

宇宙・素粒子スプリングスクール

2018年3月10日

重力波天文学

鴨野 梨沙 狩谷 泰慶 高橋卓弥 田中宏樹 山本真大

Supervisor

大橋先生 田越先生 ゆずりんさん 内潟さん

成川さん 横澤さん 桐井さん

-Contents-

1. Introduction

2. Experiment

3. Data Analysis①~ Matched Filter ~

4. Data Analysis②~ Searching for after event ~

4.1 Purpose

4.2 Method

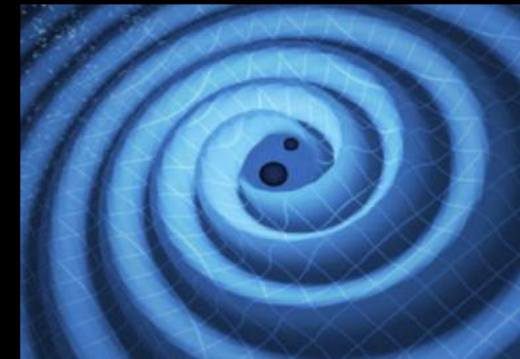
4.3 Result

4.4 Discussion

5. Conclusion

1. Introduction

重力波とは！



一般相対論による100年前の予言

Einstein's equation : $G^{\mu\nu} = \kappa T^{\mu\nu}$ LIGO Scientific Collaboration

時空の歪みが光速で進む横波の波動解が存在→重力波！

2015年9月、遂にLIGOで重力波を直接検出！

→ノーベル賞!!!重力波天文学の幕開け!!!

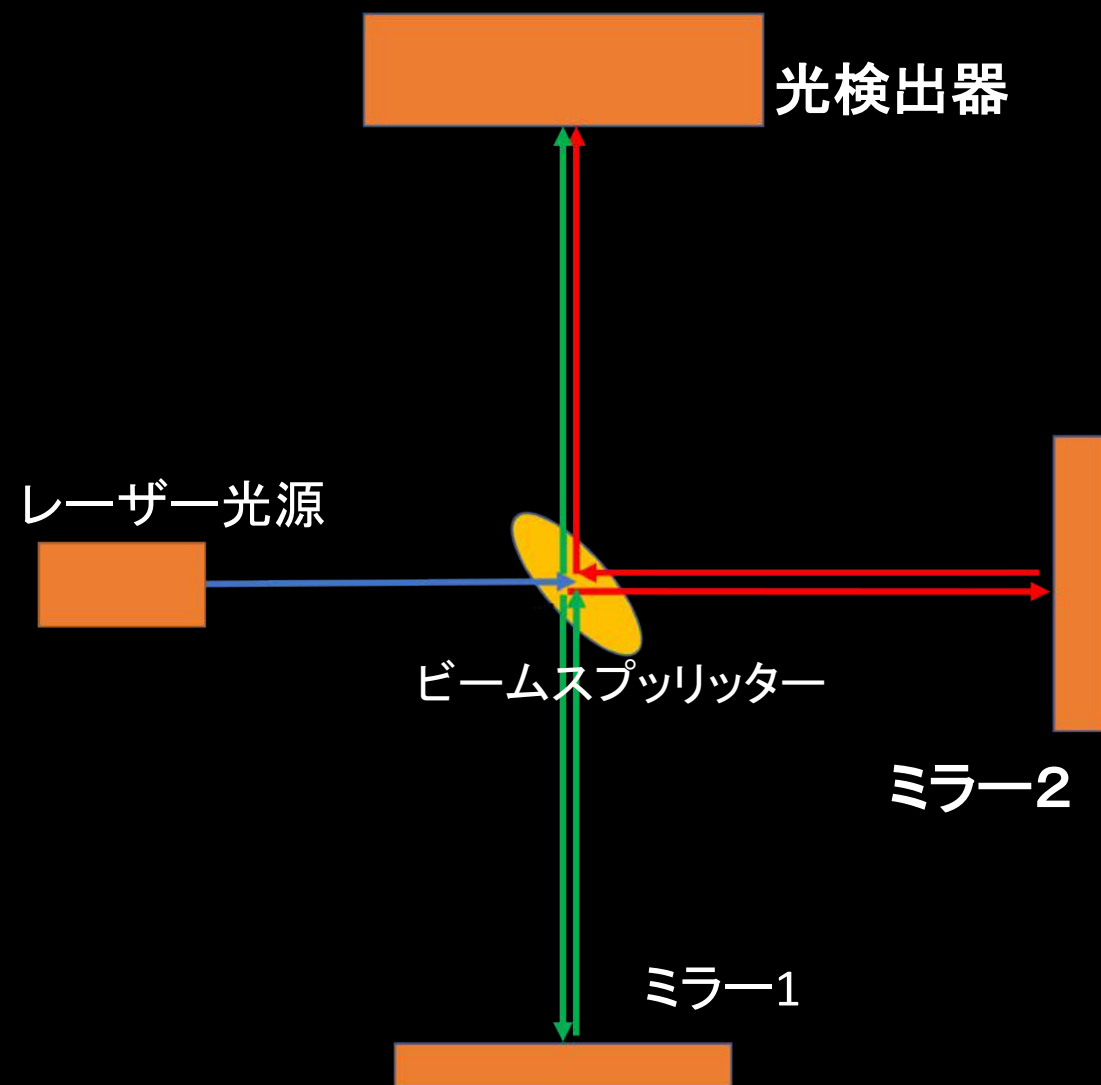


電磁波などでは見ることの出来ない現象の観測に期待！

(ex.初期宇宙, ブラックホール, 高エネルギー天体現象の内部)

