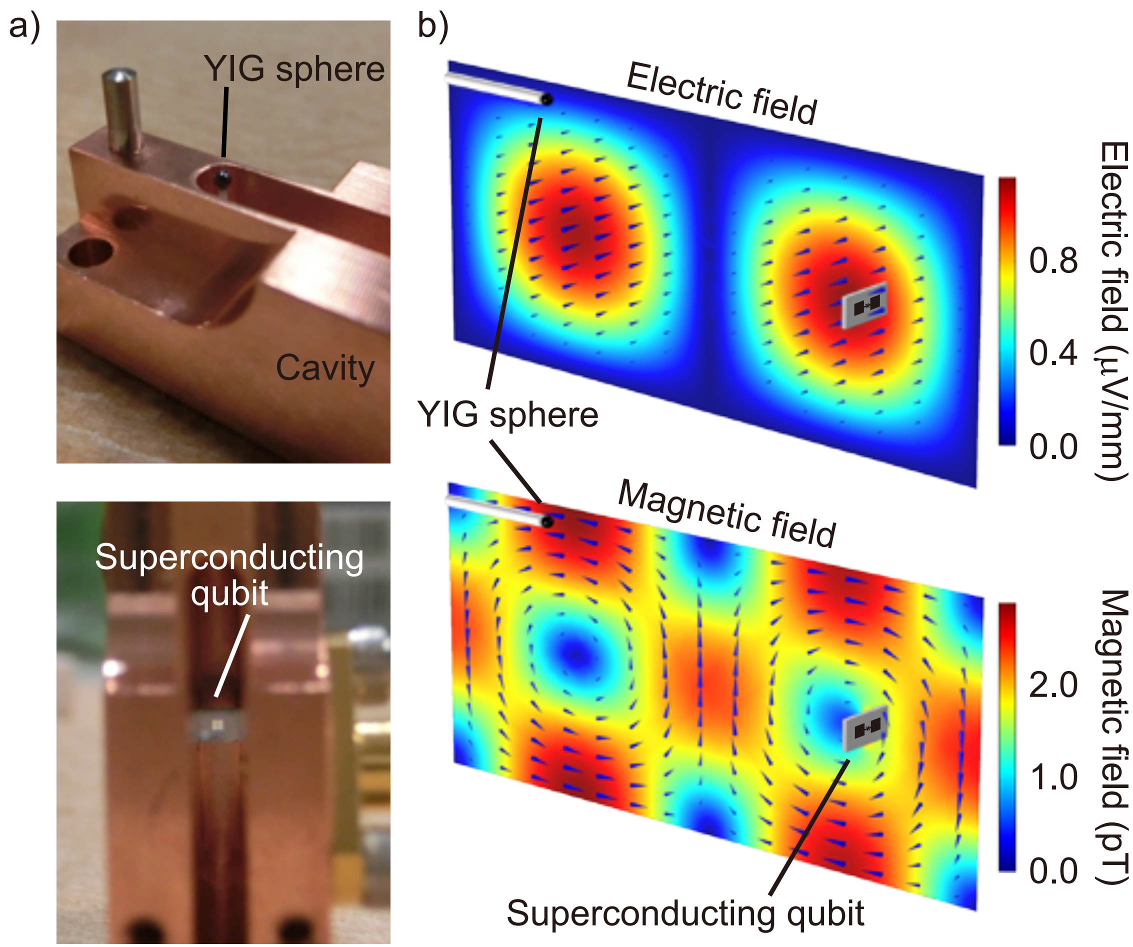




➢ **同様にマグノン数の測定も可能**

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi}\sum_{j=0}^{\infty}\frac{1}{j!}\mathrm{Re}\left[\frac{(-A)^j e^A}{\Gamma_j/2 - i(\omega - \omega_j)}\right]$$

$$\begin{aligned}
\Gamma_j &= \gamma_q + (j + D_s)\kappa, \\
\omega_j &= \tilde{\omega}_a + B + j(\chi + \Delta_a), \\
A &= D_s \frac{\gamma_m/2 - i(\chi + \Delta_a)}{\gamma_m/2 + i(\chi + \Delta_a)}, \\
B &= \chi(\bar{n}_+ + \bar{n}_- - D_s), \\
D_s &= \frac{2(\bar{n}_+ + \bar{n}_-)\chi^2}{\gamma_m^2/4 + \chi^2 + \Delta_a^2}, \\
\bar{n}_\pm^m &= \frac{g_{eff}^2}{\gamma_m^2/4 + (\Delta_a \pm \chi)^2},
\end{aligned}$$


a)
YIG sphere
Cavity
Superconducting qubit
b)
Electric field
YIG sphere
0.8
0.4
0.0
Electric field (μV/mm)
Magnetic field
2.0
1.0
0.0
Magnetic field (pT)
Superconducting qubit

展望