

重力波天文学

石崎貢平, 尾形優仁
萩原大佑, 大野敦
財前真理

Supervisor: 川村 静児
TA: 伊藤 洋介、榎本 雄太郎

概要(アウトライン)

1. イントロダクション
2. 観測原理
3. 実験方法
4. 結果
5. 考察
6. まとめ

概要(アウトライン)

1. イントロダクション

2. 観測原理

3. 実験方法

4. 結果

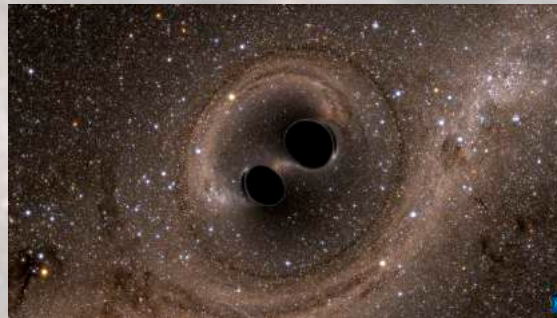
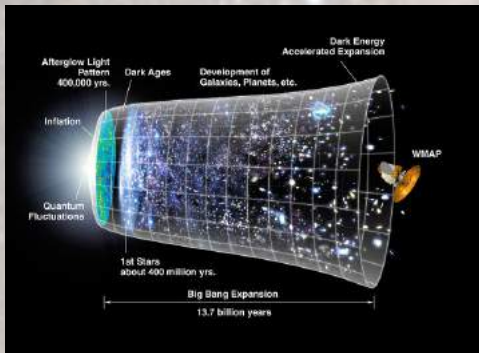
5. 考察

6. まとめ

1. イントロダクション

なぜ重力波天文学をするのか？

電磁波は高密度では散乱 しかし 重力波は透過



天文学の新しい目！

重力波とは？

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

時空の歪み

時空の物質

Einstein方程式の線形解 = 重力波！！



重力波は空間を潮汐的に歪める

例：連星中性子星による重力波放射

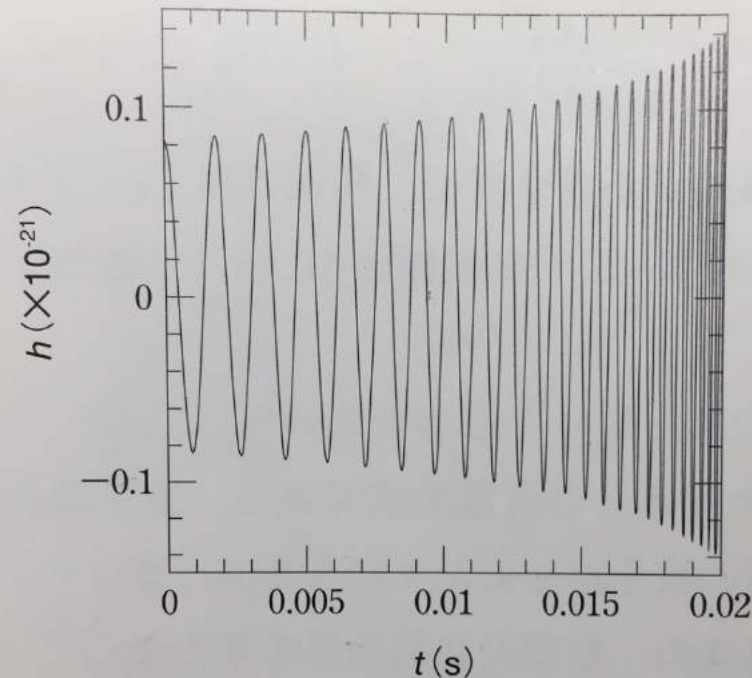


図 4.2 合体直前の連星中性子星からの重力波の予想波形．地球から 14 Mpc にあると仮定し，2 つの星はともに $1.4 M_{\odot}$ とした．横軸は時間，縦軸は振幅を表す．

柴田大『一般相対論の世界を探る』p.79

目標：この連星中性子星を探索する

概要(アウトライン)

1. イントロダクション

2. 観測原理

3. 実験方法

4. 結果

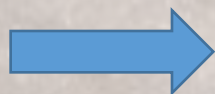
5. 考察

6. まとめ

2.観測原理



重力波による空間の歪みによって2つのビームの位相差が変化



干渉光強度の変化を検出

概要(アウトライン)

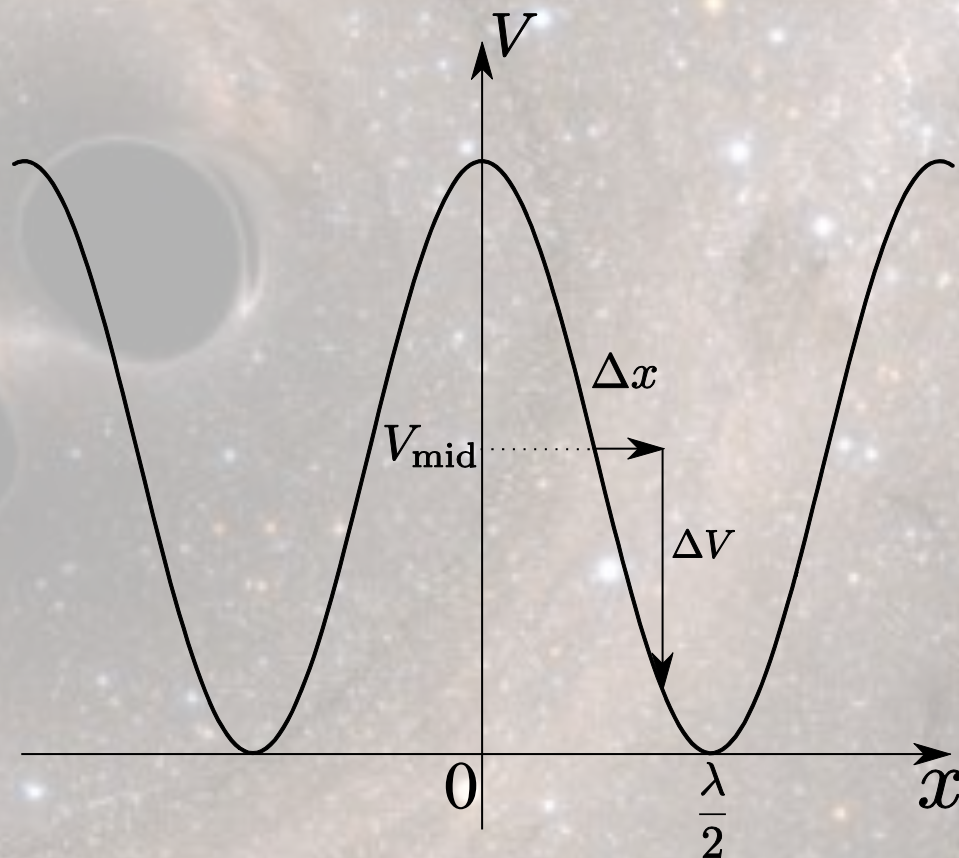
1. イントロダクション
2. 観測原理
3. 実験方法
4. 結果
5. 考察
6. まとめ