重力波検出の簡単な原理

～マイケルソン干渉計～



・重力波により空間が歪められる



光路差が生まれる



干渉光に明暗が現れ、光検出器でその信号をとらえる

・腕の長さを大きくするほど感度がよくなる

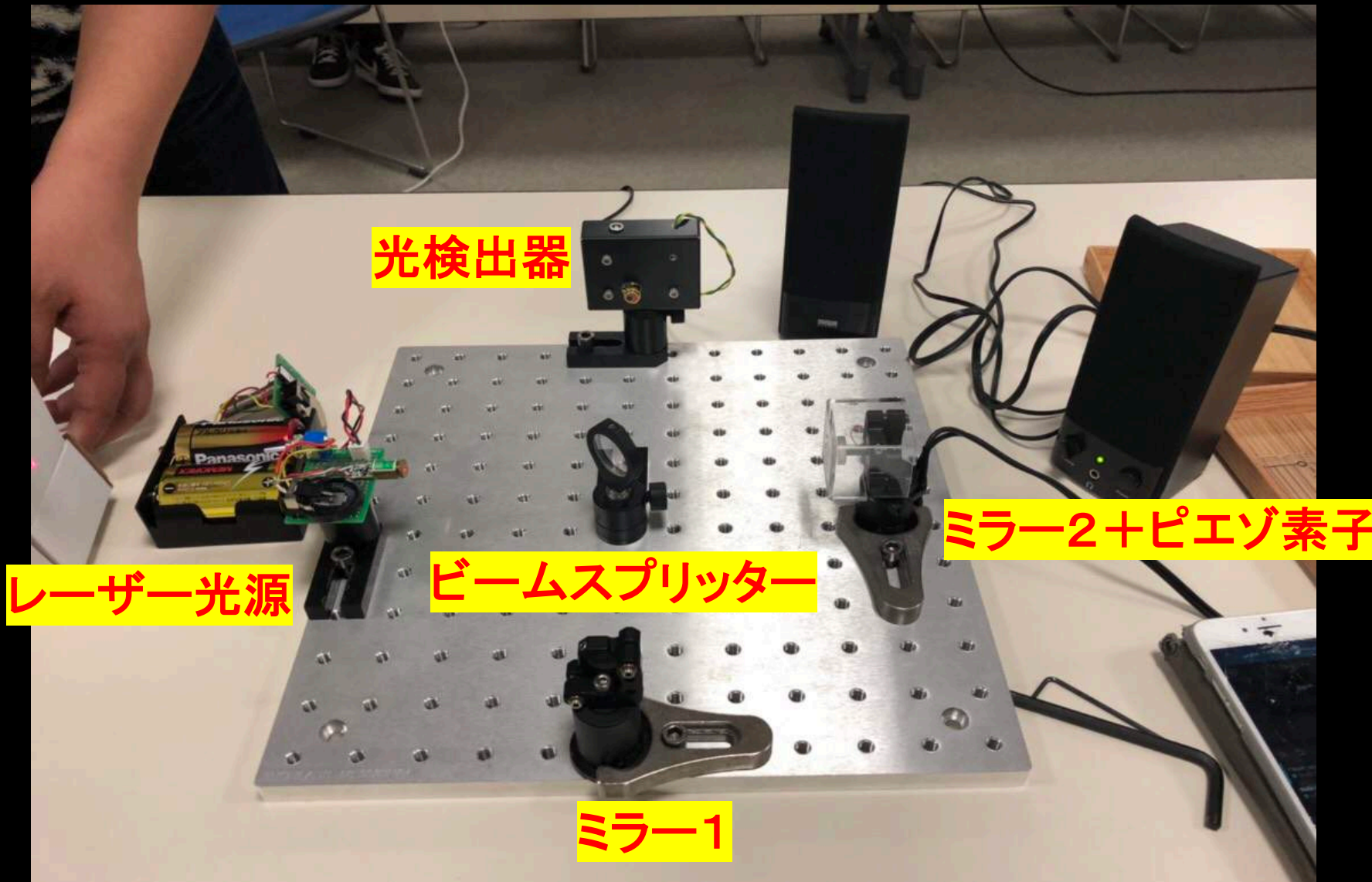
$$\rightarrow \Delta L = hL$$

(ΔL : 腕の長さの変位, h : 重力波の振幅)

LIGOの腕の長さは4 km !

