

# KAGRAデータを用いた ガンマ線バーストに付随する 重力波信号探索

重力波天文学グループ

石川 雅隆, 亀田峻, 瀧藤 晴, 千葉公哉, 矢部志織

# 目次

目的

背景

觀測原理

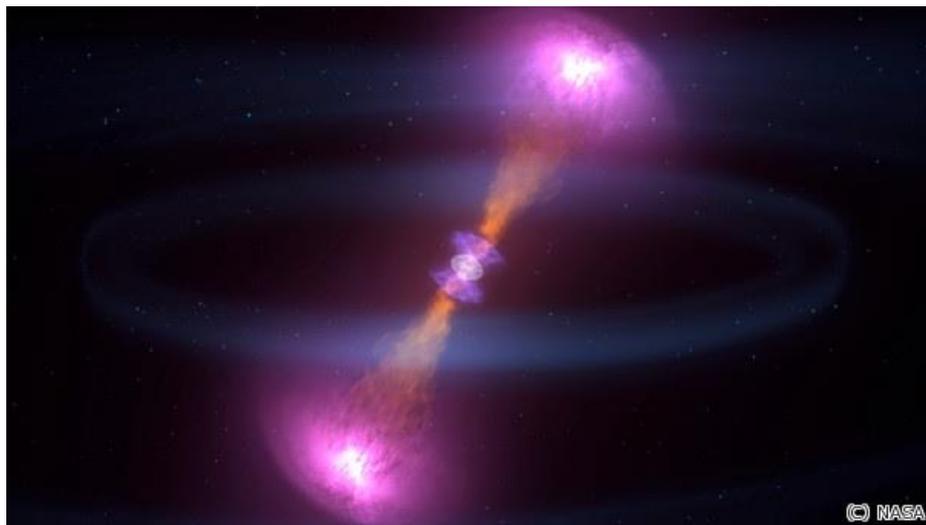
解析方法

結果

考察

# 目的

連星合体重力波信号を探索する Matched filter 解析コードを開発し、  
KAGRAデータを用いてガンマ線バースト(GRB) に付随した重力波信号を探す



