

Mini colloquium

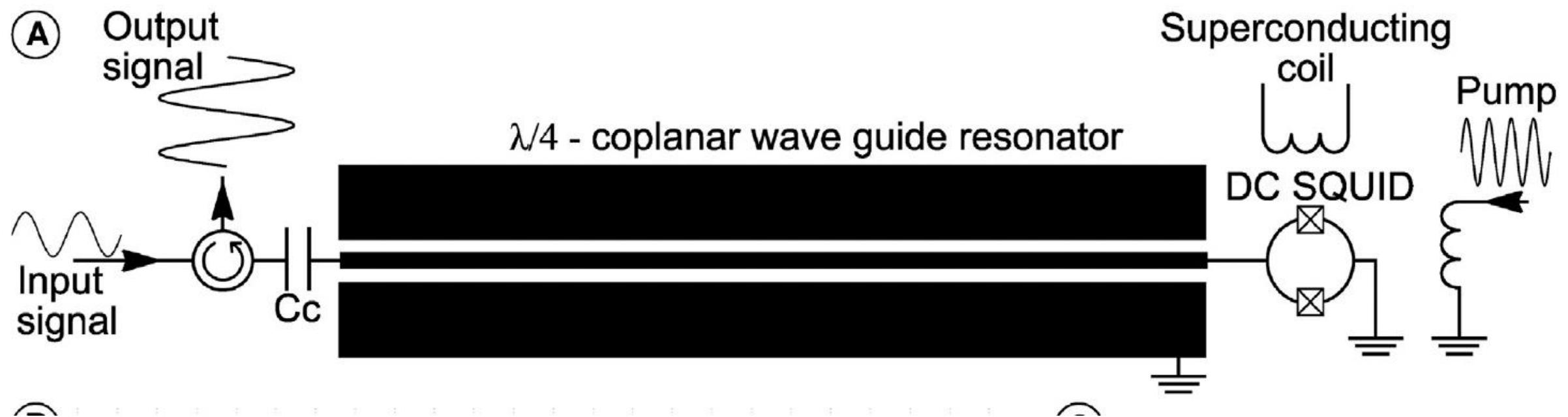
Nakamura Kosuke

Josephson parametric amplifier based quantum noise limited
amplifier development for axion search experiments in CAPP

なぜアンプをJJで？

- HEMTではダメなの？
 - ノイズ温度が $O(1)$ K
 - 集積化の時に邪魔になる
- JPA(Josephson Parametric Amplifier)
 - Flux-driven
 - ノイズ温度を抑えることができる
 - (デメリット：磁場に弱い)

セットアップ



パラメトリック增幅器の原理

全体のインダクタンスが

$$L(t) = L_0 + L_1 \sin(\omega_p t - \phi)$$

であるような回路にsignal e

$$e = E \sin(\omega_s t)$$

が入ってきているとき流れる電流iは

$$e = \frac{d}{dt} L i$$

でかける。



パラメトリック增幅器の原理

整理して

$$E \sin(\omega_s t) = \frac{d}{dt} [(L_0 + L_1 \sin(\omega_p t - \phi)) i_0]$$

$L_0 \gg L_1$ の極限において、逐次近似により

電流の0次

$$E \sin(\omega_s t) = L_0 \frac{di_0}{dt}$$

$$i_0 = \frac{E}{L_0 \omega_s} \sin\left(\omega_s t - \frac{\pi}{2}\right)$$

電流は電圧に対して
90°遅れる

パラメトリック增幅器の原理

電流の1次(高周波は無視)

$$0 = L_0 \frac{di_1}{dt} + L_1 \sin(\omega_p t - \phi) \frac{di_0}{dt} + i_0 \omega_p L_1 \cos(\omega_p t - \phi)$$

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{EL_1}{2L_0^2} [\sin(\omega_p t - \omega_s t - \phi) + \frac{\omega_p}{\omega_s} \cos(\omega_p t - \omega_s t - \phi)]$$

パラメトリック增幅器の原理

しばしば $\omega_p = 2\omega_s$ とすることが多く今回もそれに倣うと

$$\frac{di_1}{dt} = -\frac{\sqrt{5}EL_1}{2L_0^2} \sin(\omega_s t - \phi + \delta), \tan \delta = \frac{1}{2}$$

$$i_1 = \frac{\sqrt{5}EL_1}{2\omega_s L_0^2} \sin\left(\omega_s t - \phi + \delta - \frac{\pi}{2}\right)$$

パラメトリック增幅器の原理

まとめると、流れる電流*i*は

$$i = \frac{E}{L_0\omega_s} \sin(\omega_s t - \frac{\pi}{2}) + \frac{\sqrt{5}EL_1}{2\omega_s L_0^2} \sin(\omega_s t - \phi + \delta - \frac{\pi}{2})$$