2. Experiment

簡単な干渉計の作成



重力波を聞く！

聞くとは？—自分たちで作った干渉計で音を聞く

ピエゾ素子に音源をつないで電気信号を振動に変える



振動によって生じた光路差が生じる



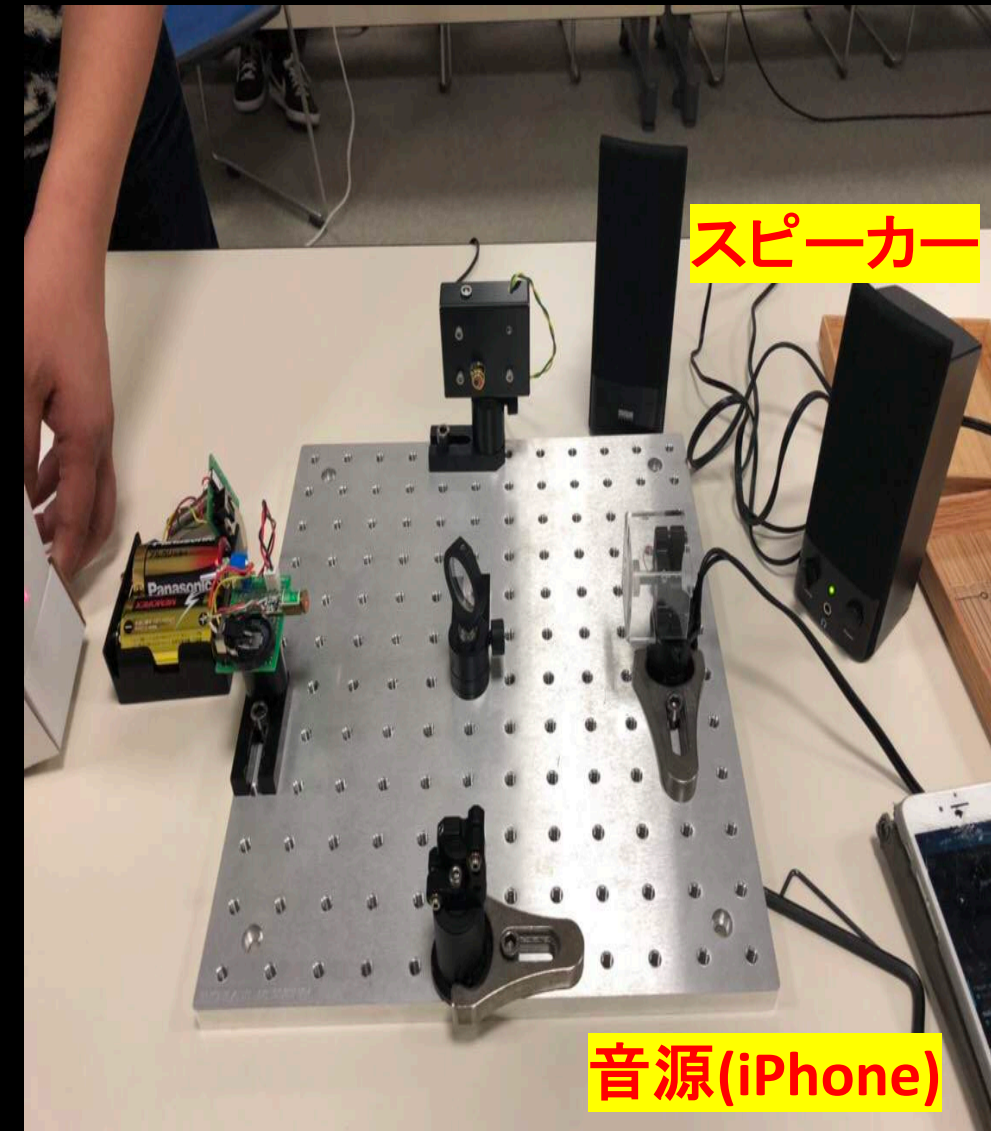
光検出器につないだスピーカーで電気信号を音に変える



音源の音は聞こえたが、音に周期的？な強弱が現れた！



実際にLIGOで公開されている重力波の音は・・・



？疑問？

①なぜ音源の音が再現されたのか？

②周期的に音の大きさが変わったのはなぜか？

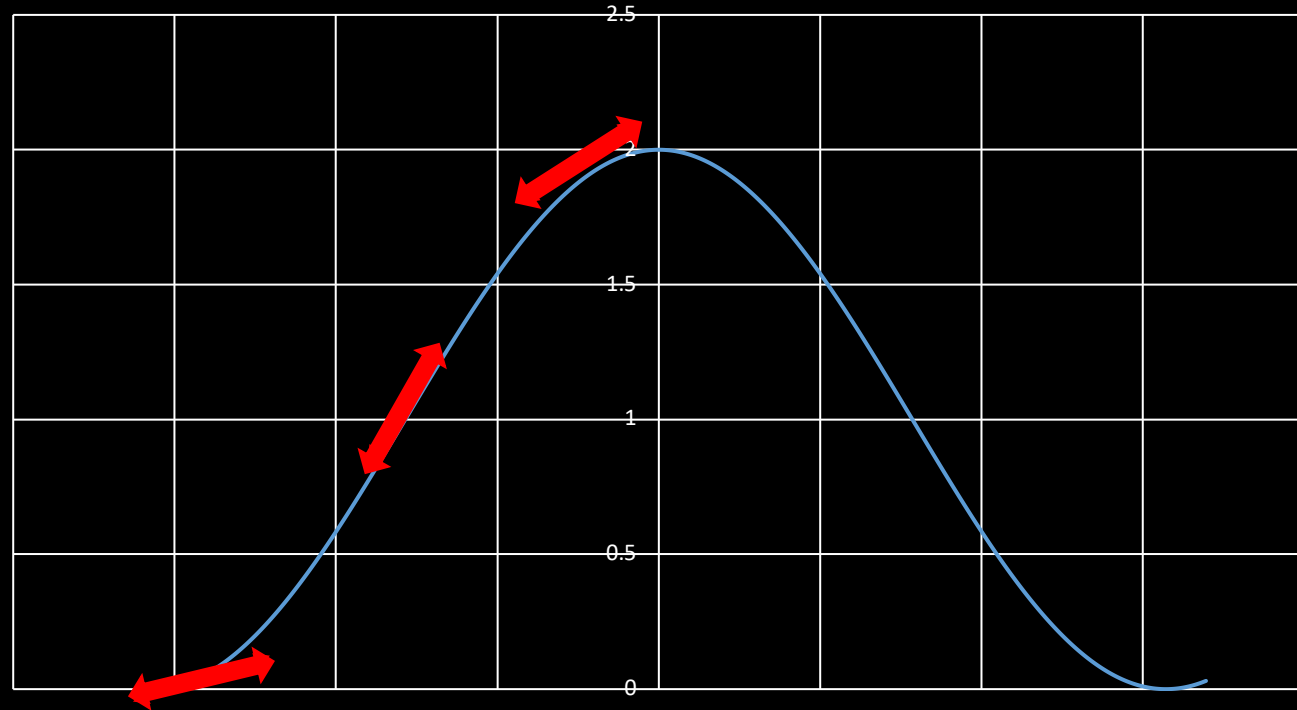
レーザーから出る電場が

$$E_0(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)}$$

であらわされるとすると、受光部での光の強度 $I = |E|^2$ は、2つの光路をとった光が干渉することによって、

$$|E|^2 = |A|^2(1 + \cos(2k\Delta L))$$

と表される。 ΔL は光路差



$$|E|^2 = |A|^2(1 + \cos(2k\Delta L))$$

光路差 ΔL が変化することで、 $|E|^2$ が変化する。
 ΔL の変化が微小な場合、 $|E|^2$ の変化は、微分

$$\frac{d(|E|^2)}{d(\Delta L)} = 2k|A|^2\sin(2k\Delta L)$$

で表される。

理由

①なぜ音源の音が再現されたのか？:


ΔL をピエゾ素子によって微小に変化させたから
(周波数300～500Hz)

②周期的に音の大きさが変わったのはなぜか？:

外部から入る様々なノイズによって、 ΔL が変化したから
(周波数0.5～1Hz)