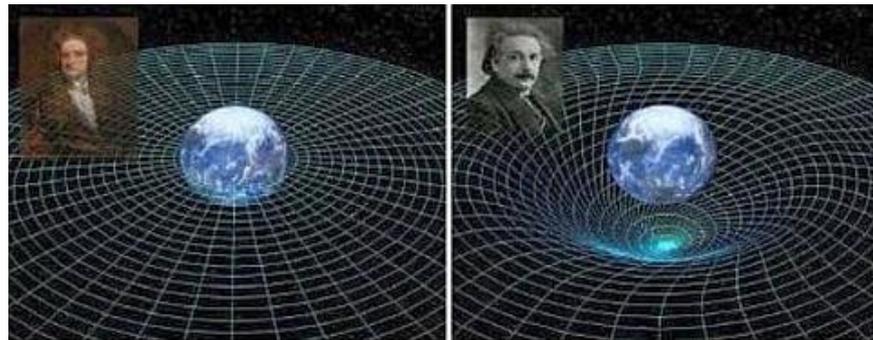
# 背景

## ①重力波の存在

- ・一般相対性理論：

質量をもった物体が存在すると、周囲の時空に歪みが生じる

<https://blog.goo.ne.jp/ktonegaw/e/62901739c9bca66e9579dbfb749a3707>



Newton's fixed space

Einstein's flexible space-time



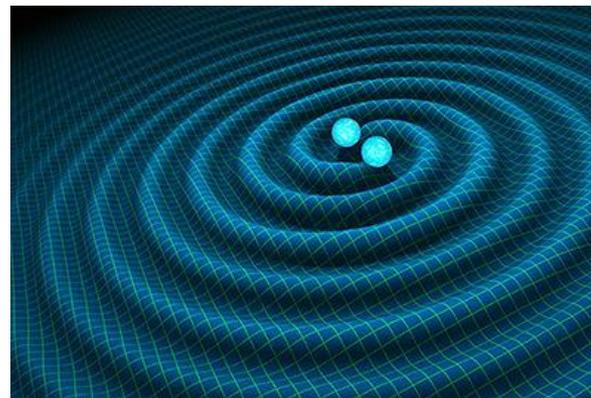
- ・質量を持った物体が運動をすると、時空の歪みが振動

⇒振動が波動として光速で伝搬していく＝重力波



## ②重力波の性質：透過性高い

⇒宇宙の深部を探ることができる



<https://www.nikkan.co.jp/articles/view/00446928>

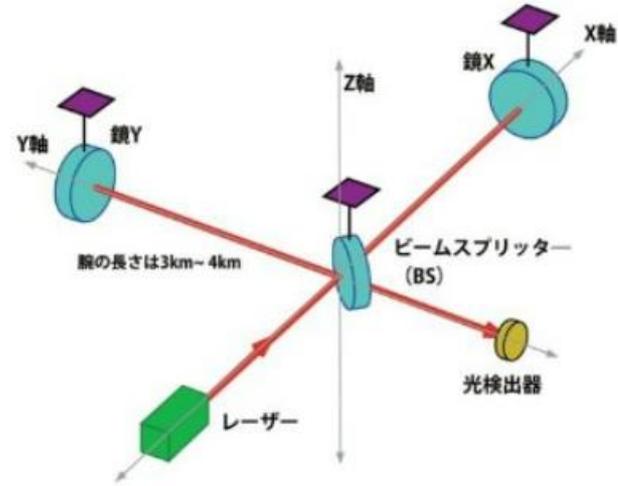
# 観測原理

## レーザー干渉計型重力波望遠鏡

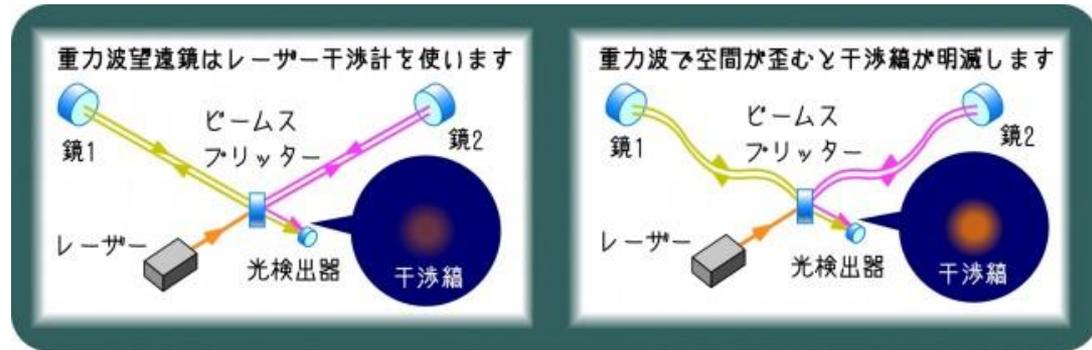
重力波により  
レーザー光の通る時空が歪む



異なる光路長を通った  
2つのレーザー光の干渉状態が変化



<https://xtech.nikkei.com/dm/atcl/feature/15/401823/071100034/>



<https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>

# 連星中性子星合体

❖ 中性子星：超高密度な天体

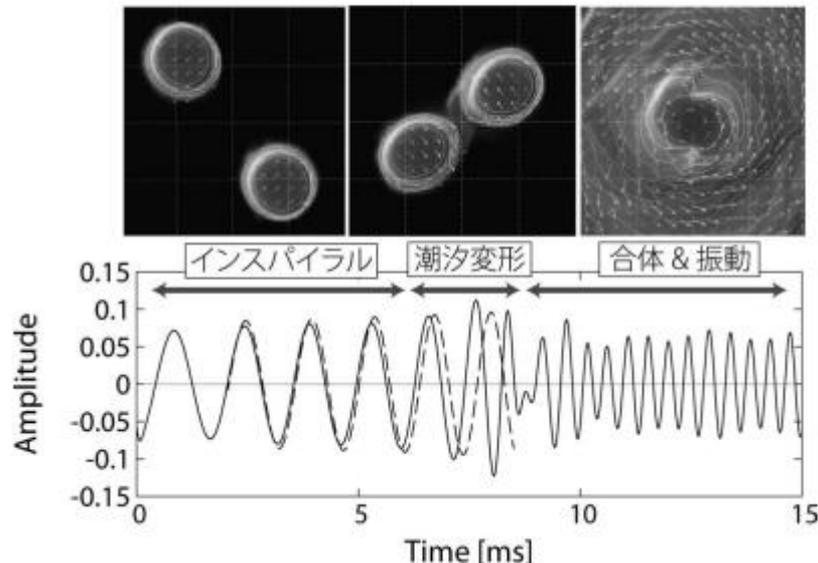
❖ 連星中性子星合体

：主要な重力波源の1つ

- GW170817 ← 初検出
- ショートガンマ線バースト (SGRB) と同時観測



[https://news.mynavi.jp/techplus/article/gravitational\\_wave-1/](https://news.mynavi.jp/techplus/article/gravitational_wave-1/)



<https://www.jps.or.jp/information/docs/67-08researches.pdf>

# ガンマ線バースト

特定の方向からガンマ線が数秒～数分間降り注ぐ現象。

・ 継続時間が

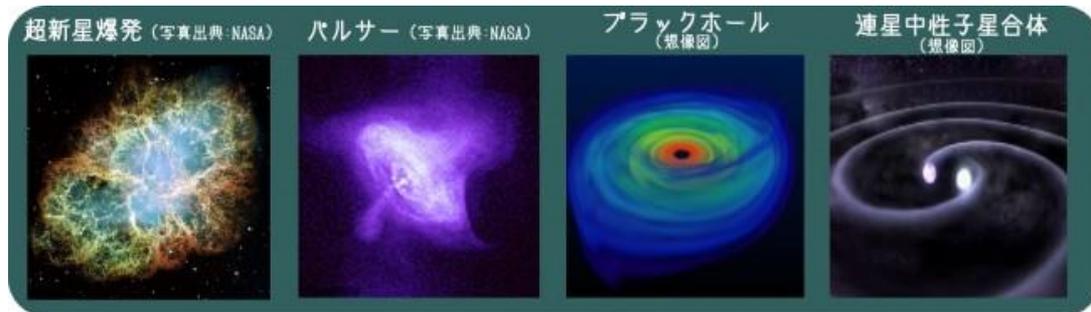
❖ 短いバースト(SGRB)