うまく位相をとると($-\phi + \delta = \pi$)、第二項は負となって、インダクタンスが負の抵抗として働くことで増幅が実現される

ノイズ温度 T_n

- 全ての雑音を熱ノイズとした時の温度

$$P[W] = k_B T_s \Delta f$$

- HEMTのノイズ温度はO(1)K

Nyquist theorem

- 温度Tの時のノイズ温度 T_s は

$$T_s = \frac{hf}{k_B} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{e^{hf/k_B T} - 1} \right)$$

- $T \rightarrow 0$ でSQLに近づく

SQL(Standard Quantum Limit)

- 不確定性原理から、完全にノイズを0にすることはできない
→ノイズをSQLにどれだけ近づけられるかが
Ampの性能指標の一つ

$$T_{min} = \frac{hf}{2k_B}$$

- 今回の測定：2.3GHz → $T_{min}=110\text{mK}$

測定方法 1 : Y-factor

- HOTとCOLDの2点で系のノイズ温度を測定

$$Y = \frac{P^{HOT}}{P^{COLD}} = \frac{T_{sys}^{HOT}}{T_{sys}^{COLD}}$$

T_s : 温度で決まるノイズ温度
T_n : Ampによるノイズ温度

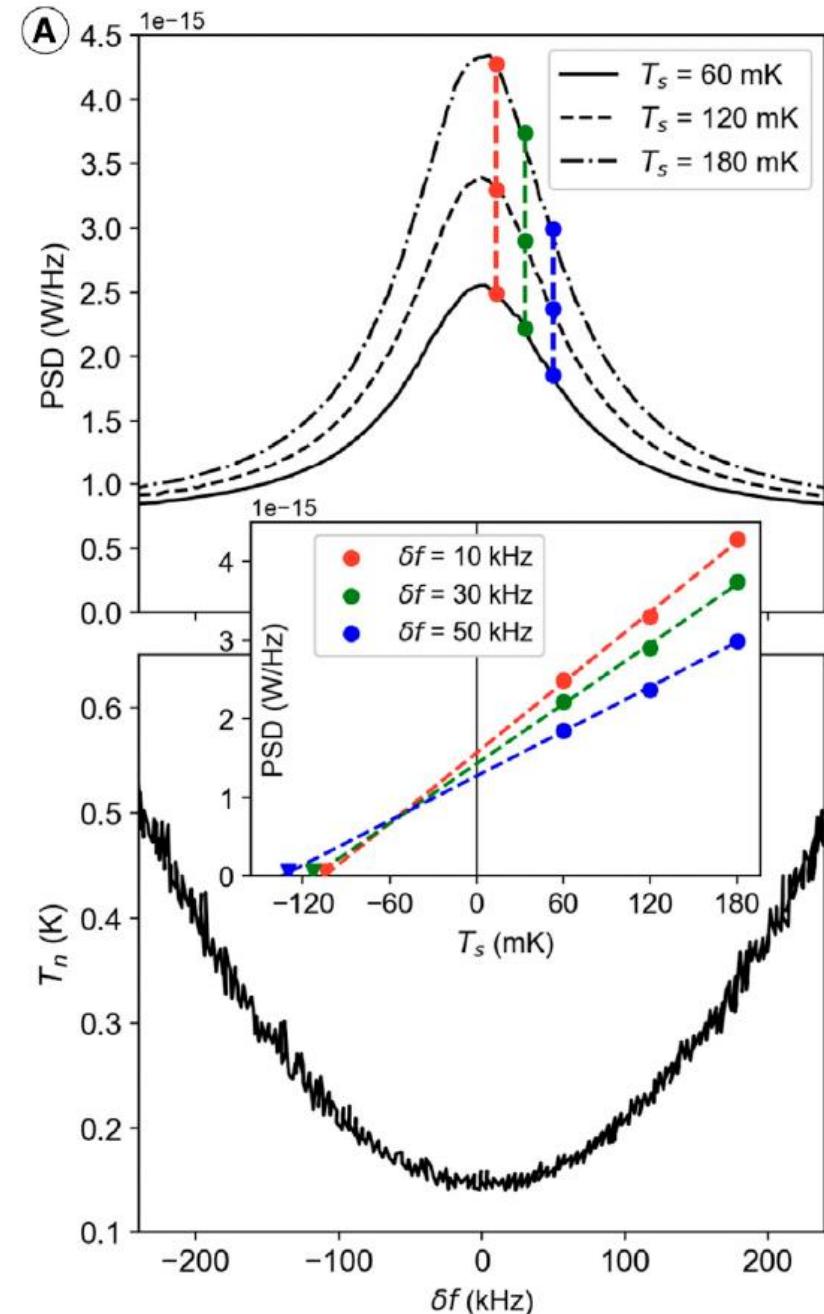
$$T_{sys}^{HOT} = T_s^{HOT} + T_n, \quad T_{sys}^{COLD} = T_s^{COLD} + T_n$$