3. Data Analysis①

~Matched Filter~

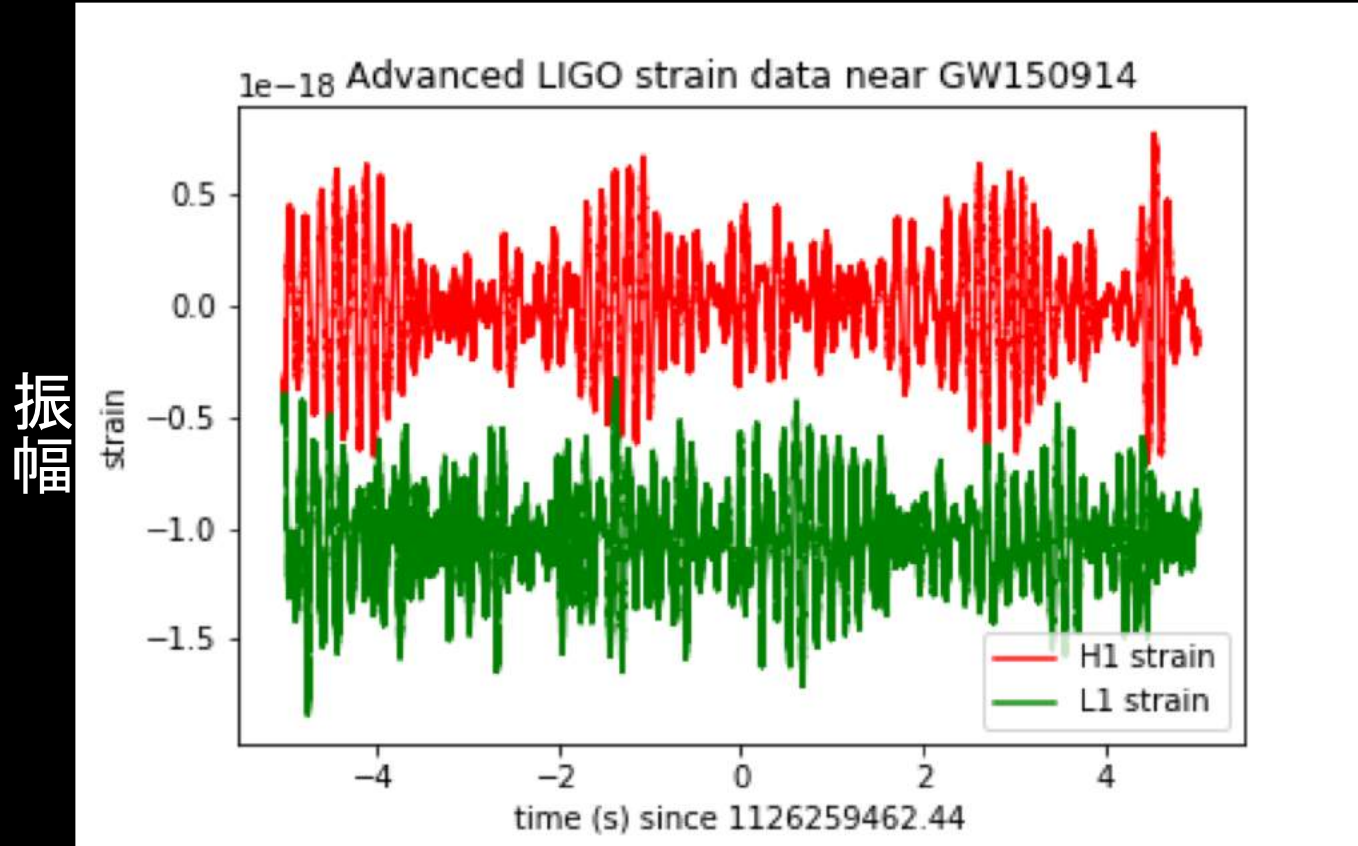
An aerial photograph of the LIGO observatory, showing the central station and two long, straight arms extending into a vast, arid desert landscape. The terrain is brown and cracked, with some sparse vegetation. In the distance, there are low mountains under a clear sky.

我々は、最新のLIGOの
データを用いた

<http://www.yukawanet.com/archives/5009269.html>

重力波のデータ解析手法

“Matched filter”