： 連星中性子星合体・ブラックホール(BH)と中性子星(NS)の連星合体

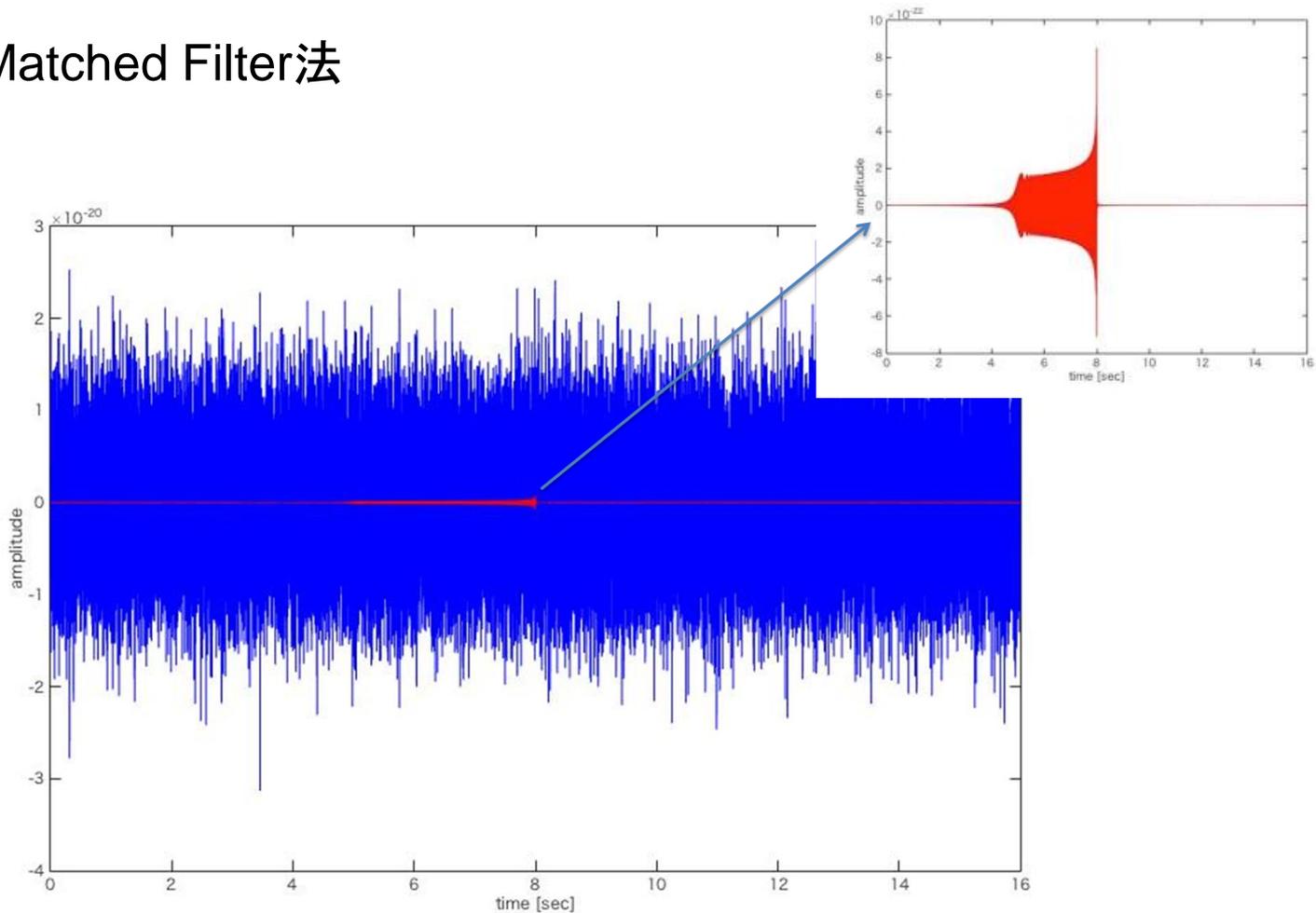
❖ 長いバースト(LGRB)

： 星の重力崩壊が関連

と考えられている



# 解析手法：Matched Filter法



# Matched Filter法

# 計算する値

理論的に導いたテンプレート波形と、観測データとの一致具合 $\rho$ を計算したい。

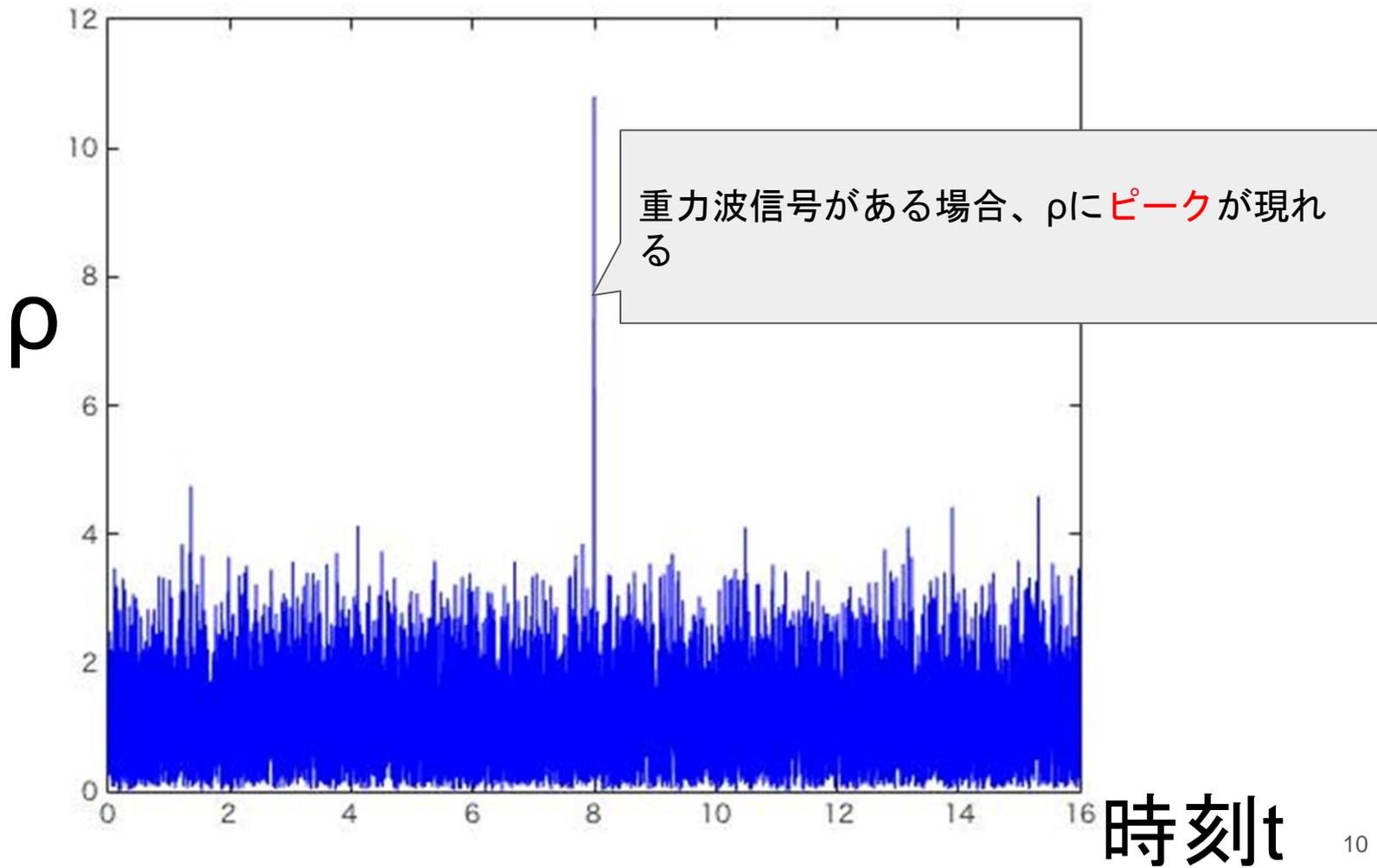
$$\rho(t) = 4 \int_{f_{\text{low}}}^{f_{\text{high}}} \frac{\tilde{x}(f) \hat{s}^*(f)}{S_n(f)} df$$