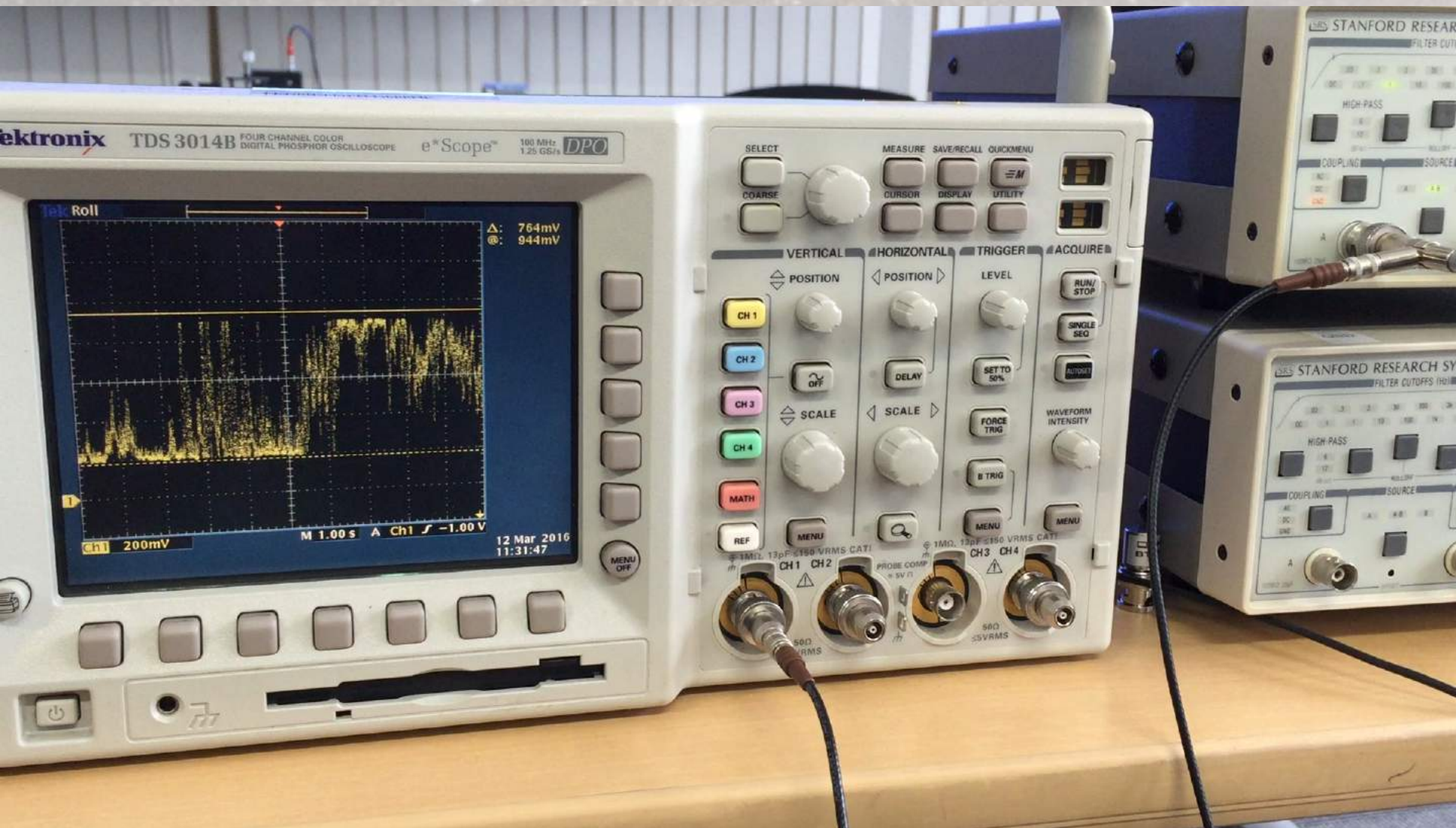
フリンジをロックする

目的

フリンジによって
効率(dV/dx)が異なるた
め、フリンジをロックする
必要がある。

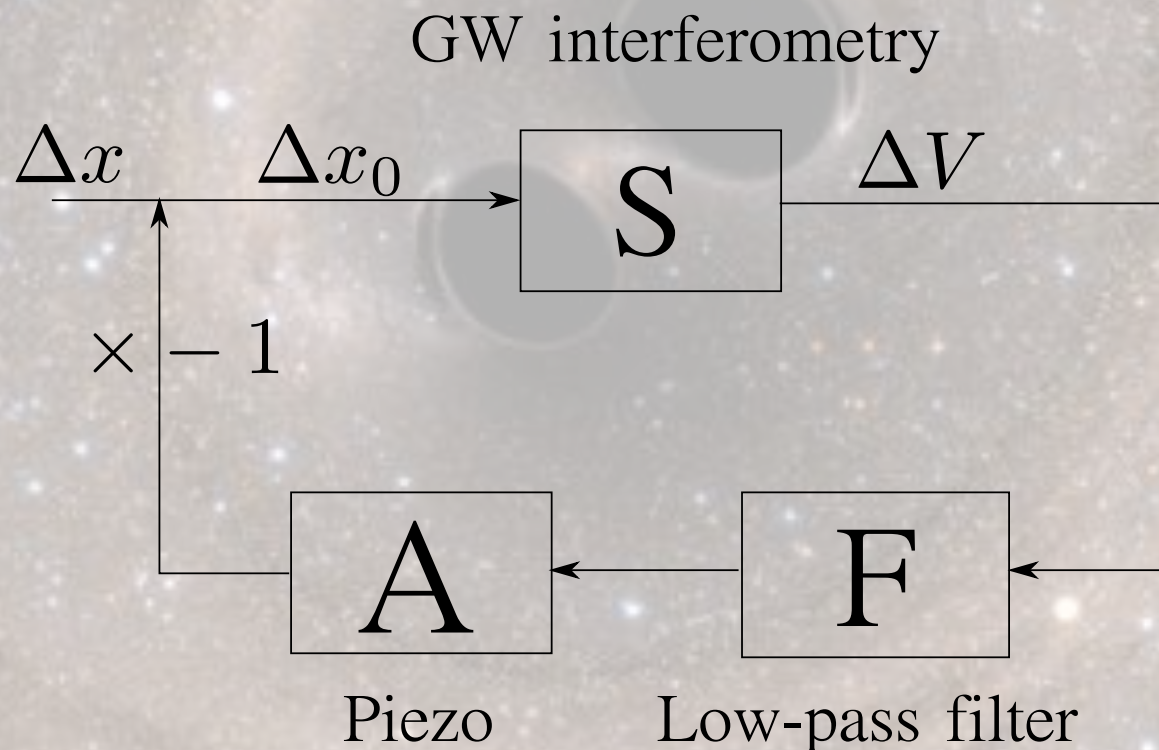
また、光路差の変化に
対して効率が最大となる
 V_{mid} でロックする。





方法

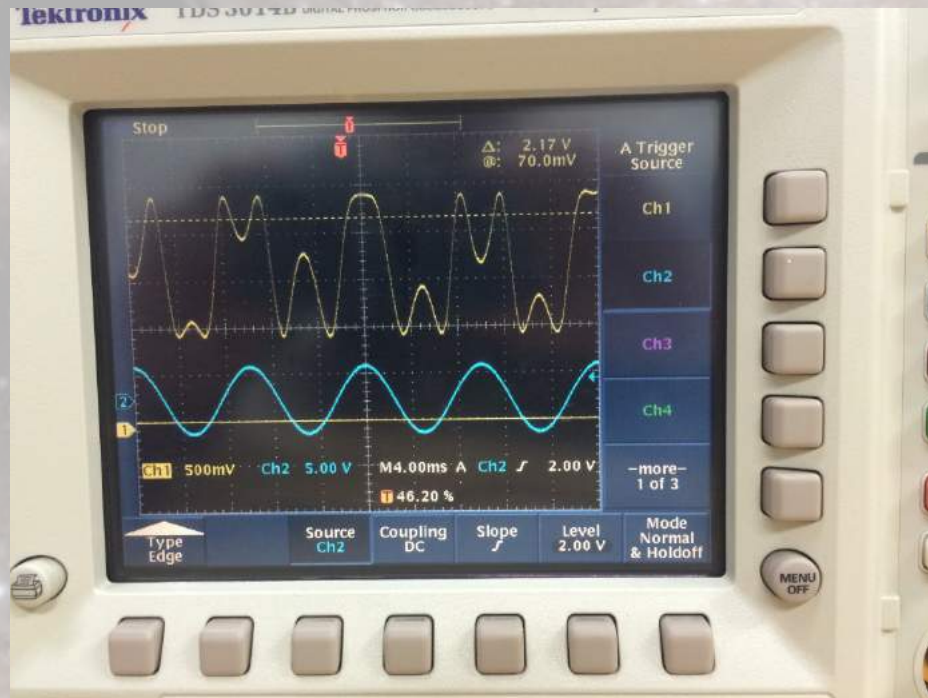
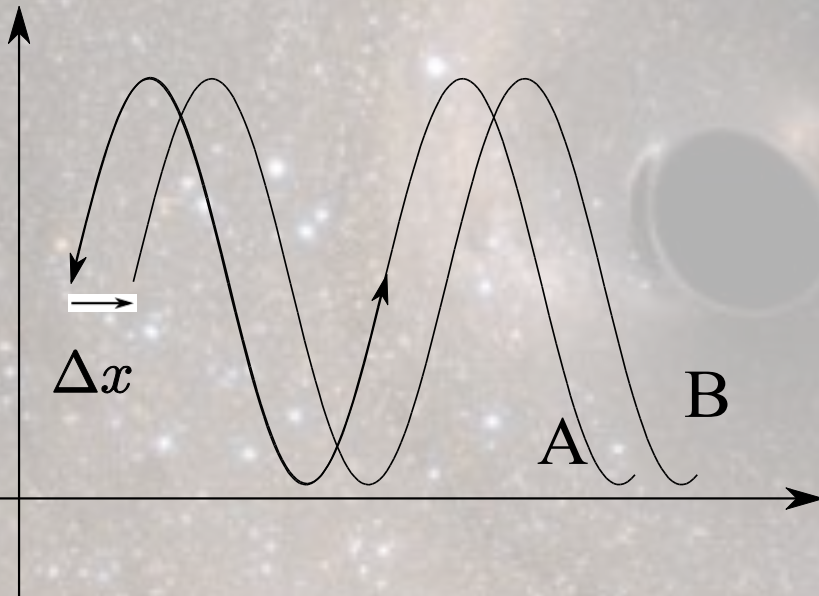
光路差を検出した信号を、図のような回路を通して
ピエゾに返すことで光路差をキャンセルする。