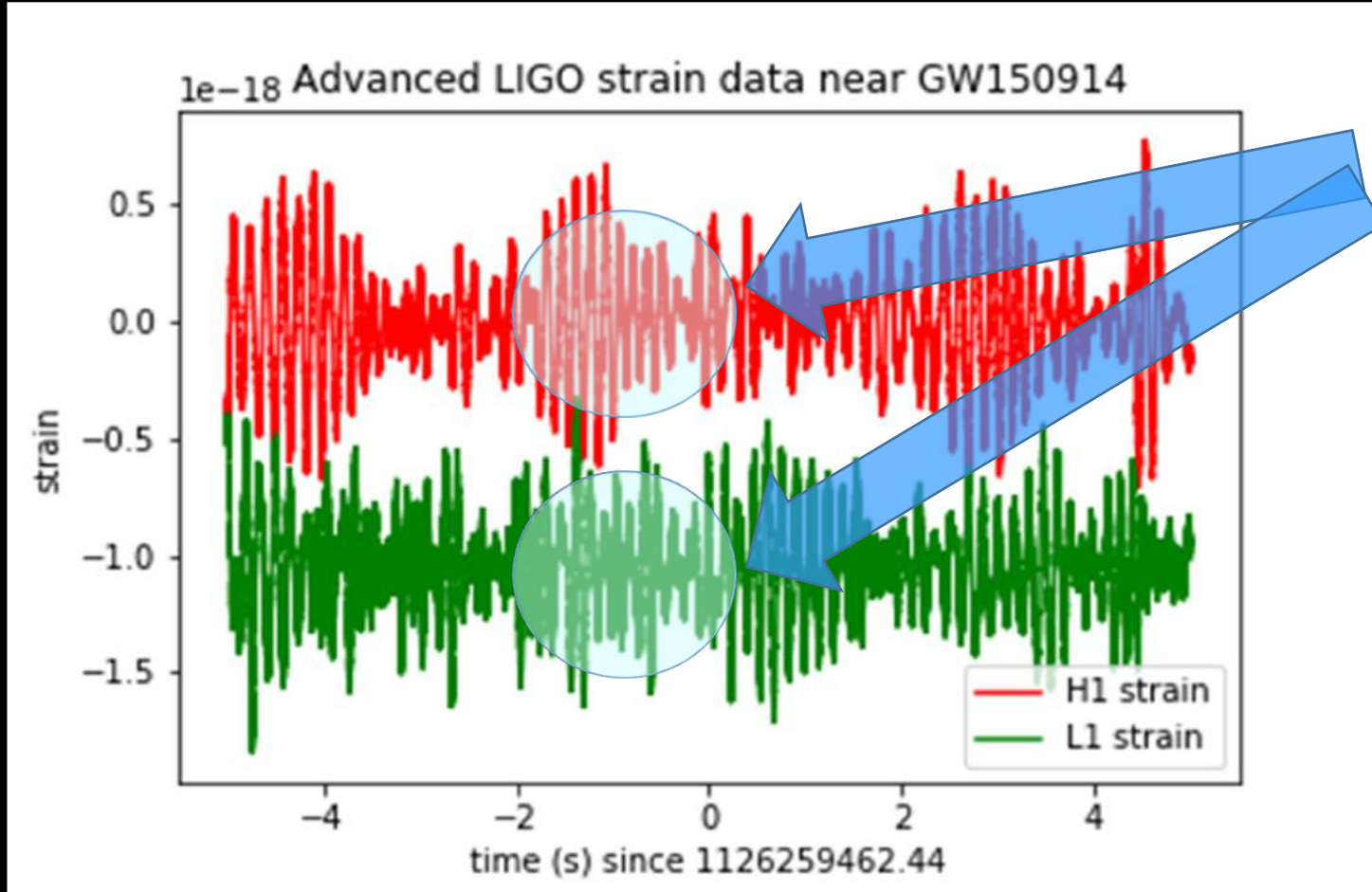


振幅

時間

▲実際のLIGOのデータ(GW150914)
重力波信号はどこ？

Matched filterで信号を見つける

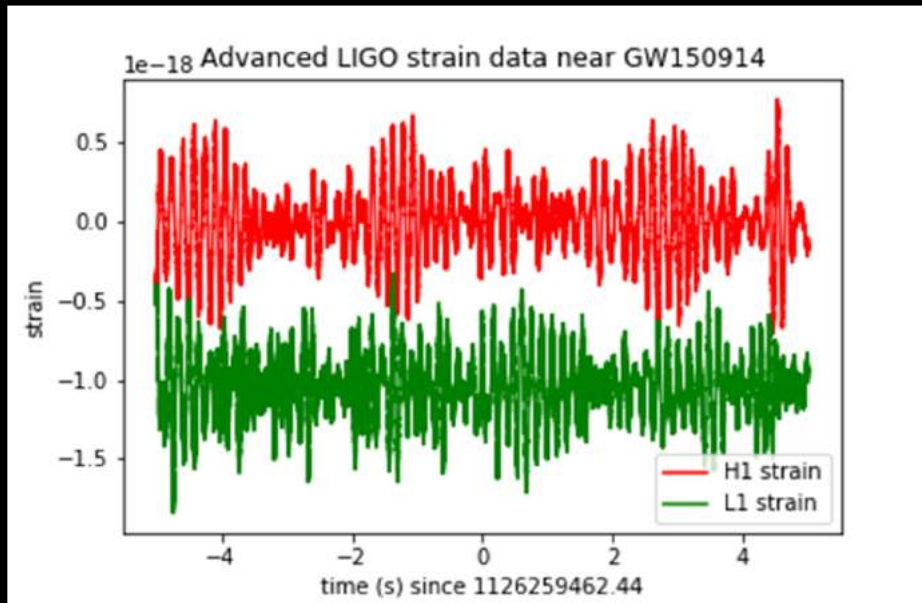


ここにGW signal
があるはず！

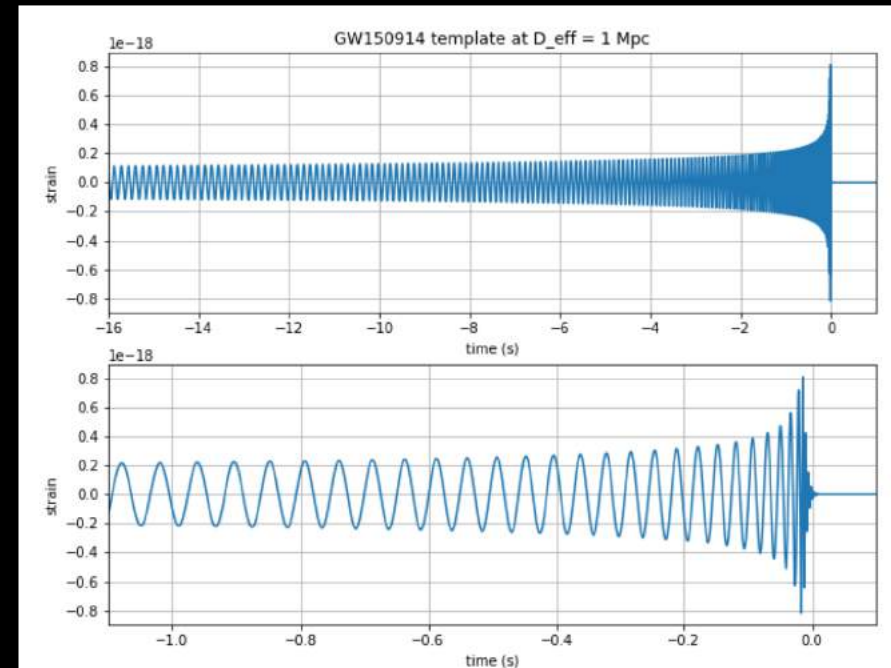
しかし **Noise** に埋もれて
見えない・・・

What's “Matched filter”?①

実際のデータ
data



一般相対論から予測される波形
Numerical relativity



相関を取る

What's "Matched filter"? ②

データ ノイズ シグナル(テンプレート)
 $x(t) = n(t) + s(t)$

$$\rho = (x, \hat{s}) = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{x}(f) \hat{s}^*(f)}{S_n(f)} df$$

を計算する

さらに定常Gaussian Noise下では、

$$\rho = SNR_{data} \quad (\text{SNR : Signal-to-Noise Ratio})$$

→ ρ がある閾値を超えると、重力波イベントの候補になる

(参考)統計学的裏付け

データ解析において対数尤度比 λ が最大になるものを探す必要があるが、それは ρ を用いて表される。

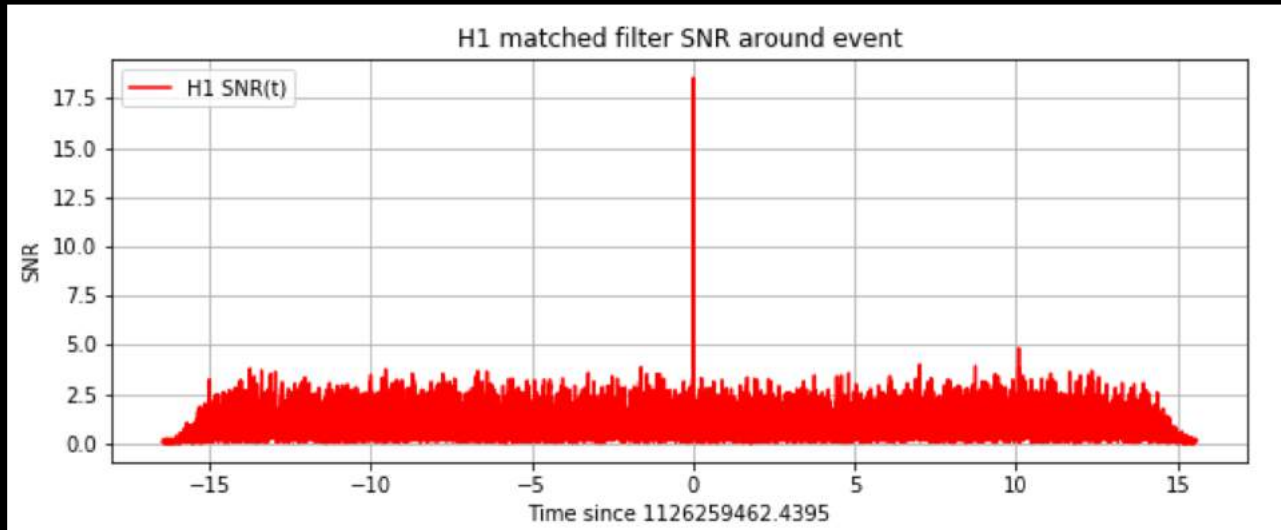
$$\lambda \equiv \ln \Lambda = (x, s) - (s, s)/2 \quad b^2 = (s, s)$$