信号(周波数空間)

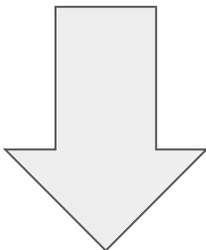
テンプレート波形

片側パワースペクトラム密度(PSD)

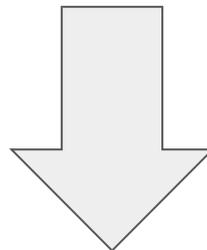
ノイズの大きいところを除外する



PSD



テンプレート波形



Matched Filter法

# PSD

- PSDとは
  - 「パワースペクトル密度」の略
  - 単位周波数あたりの波の大きさの指標
  - 波の振幅はPSDの平方根に比例する
- 今回は、信号に含まれるノイズのPSDを推定する  
(ノイズの大きさはPSDの平方根に比例する)

# PSD

- 定義：

$$\langle n(f)n^*(f') \rangle = \frac{1}{2} S_n(f) \delta(f - f')$$

離散化

$$\langle n(f_l)n^*(f_m) \rangle = \frac{1}{2} S_n(f_l) \frac{\delta_{lm}}{\Delta f}$$

$$S_n(f) = \langle 2\Delta f |n(f)|^2 \rangle$$

$n(f)$  : ノイズのフーリエ変換

$S_n(f)$  : (片側) PSD

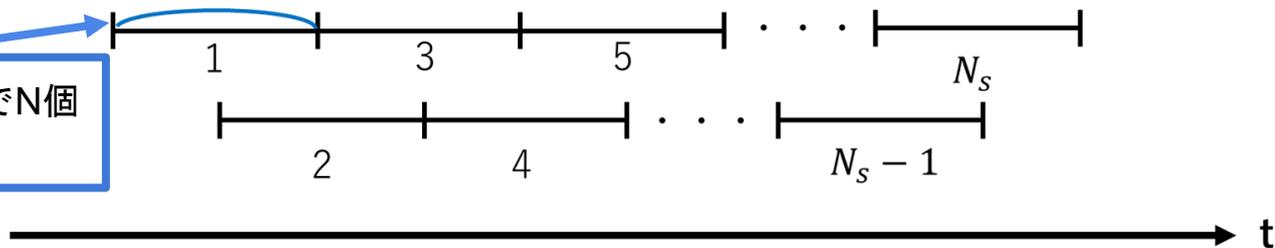
※ $\langle * \rangle$ はアンサンブル平均

# PSD

- PSDの推定（Welchの方法）：
  - 下のように、開始時刻を半分ずつずらしてセグメントを計 $N_s$ 個作成する（ $N_s$ は奇数）

※セグメント：信号を決められた時間で区切ったもの

データ点が $\Delta t$ の間隔で $N$ 個入っている



# PSD

- セグメント毎のPSDを計算する。

※検出器の出力信号はほとんどノイズなので、PSDの推定にそのまま使う

1つのセグメントにおけるPSD

$$P_k(f) = 2\Delta f |n(f)|^2$$

具体的な表式

$$P_k(f_l) = \frac{2\Delta f}{W} \left| \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} x_k(t_j) w(t_j) e^{-2\pi i j l / N} \right|^2$$