ピエゾ効率を求める

方法

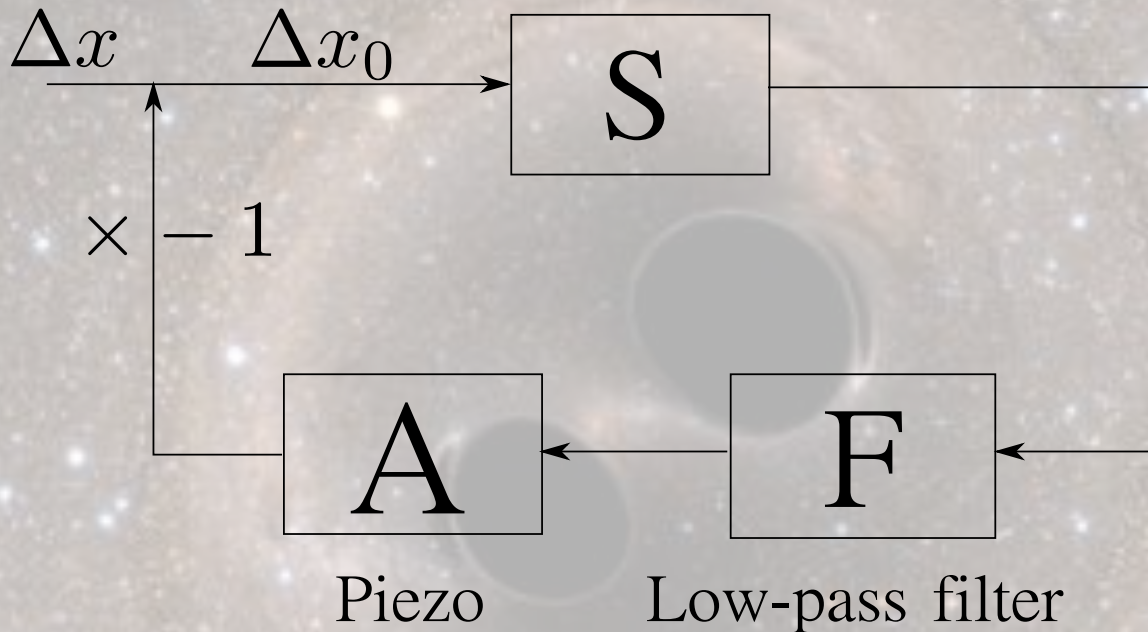
ピエゾの伸縮がレーザー光の半波長となる電圧の信号をピエゾに送る。



$$A \simeq 9.8 \times 10^{-8} [\text{m/V}]$$

3. Feedback回路の特性

GW interferometry



- $\Delta x + (-SAF)\Delta x_0 = \Delta x_0$

➡
$$\Delta x_0 = \frac{\Delta x}{1 + SAF}$$

SAF: ループゲイン伝達関数

S, A, F: 各素子の伝達関数

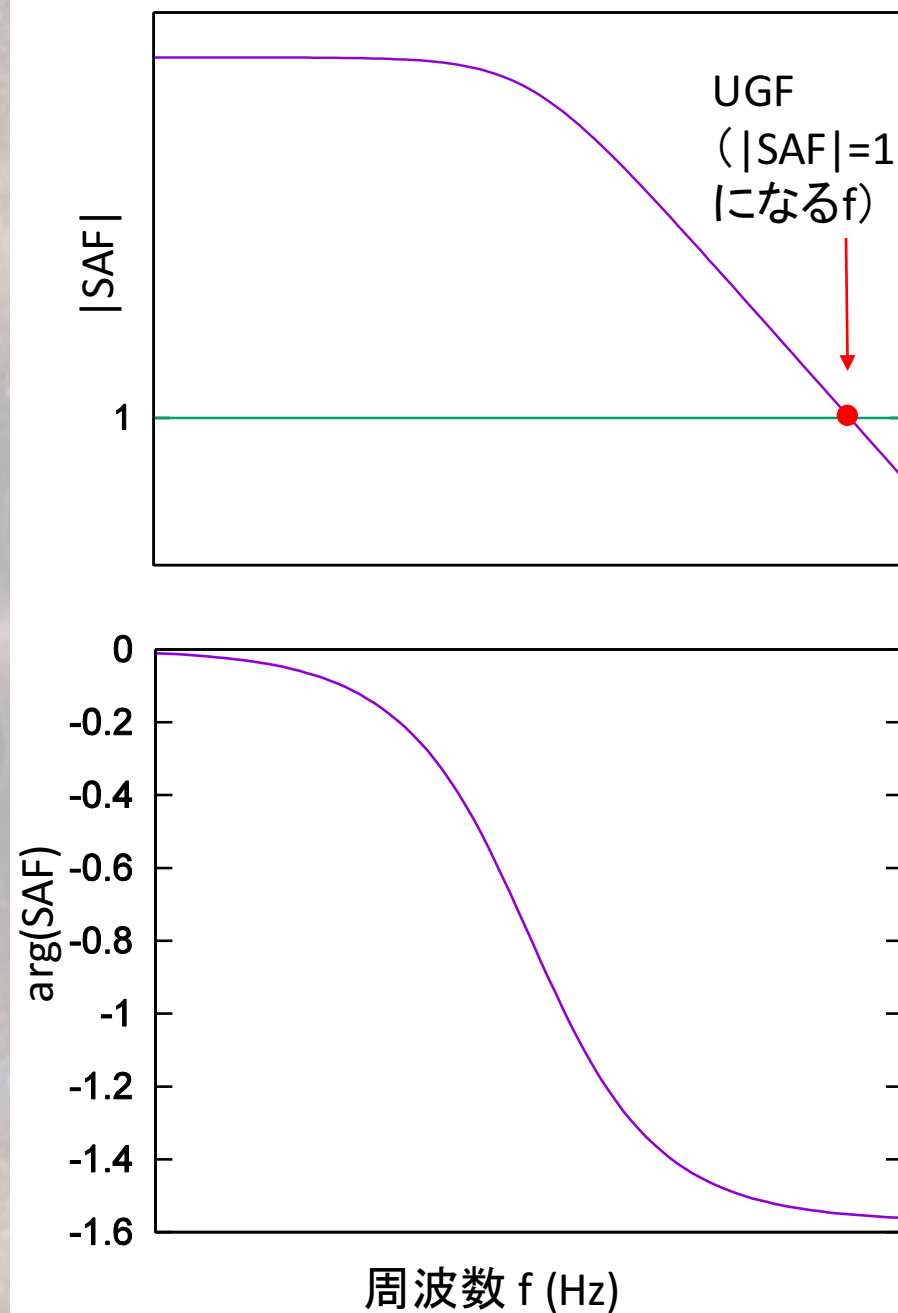
- Δx_0 を小さくするにはSAFを大きくすればよい?

3. SAFの周波数特性

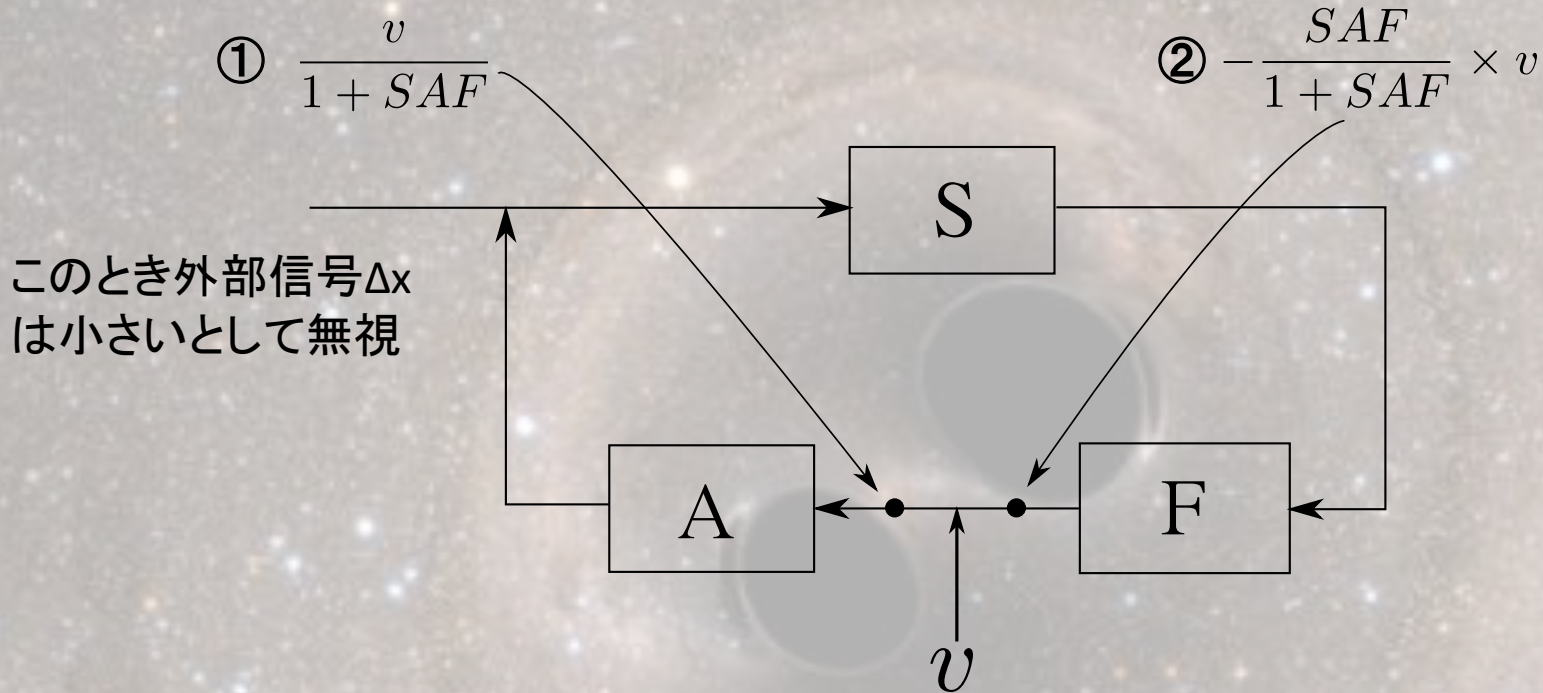
- 高周波成分ほど位相が遅れる
- 位相が π ずれる付近で大きさが1より
大 $\rightarrow$ 不安定
小 $\rightarrow$ 安定

$$\Delta x_0 = \frac{\Delta x}{1 + SAF}$$

- ローパスフィルターの
時定数とゲインを調整
する



3. SAFの周波数特性の測定

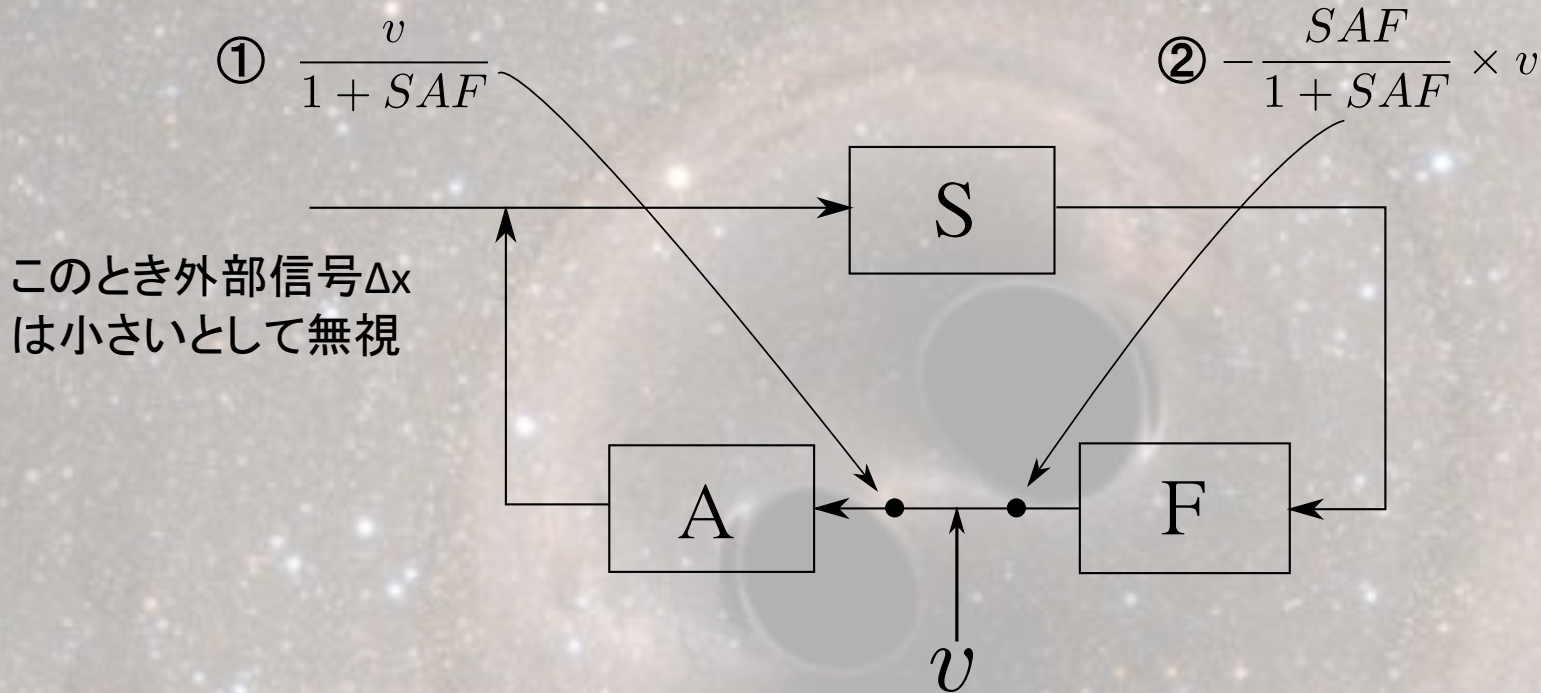


- ・AとFの間に信号を加え前後の電圧の比からSAFが求まる

$$\text{②} / \text{①} = -SAF$$

- ・信号 v の周波数を変えて測定

3. SAFの周波数特性の測定

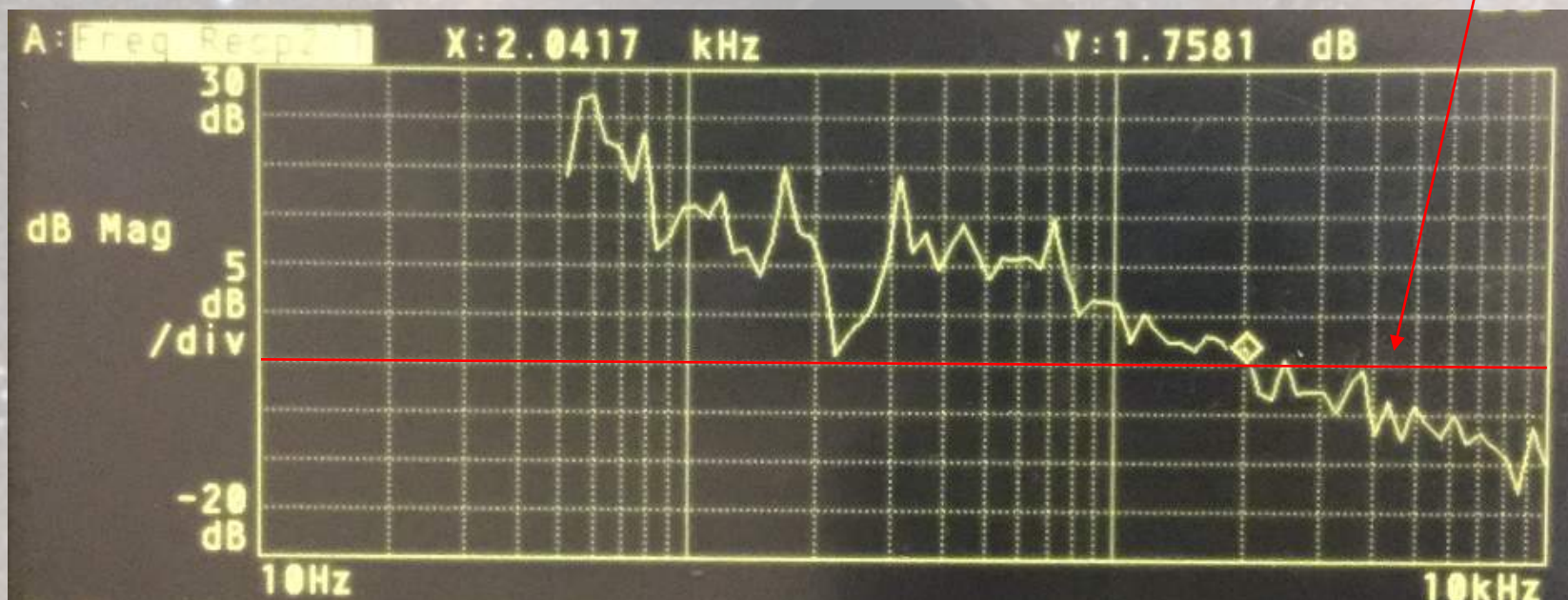


- ・AとFの間に信号を加え前後の電圧の比から SAFが求まる
- $$\text{②} / \text{①} = -SAF$$
- ・信号 v の周波数を変えて測定 $\rightarrow$ UGF=2.2 kHz