$$\max_b \lambda = \frac{1}{2} (x, \hat{s})^2$$

SNR

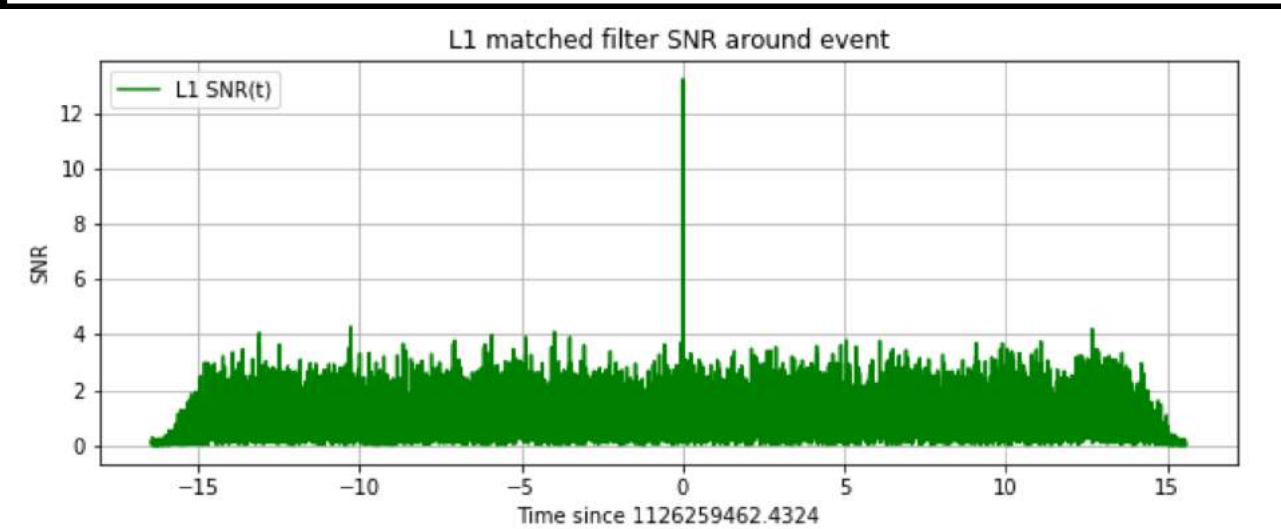
(example of template : $m_{BH1} = 41.74M_{\odot}$, $m_{BH2} = 29.24M_{\odot}$, $d = 410\text{Mpc}$)