## PSD

- 上下でそれぞれ中央値を取ったのち、2つの中央値PSDの平均を取る。

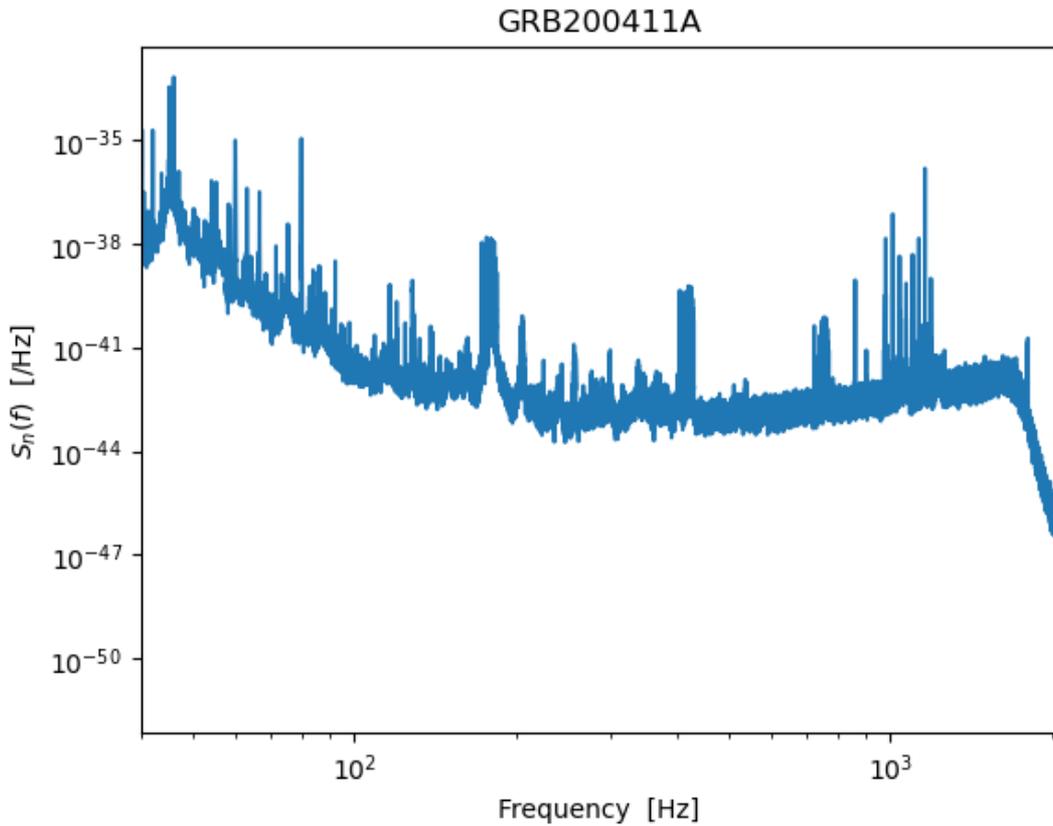
※外れ値の影響を除くために一度中央値を取る。

$$S_n(f) = \frac{1}{N_s} \left[ \frac{N_s - 1}{2} \alpha_{\frac{N_s - 1}{2}}^{-1} \text{median}\{P_{2k}\} + \frac{N_s + 1}{2} \alpha_{\frac{N_s + 1}{2}}^{-1} \text{median}\{P_{2k-1}\} \right]$$

※ $\alpha$ は補正因子

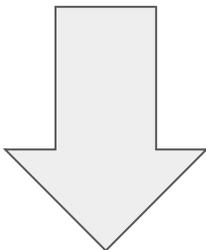
$$\alpha_n = \sum_{k=1}^n \frac{(-1)^{k+1}}{k}$$

# PSD

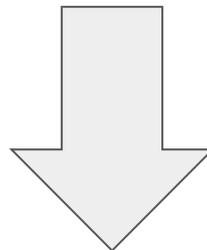


ガンマ線バーストGRB200411A直前のPSD推定値

PSD



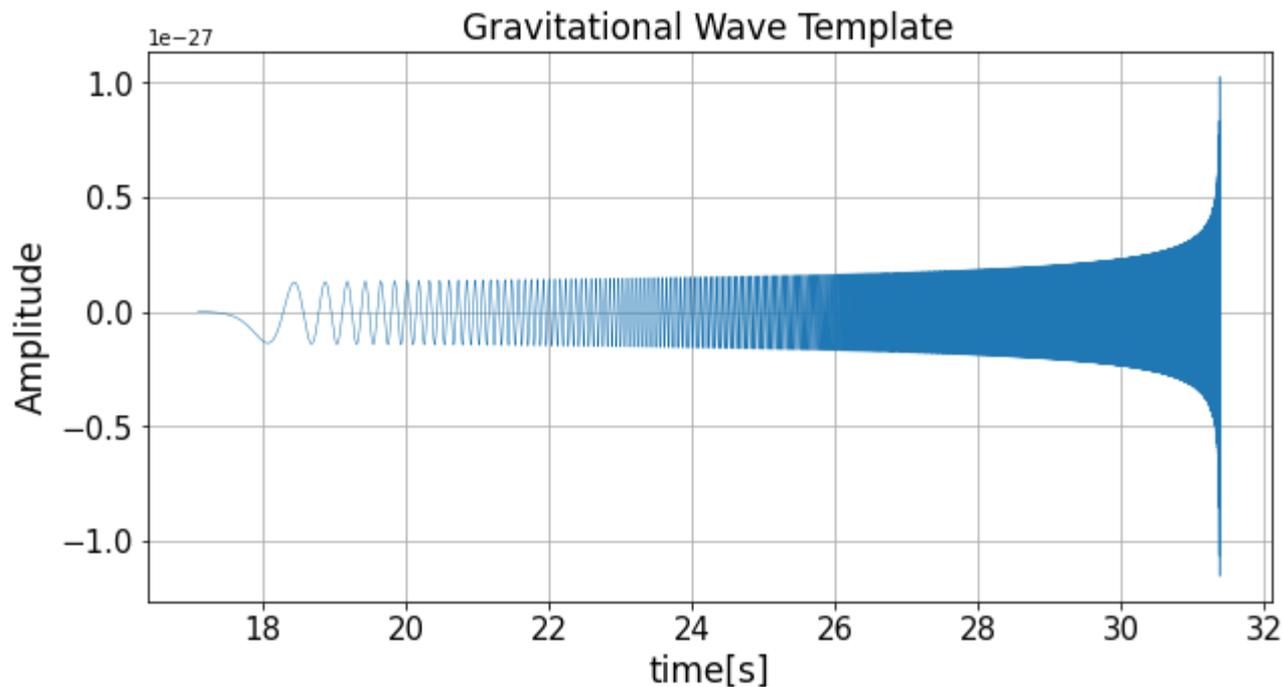
テンプレート波形



Matched Filter法

## テンプレート波形

- こんな感じの波形を生成したい



## テンプレート波形

1. 周波数成分 $\hat{s}(f)$ を求める。
2. 波形を作るために必要なパラメータ
  - a. 合体前の天体の質量 $m_1, m_2$
  - b. KAGRAの感度がよい、 $40\text{Hz} < f < (\text{十分大きい値}: 2048\text{Hz})$ の範囲