- 連立して

$$T_n = \frac{T_s^{HOT} - T_s^{COLD}Y}{Y - 1}$$

Y-factor

- pump freq f を変えてPSDを測定
- T_s (ノイズ温度)を変えてPSDを測定
- pump freq f を変えてPSDから
 T_n を算出



測定方法2：Spectrum comparison

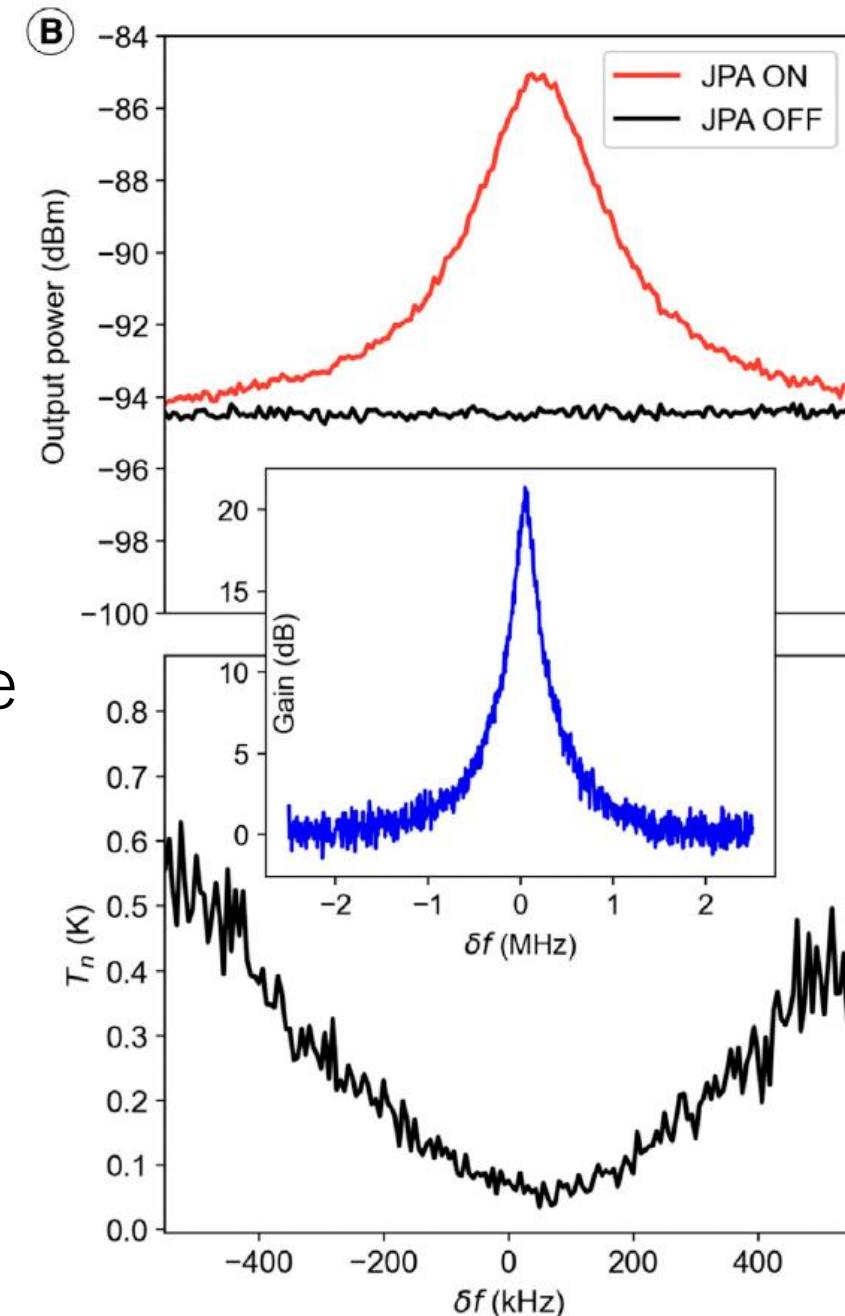
- Signalありなしで比較する

$$T_n = \frac{P_{sys}^{ON}}{P_{sys}^{OFF}} \frac{T_{sys}^{OFF}}{G_J} - T_s$$

$$G_J = 10 \log_{10} \left| \frac{S_{21}^{ON}}{S_{21}^{OFF}} \right|^2$$

Spectrum comparison

- pump freq f を変えてoutput powerを測定(Amp onとoff)
- Spump freq f を変えてoutput powerを測定
- Signal freq f を変えてPowerから T_n を算出



結果

- どちらの測定でも $T_n \sim 1.7\text{SQL}$ を達成(2.3GHz)
- 40dBmまでアンプできた(5.9GHz)
- 後段にHEMTを差し込むことを考えると、15-20dBmのアンプをする設計が一番良い。