Hanford



$$SNR_{H1} \cong 18!$$

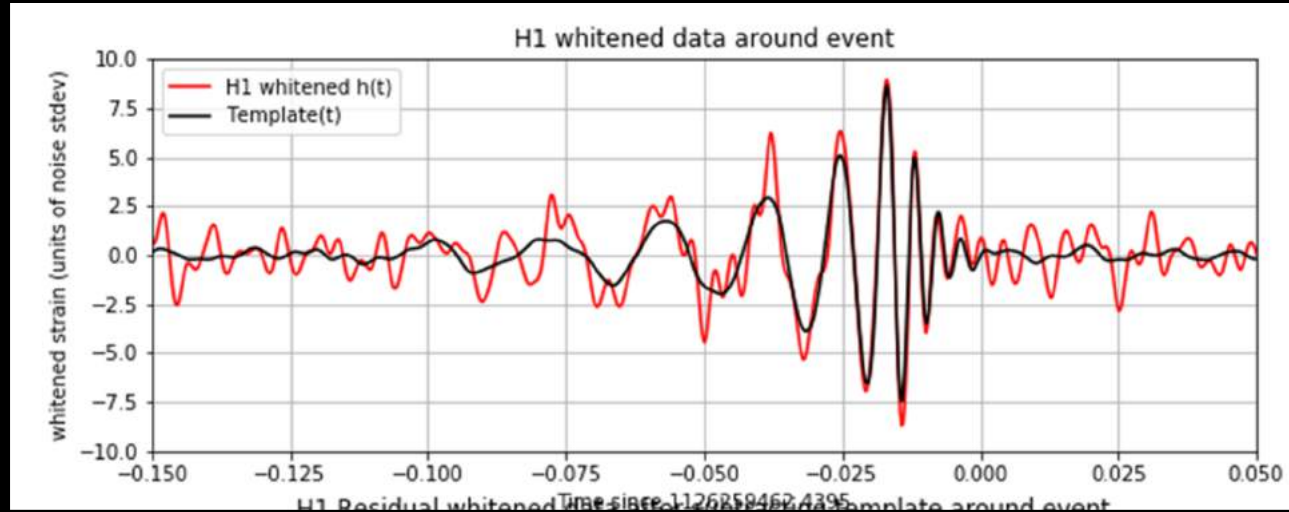
Livingston



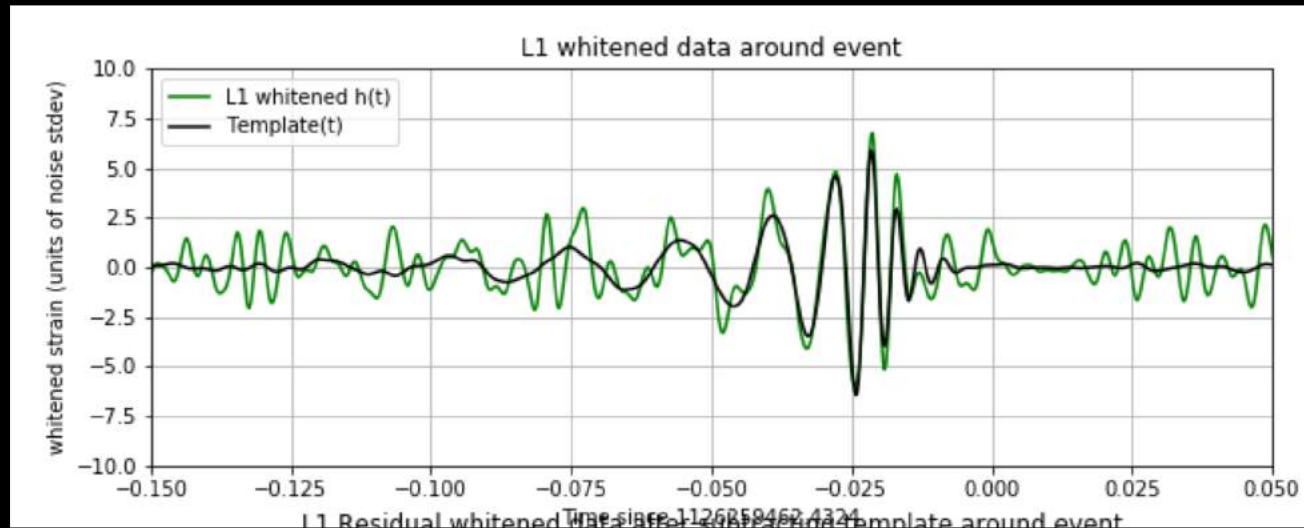
$$SNR_{L1} \cong 13!$$

Data vs Template

Hanford



Livingston



4. Data Analysis②

~Searching for after event~

4.1 Purpose

連星の合体後にさらなる重力波はあるか

(A)連星中性子星

→**超大質量中性子星**からの重力波？

(B)連星ブラックホール

→firewallによる**エコー**重力波？

⇒上記2事象について同様の解析で検証

Gravitational Wave

2017年8月17日観測

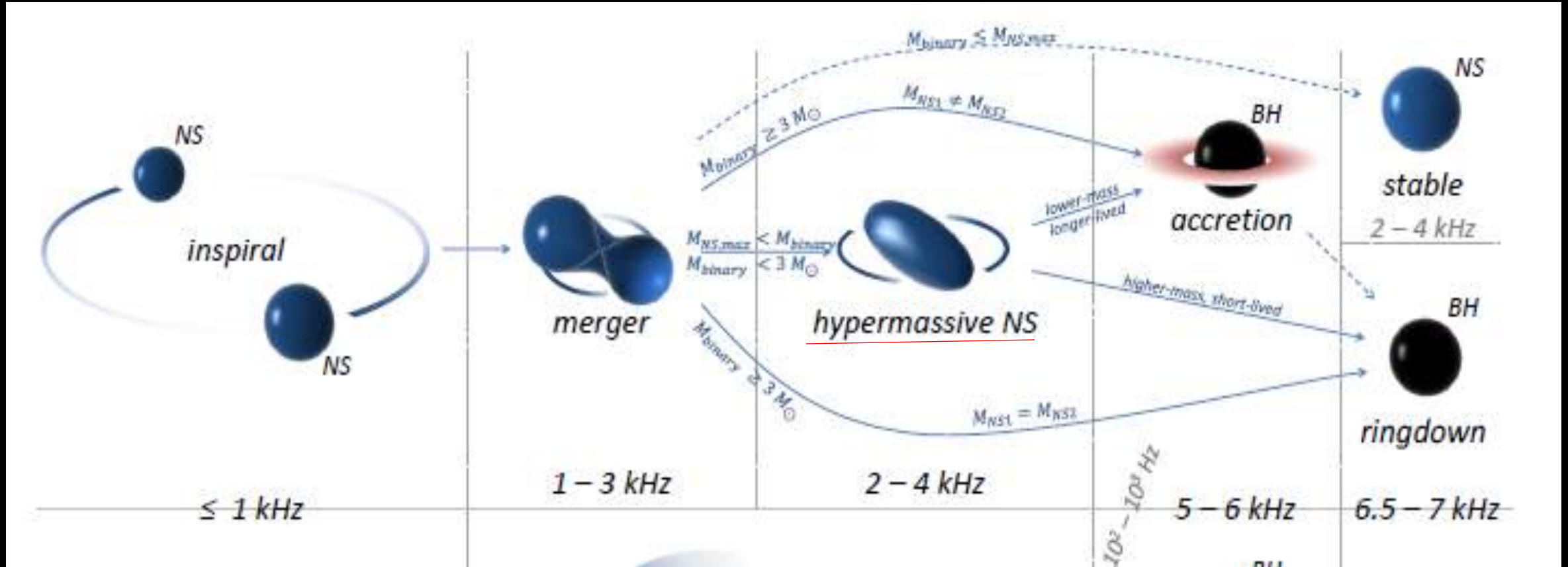
GW170817

イベント直後の超大質量中性子星からの重力波信号の探索

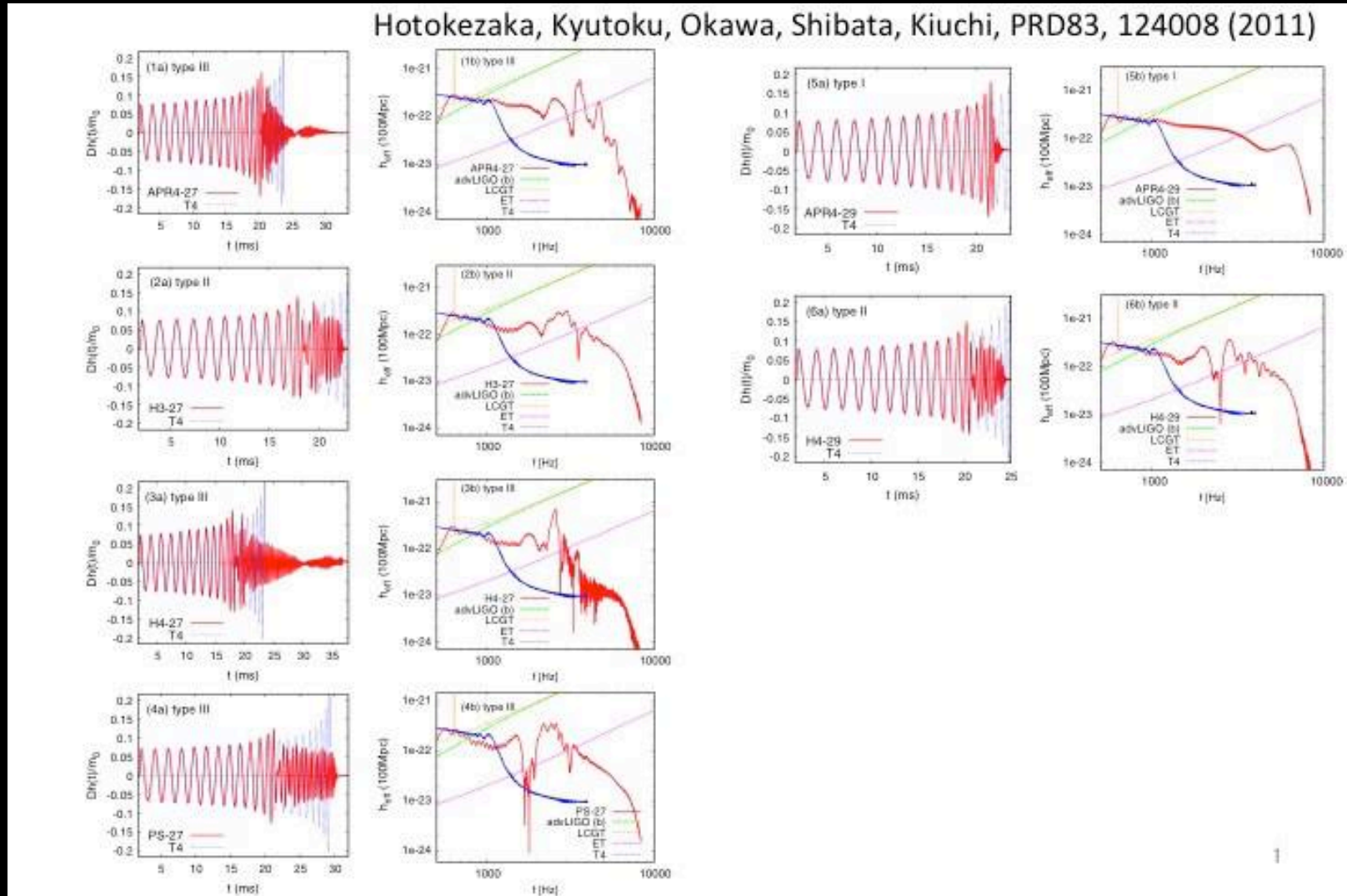