3. SAFの測定結果

- ・SAFの測定から求めたUGFの値は
～2.2 kHz

|SAF|=1のライン



スペクトルアナライザーで測定したSAF

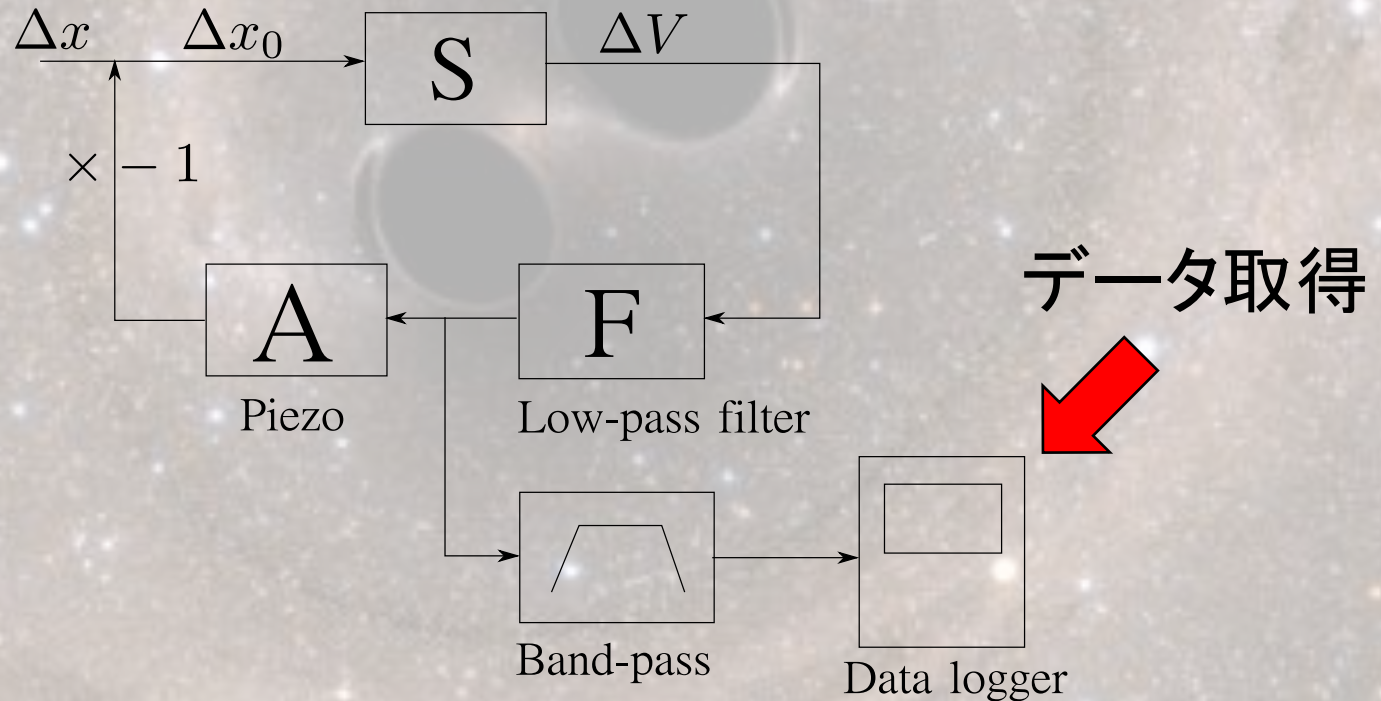
概要(アウトライン)