ある $(m_1, m_2)$ の組に対して $\hat{s}(f)$ を生成

→その $\hat{s}(f)$ が実際の観測値とどれくらい一致するか検証

→ $m_1, m_2$ を変化させていき、どの $(m_1, m_2)$ の組が最も一致するか調べる

## テンプレート波形

- 精度を上げるためにしたこと
  - $m_1, m_2$ ではなくチャープ質量と質量比で指定
    - チャープ質量: $M$

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

- 質量比: $q$

$$q = \frac{m_1}{m_2}$$

## テンプレート波形

- 精度を上げるためにしたこと
  - 質量の刻み幅はMの(-5/3)乗とqが等間隔になるように生成
    - Mの(-5/3)乗は100等分割
    - qは3等分割

$$\hat{s}(f) = \mathcal{A}(f)e^{-i\Psi(f)}$$

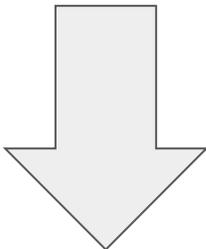
$$\begin{aligned}\Psi(f) &\approx \frac{3}{128\eta v^5} \\ &= \frac{3}{128} \left( \frac{G\pi}{c^3} f \right)^{-5/3} \mathcal{M}^{-5/3}\end{aligned}$$

## テンプレート波形

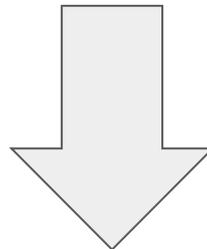
- 精度を上げるためにしたこと
  - 質量の刻み幅はMの(-5/3)乗とqが等間隔になるように生成
    - Mの(-5/3)乗は100等分割
    - qは3等分割

$$\Delta\Psi(f) = \frac{3}{128} \left( \frac{G\pi}{c^3} f \right)^{-5/3} \Delta\mathcal{M}^{-5/3} < 2\pi$$

PSD



テンプレート波形



Matched Filter法

## Matched Filter法

## 計算する値

理論的に導いたテンプレート波形と、観測データとの一致具合 $\rho$ を計算したい。

$$\rho = 4 \int_{f_{\text{low}}}^{f_{\text{high}}} \frac{\tilde{x}(f) \hat{s}^*(f)}{S_n(f)} df$$

信号(周波数空間)      テンプレート波形

片側パワースペクトラム密度(PSD)

ノイズの大きいところを除外する

## Matched Filter法

## 信号同定の原理

想定される信号の形

$$\tilde{x}(f) = A\hat{s}(f) + \tilde{n}(f)$$

$$\rho = 4 \int_{f_{\text{low}}}^{f_{\text{high}}} \frac{A|\hat{s}(f)|^2}{S_n(f)} df + 4 \int_{f_{\text{low}}}^{f_{\text{high}}} \frac{\tilde{n}(f)\hat{s}^*(f)}{S_n(f)} df$$