1. イントロダクション
2. 観測原理
3. 実験方法
4. 結果
5. 考察
6. まとめ

観測条件

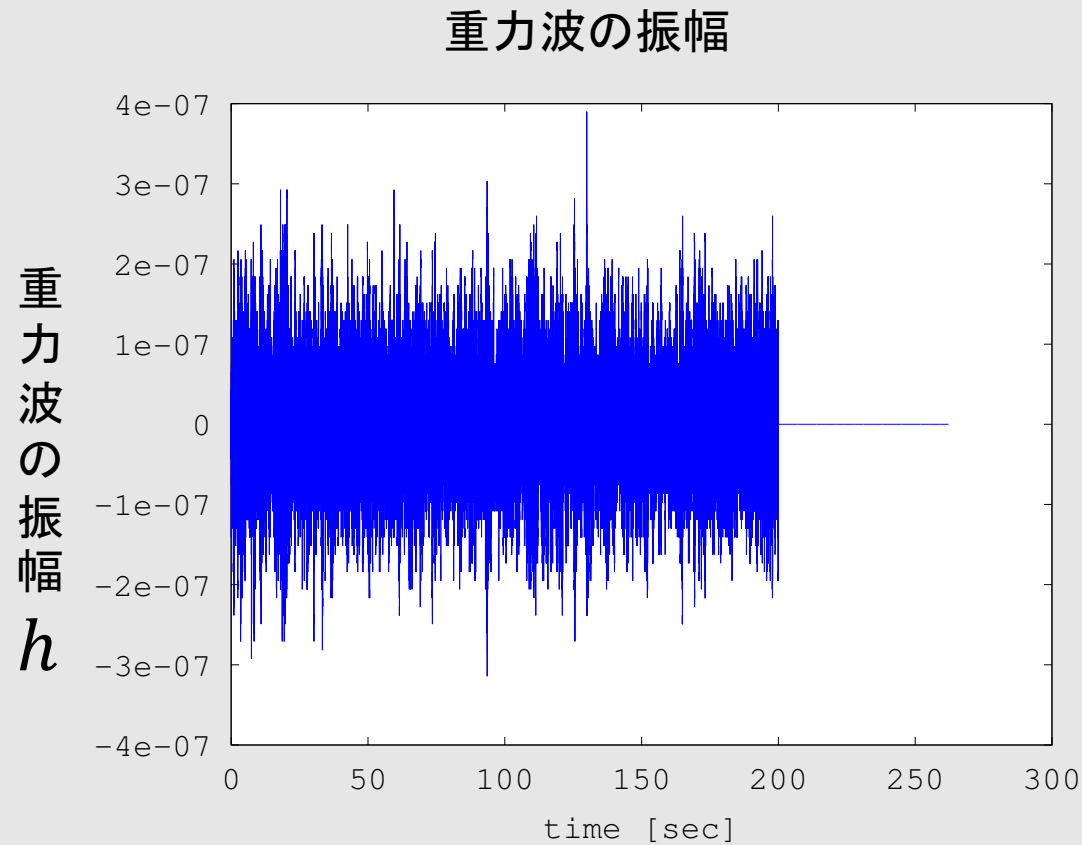
2016年3月10日(木) 18:03から200秒間

GW interferometry



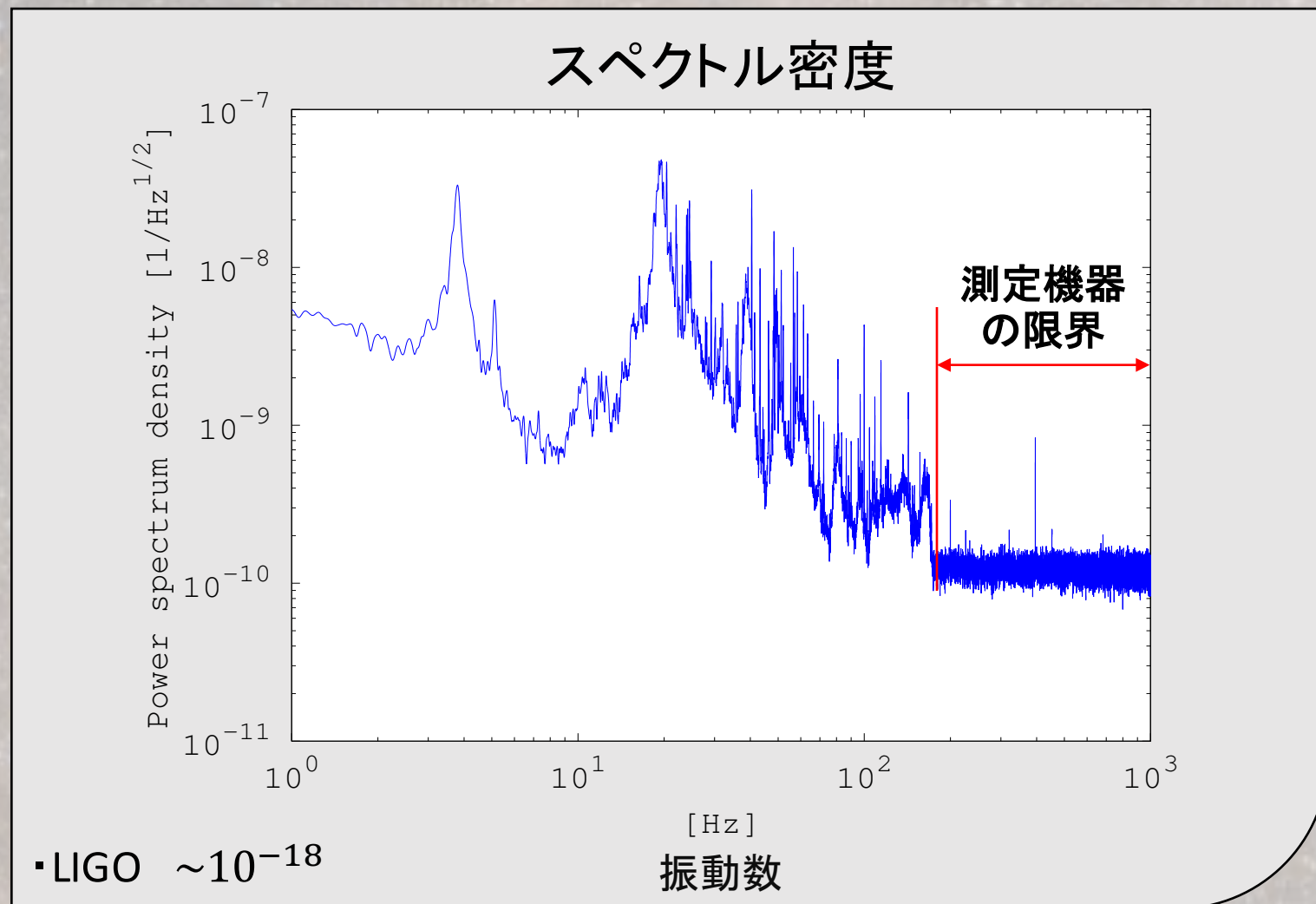
※中性子連星は100~1000Hzが必要

4.結果



$$h = (\text{得られた電圧}) \times (\text{ピエゾ効率}) \div (\text{腕の長さ})$$

4.結果



4.結果

Matched Filter Method

得られたデータの信号 x をシグナル s とノイズ n として

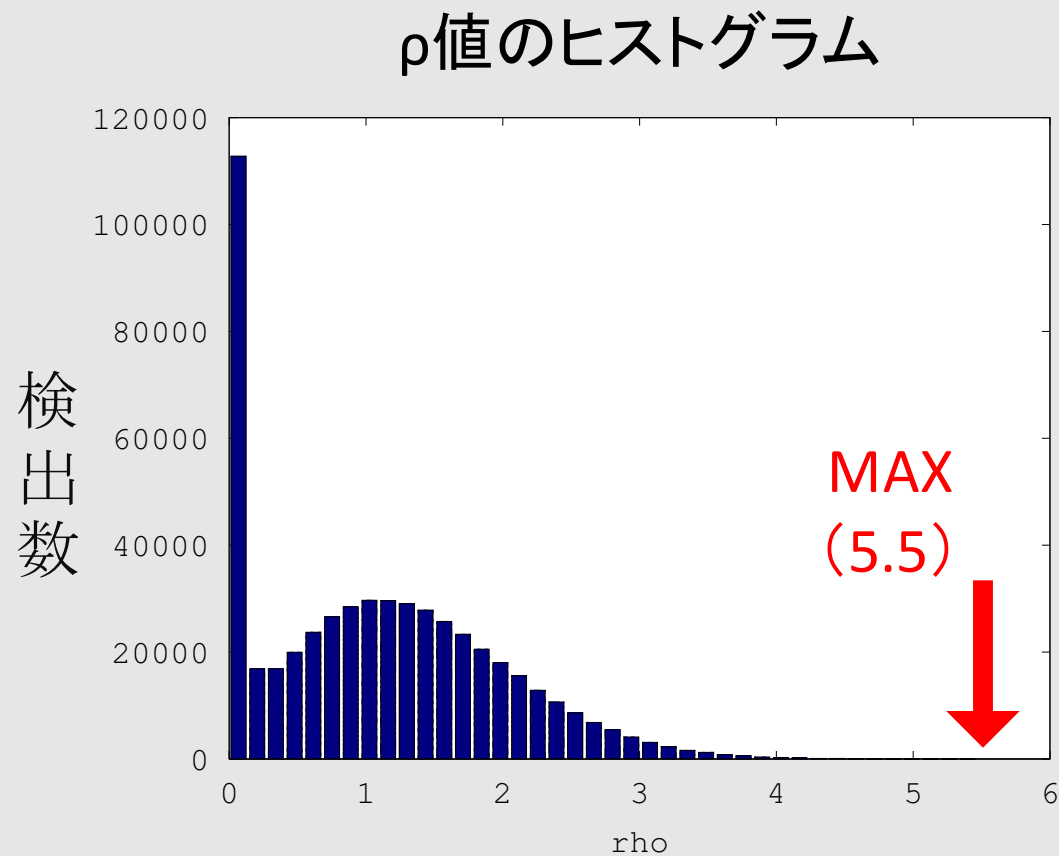
$$x(t) = s(t) + n(t)$$

とするとSNR(Signal to Noise Ratio) は

$$SNR = \rho = 2 \int_{-\infty}^{\infty} df \frac{x(f) \hat{s}^*(f, t_0 = 0) e^{2\pi i f t_0}}{S_n(|f|)}$$

で求まる。

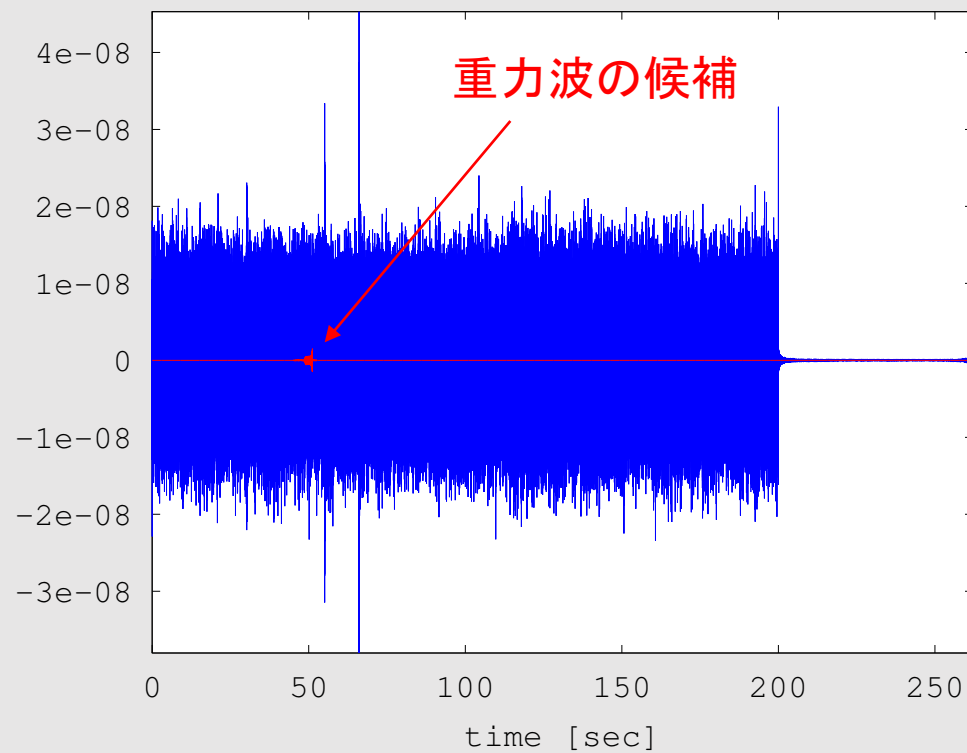
4.結果



・ $\rho \geq 8$ で重力波観測の可能性

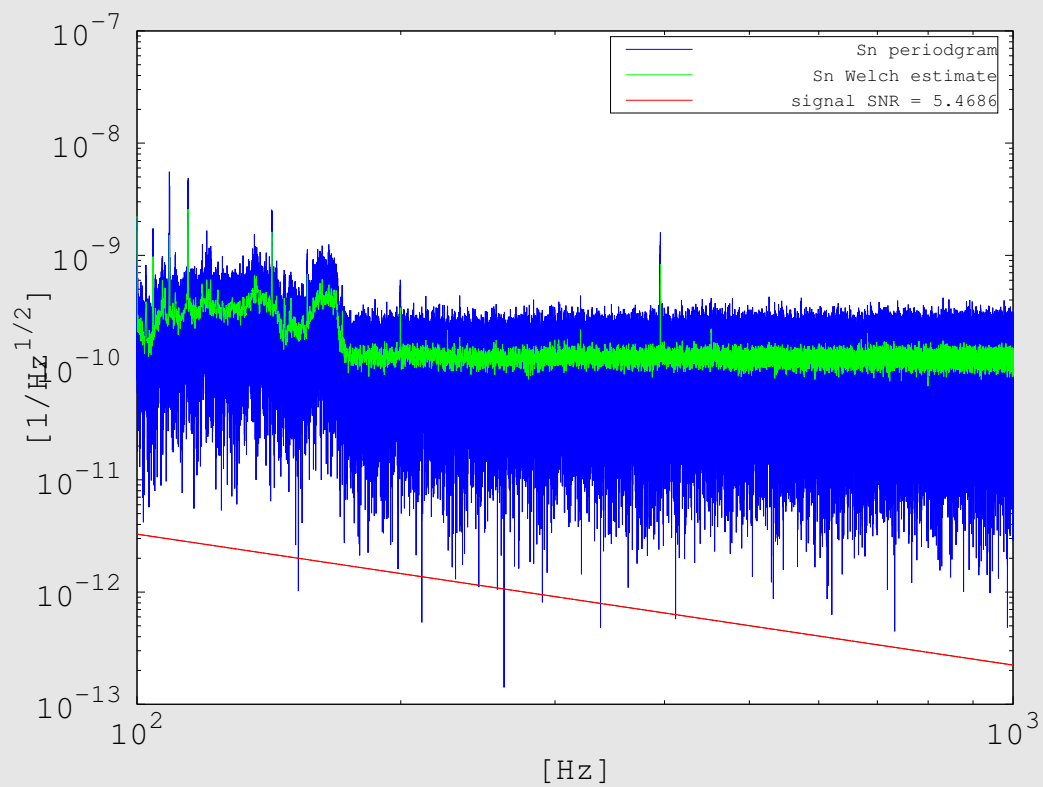
4.結果

重力波の検出可能性



4.結果

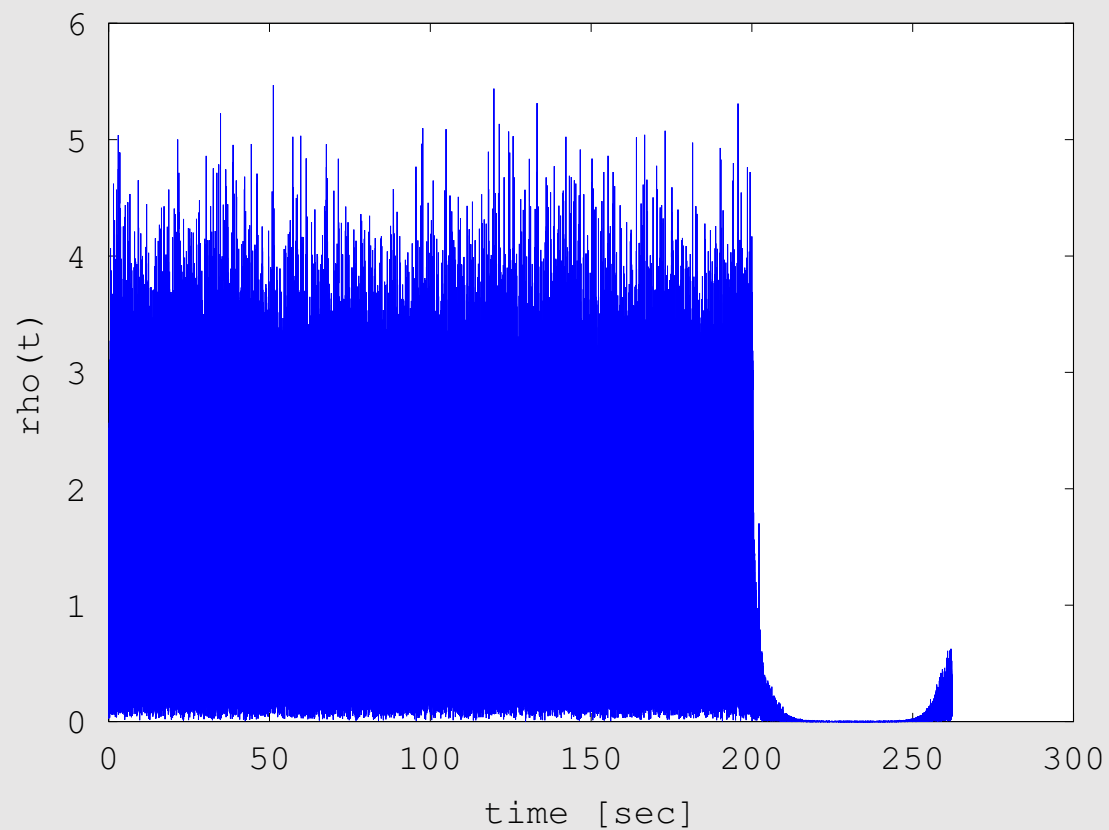
SNRと重力波



振動数

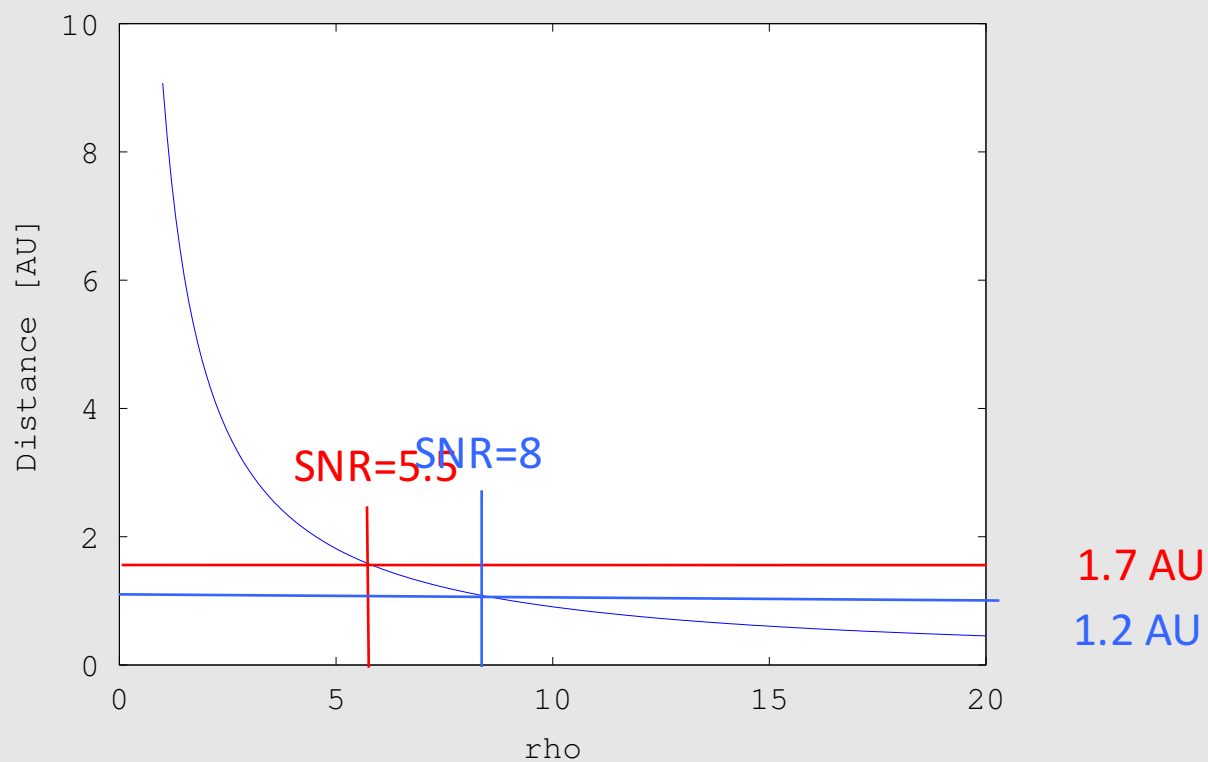
4.結果

ρ 値の時間変化



4.結果

最大SN比と重力波観測可能距離

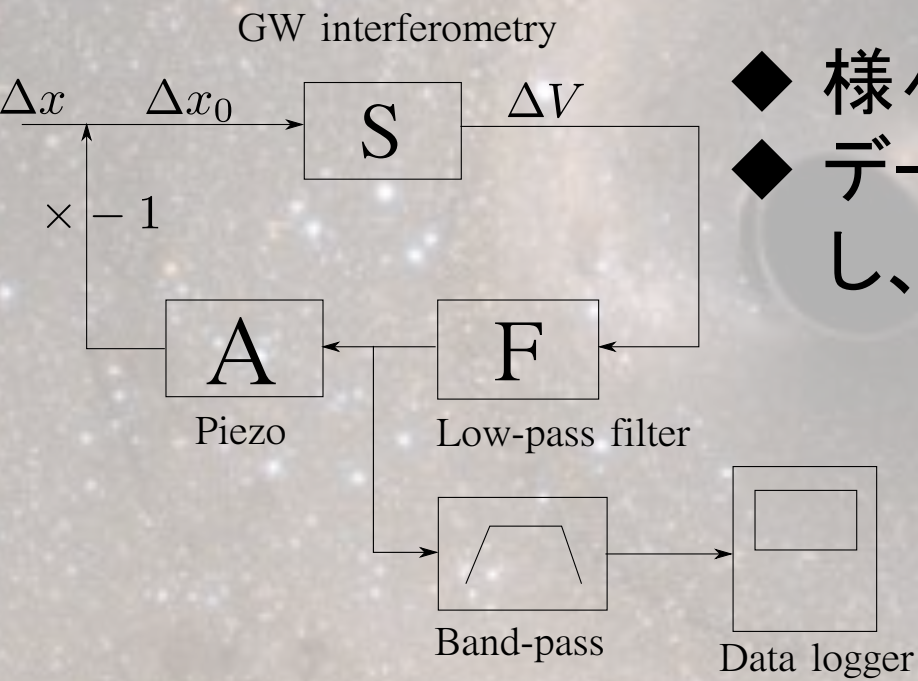


概要(アウトライン)