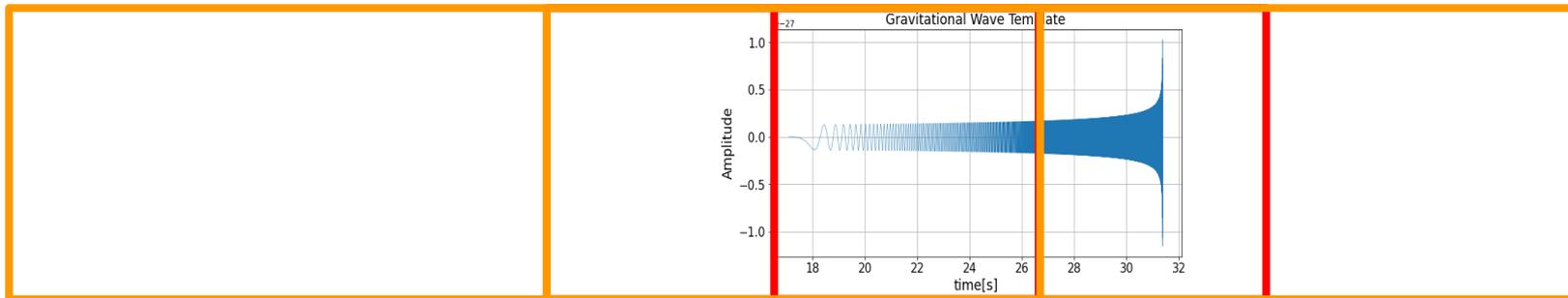
常に正

積分の結果は小さくなる

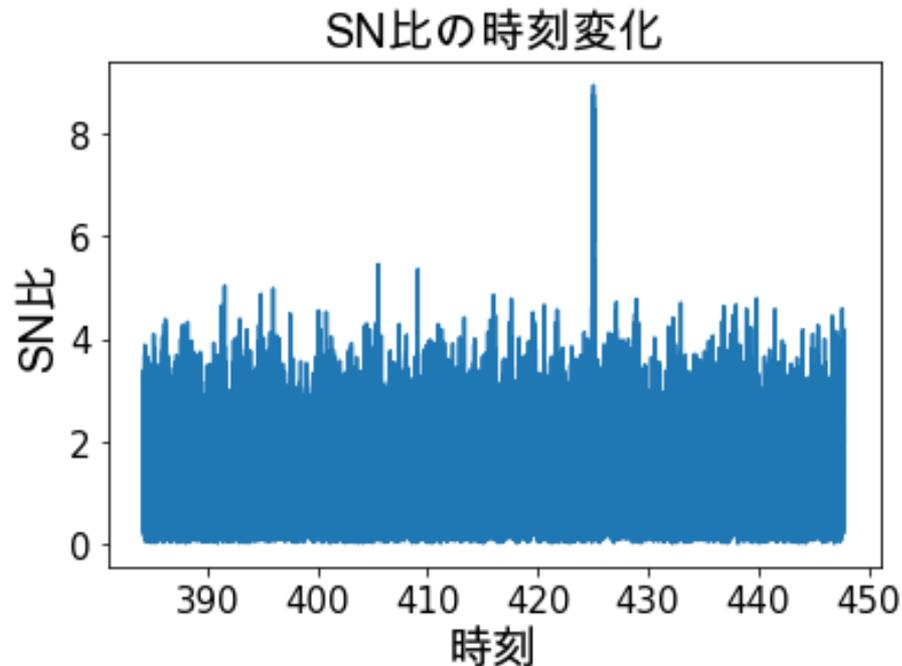
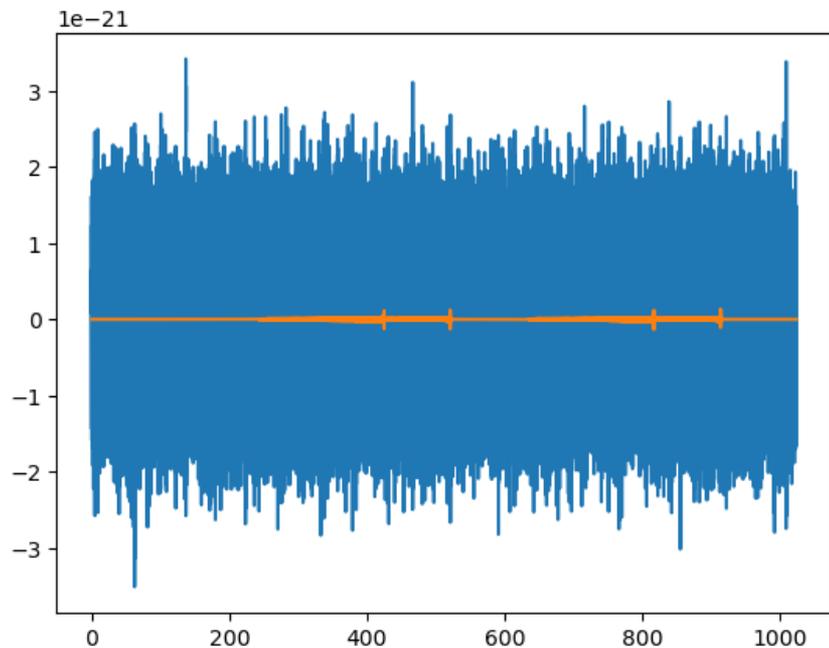
## Matched Filter法

## 注意したこと

- ・ 解析を行う区間の長さを、想定している**重力波信号の長さの倍以上**とる。
- ・ さらに、区間を**半分ずつ重ねる**ようにして時間ループを回す。



# テスト結果



答え: 時刻425sec;  $m_1 = 1.01M_{\text{sun}}$ ,  $m_2 = 1.85M_{\text{sun}}$ ,  
推定値:  $m_1 = 1.02M_{\text{sun}}$ ,  $m_2 = 1.85M_{\text{sun}}$