1. イントロダクション
2. 観測原理
3. 実験方法
4. 結果
5. 考察
6. まとめ

5.考察

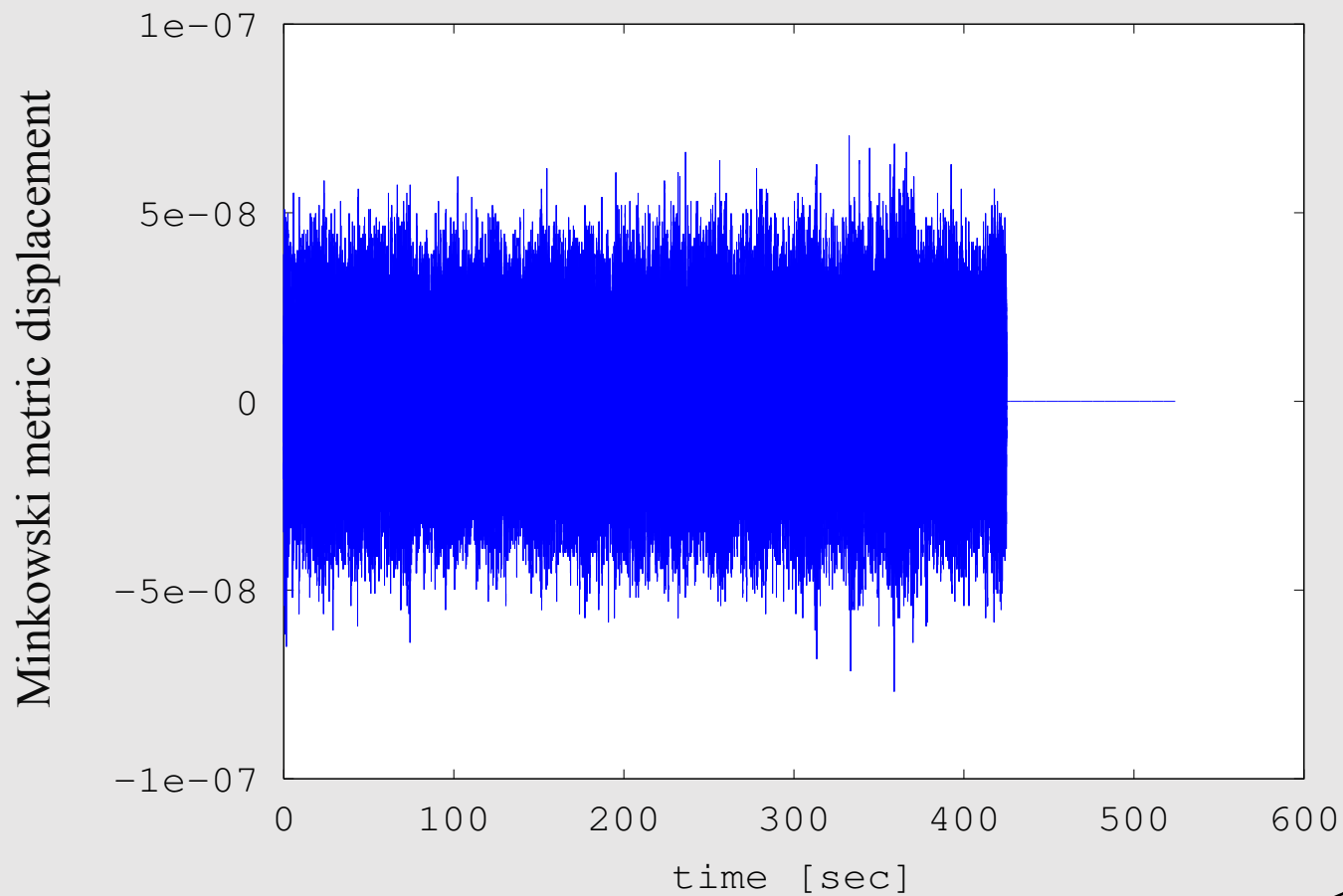
先程までで得られたデータからもっと改善できないか？



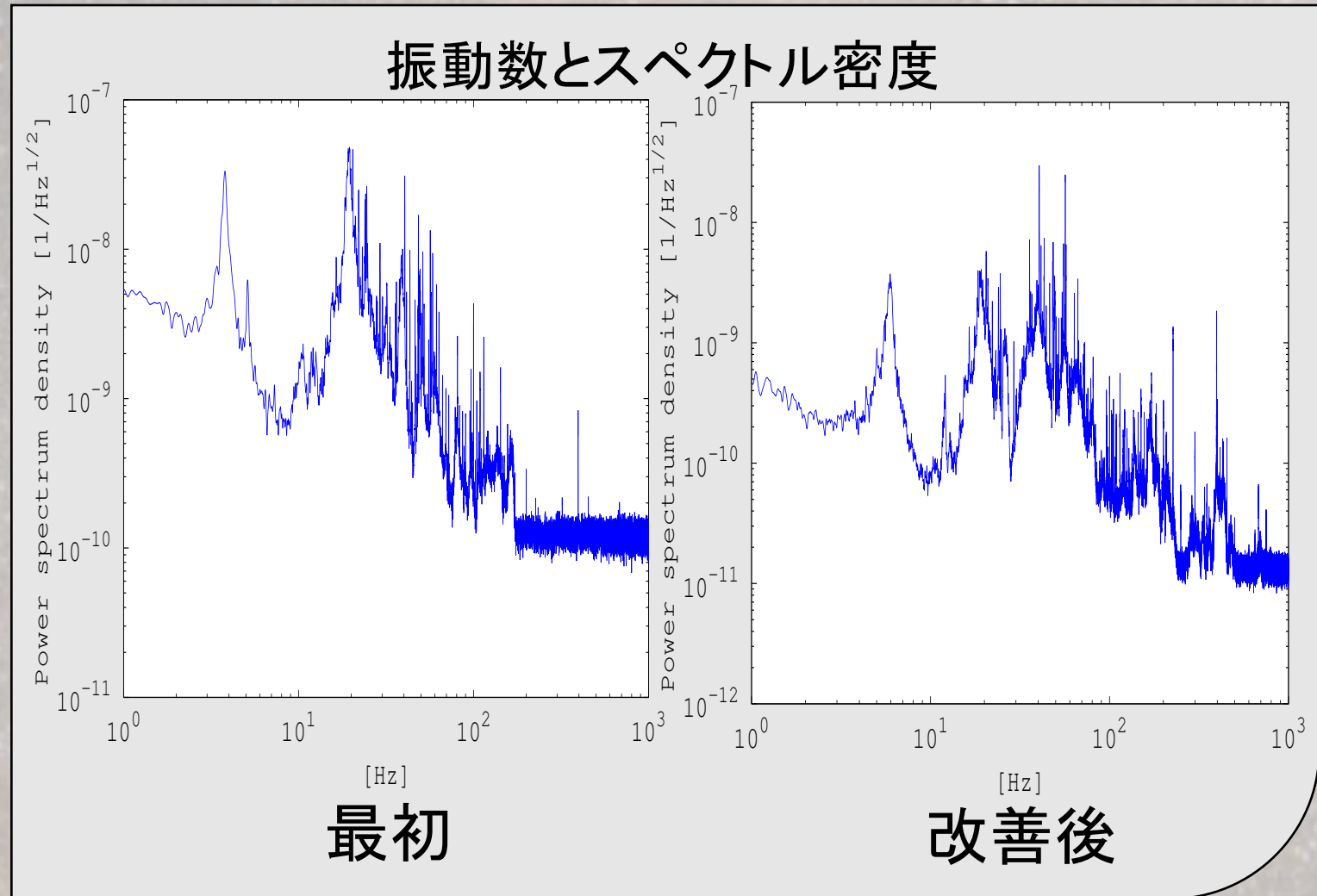
3/12(金) 23:10 から約400秒観測を実行

5. 考察

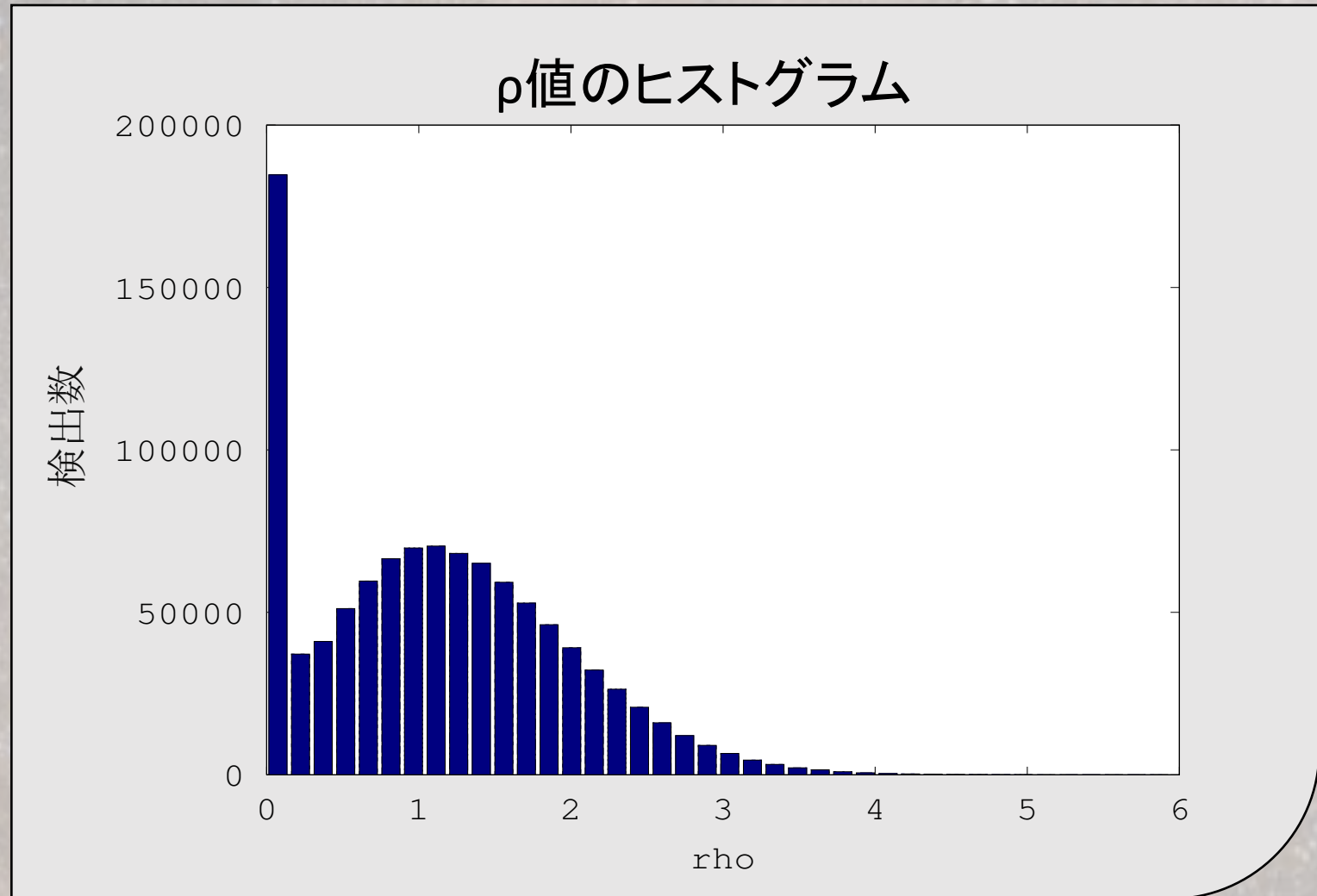
ミンコフスキー計量からのずれ



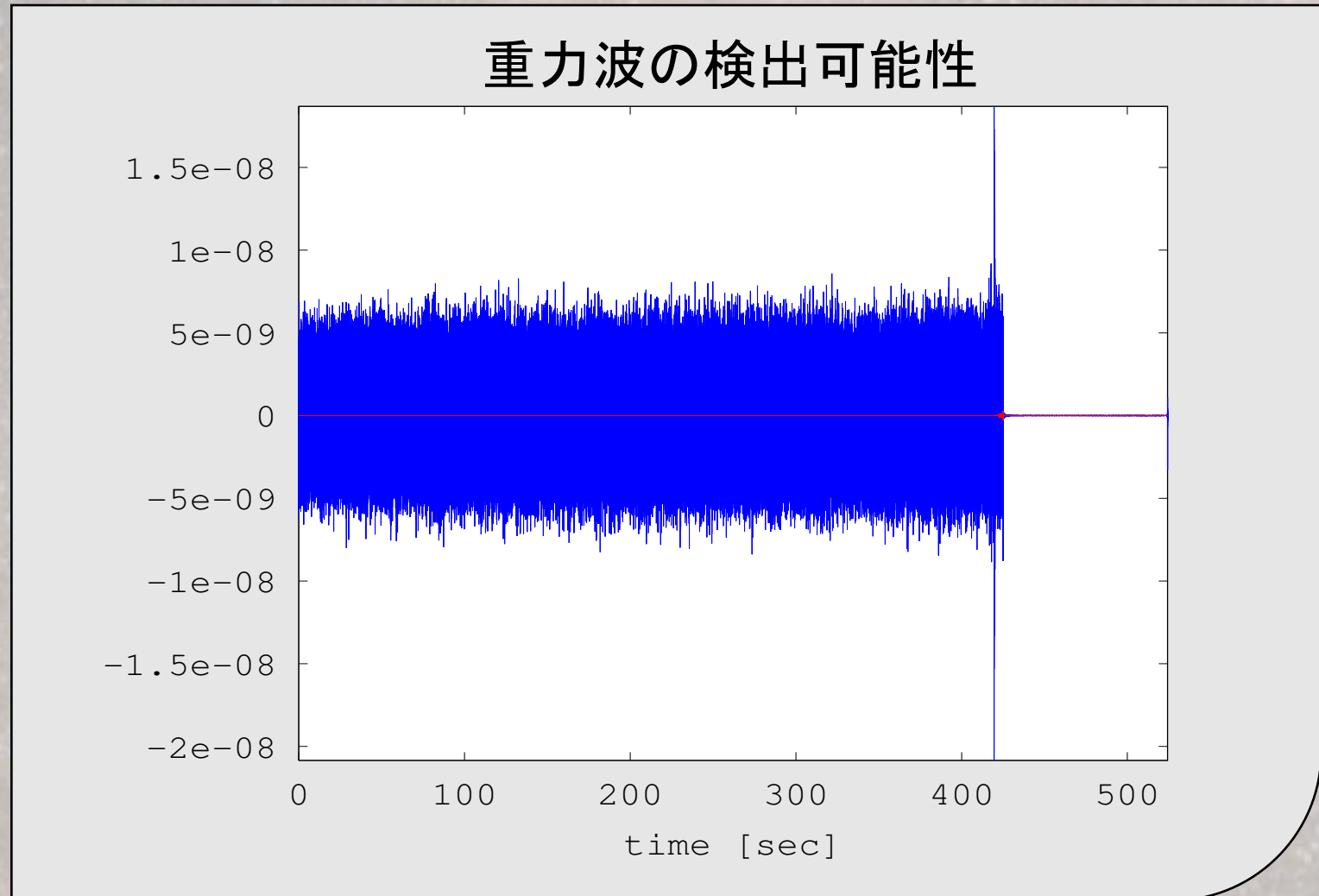
5.考察



5. 考察

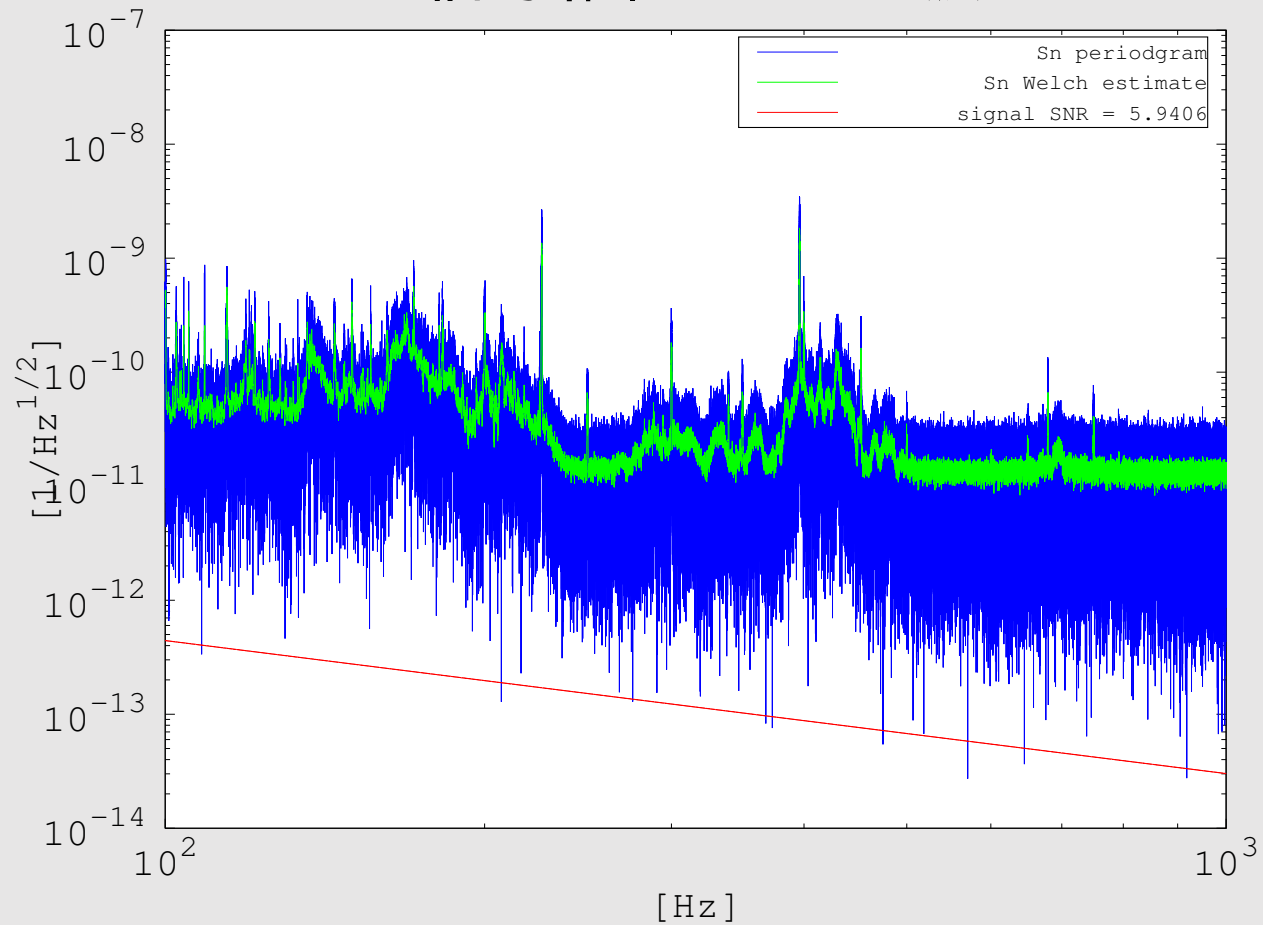


5. 考察

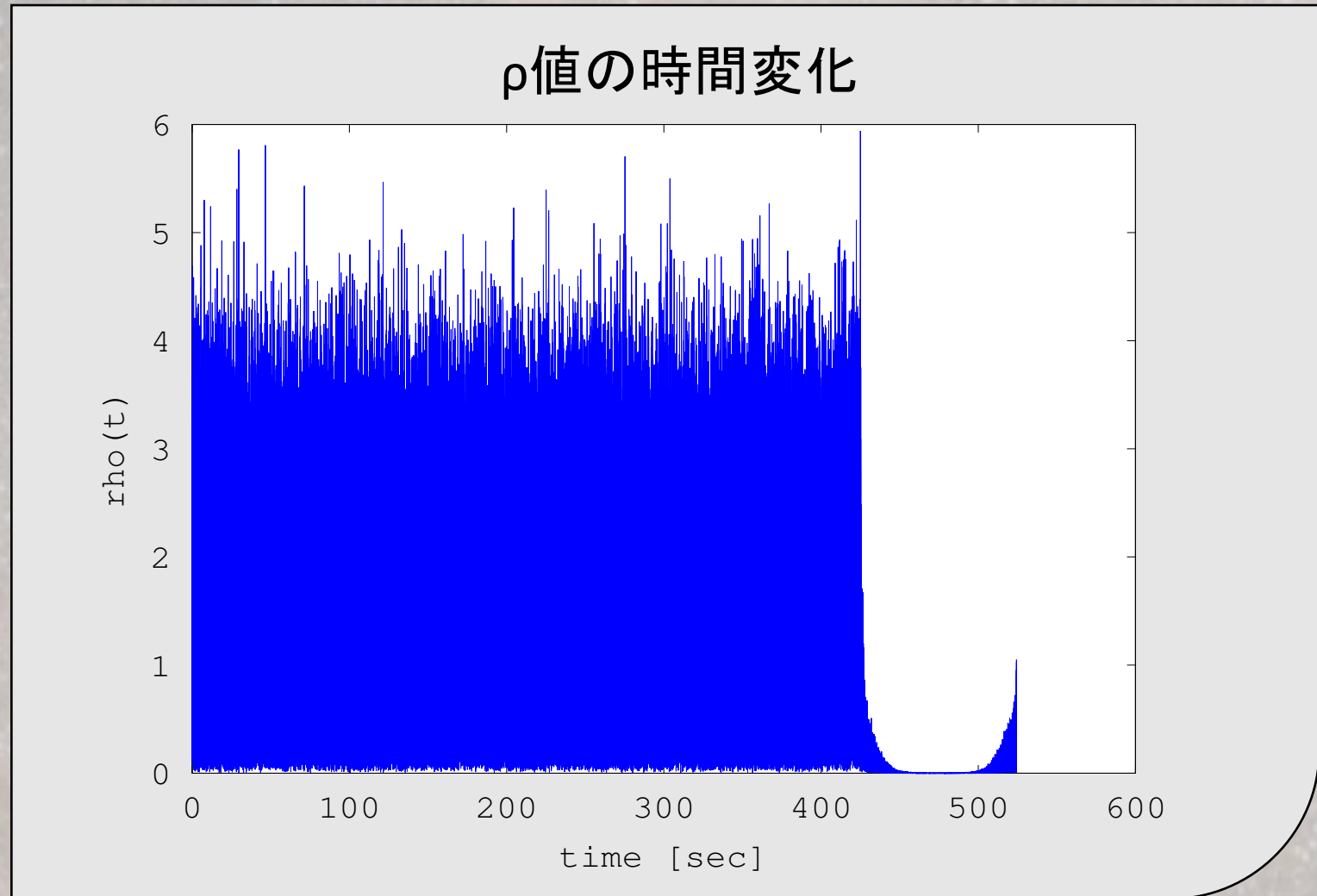


5.考察

信号雑音比と重力波

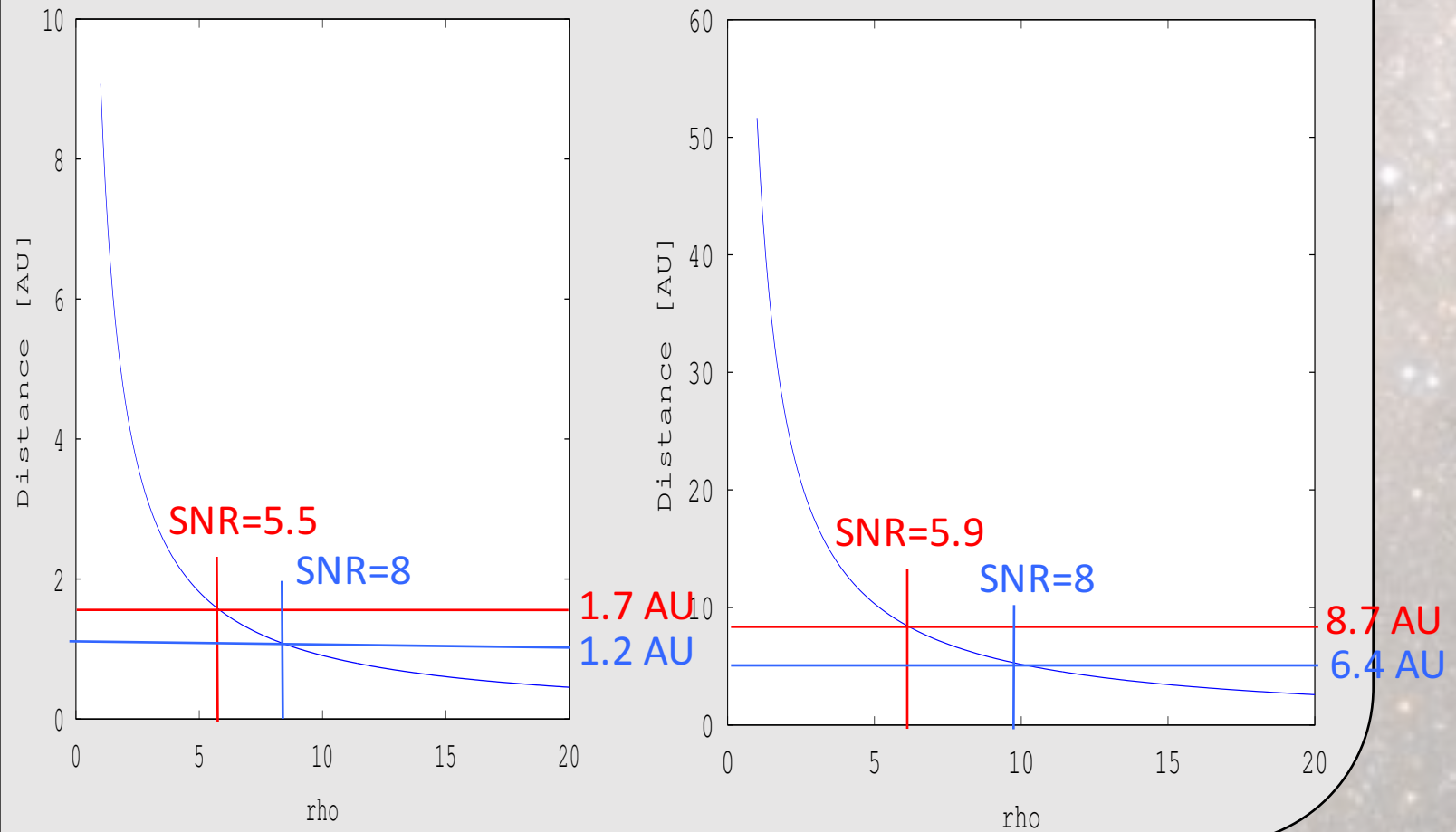


5. 考察



5.考察

最大SN比と重力波観測可能距離



5. 考察

今回得られた結果としては

観測中には土星までの間に
中性子星連星合体は無かった！

6.まとめ

- ◆ ミニ干渉計ではまだ太陽系から出られない
- ◆ 精度向上には...
- ◆ 腕を長くする、防震をどうにか
- ◆ 今KAGRAでは更に熱雑音・量子雑音を加えて非常に活発に低減策が取られている

 KAGRAからのデータが楽しみ