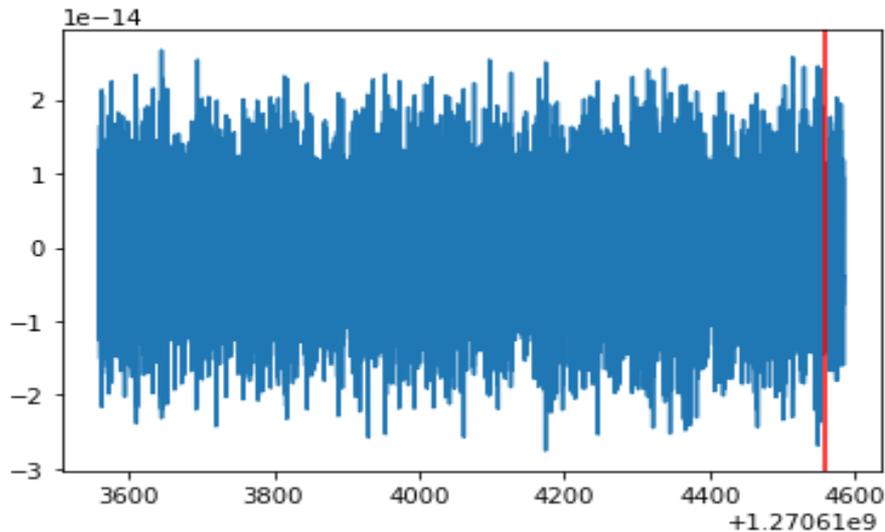
# 使用データ

① KAGRAデータ : 2020,4/7~4/20

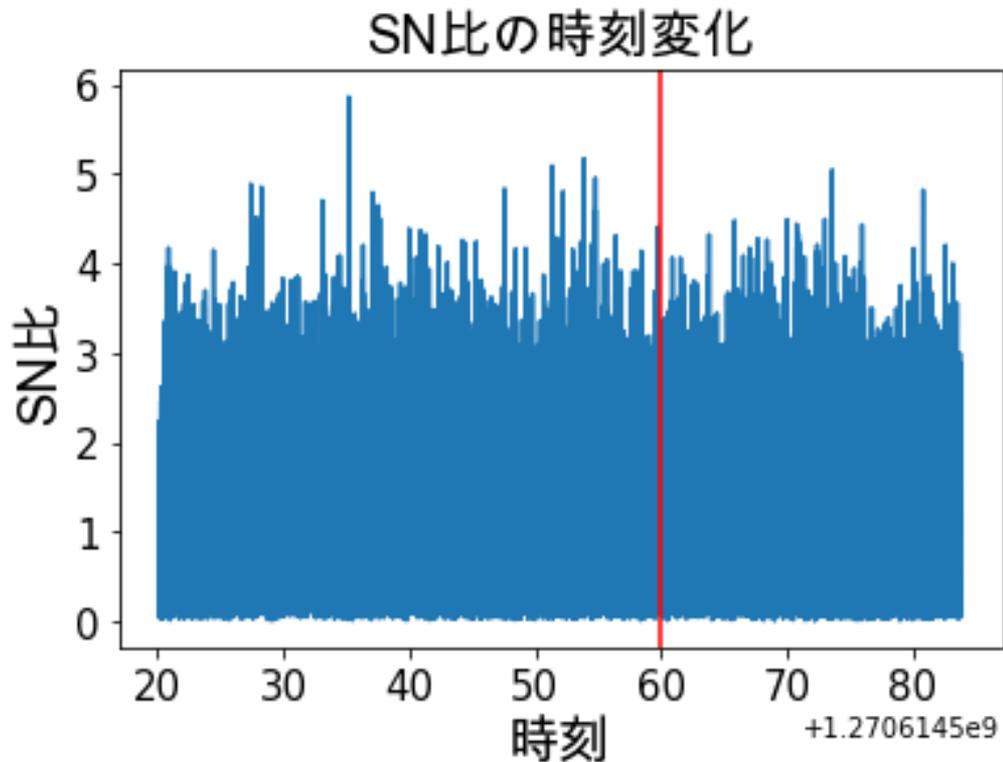
[https://www.gw-openscience.org/archive/O3GK\\_4KHZ\\_R1/](https://www.gw-openscience.org/archive/O3GK_4KHZ_R1/)

② ガンマ線バースト (GRB) : GRB200411A (shortバースト)

GRBの周り1024秒



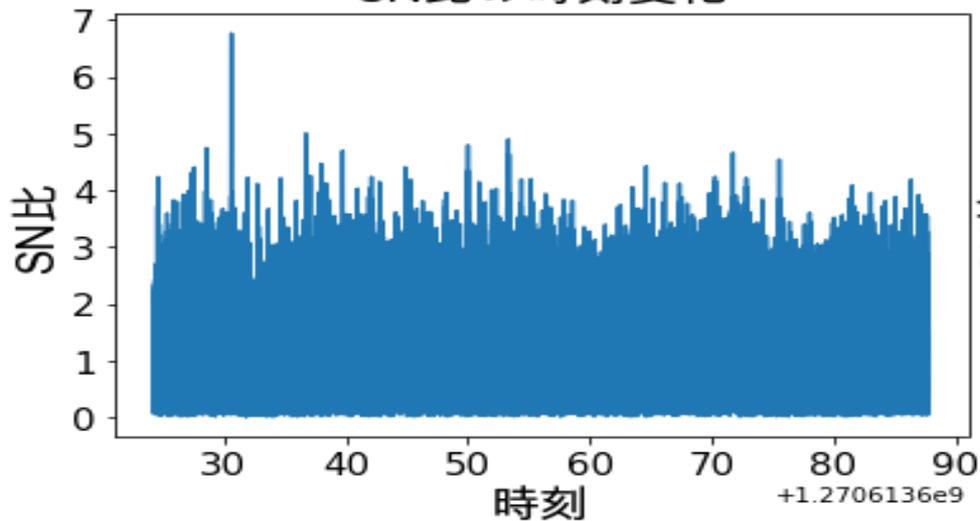
# 結果 GRBが生じた時刻周辺



$m_1 = 0.5M_{\text{sun}}$   
 $m_2 = 5M_{\text{sun}}$   
赤線がGRBの時刻

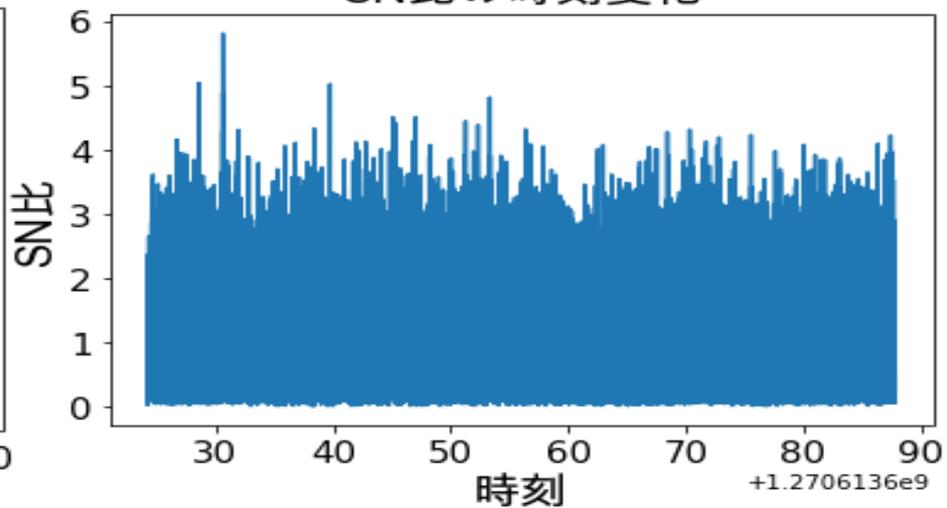
# 結果 気になるpeak周辺

SN比の時刻変化



$m_1 = m_2 = 1.33 M_{\text{sun}}$

SN比の時刻変化



$m_1 = m_2 = 1 M_{\text{sun}}$

# 結果まとめと考察

- ・ shortGRBが生じた時刻を含んだ64secのデータには有意な重力波信号はなかった。
- ・ shortGRBの時、推定された連星の質量は、中性子星になり得ない程度に大きい質量。  
→ 中性子星・ブラックホール連星の可能性もありそう。
- ・ SN比のピークがある時刻は連星の質量に関係なく、ピークになっていた。  
→ KAGRA自体の特性による可能性が高い