GW170817の特徴

- 合体後、重力波とともにShort- γ -ray-burstが観測された
- 合体後、r過程元素合成が起こった可能性

(A) 連星中性子星合体後の予測



(A) 超大質量中性子星による重力波の予測波形



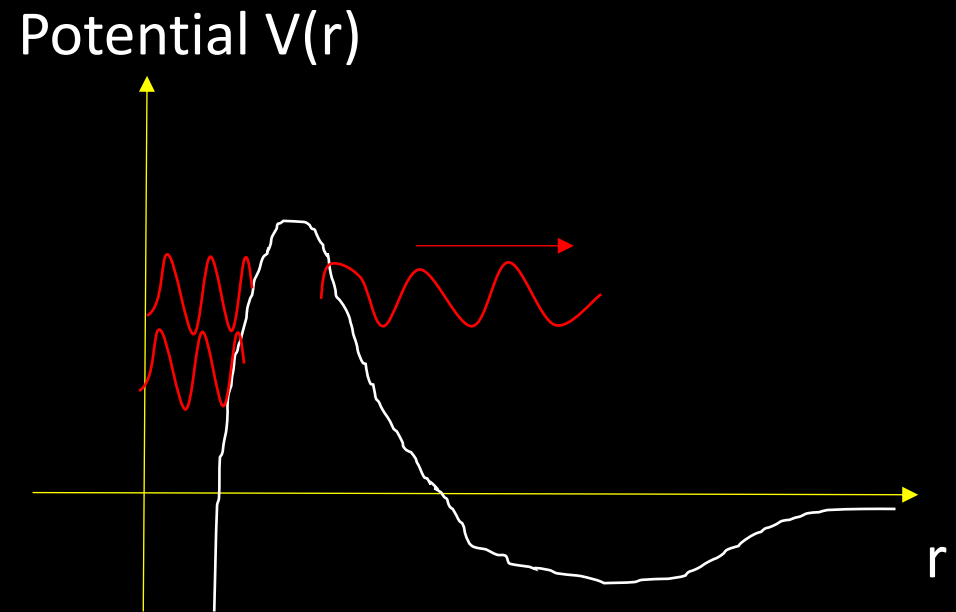
(B) 連星BH合体後の重力波エコーの探索

- ・BHのhorizonが**firewall**という壁のようになっているという可能性が提案

- ・連星BH合体後に発生してhorizonに吸収されるはずの重力波が壁によって反射

→horizonの外にあるpotentialとの間で何回も往復しながら徐々に遠方に抜け出ていく？

→**echo** !?



(B) Echo template

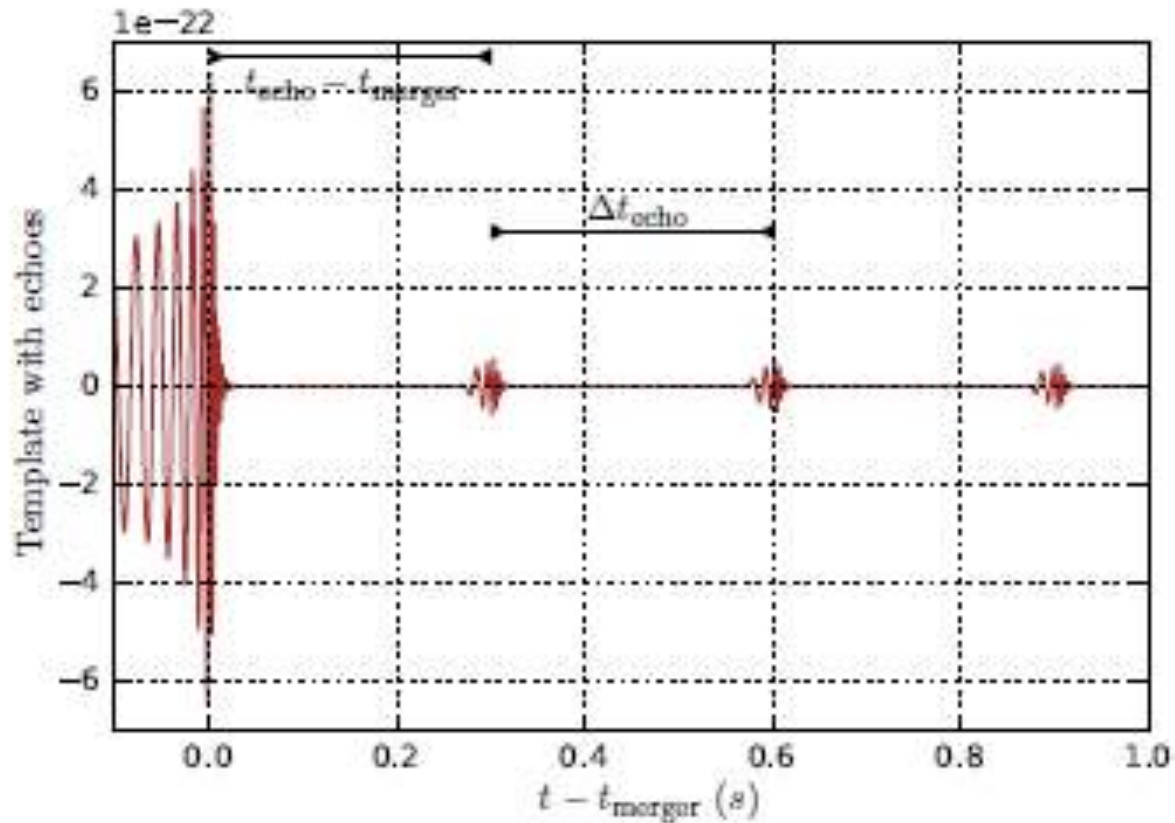


FIG. 2: LIGO original template for GW150914, along with our best fit template for the echoes.

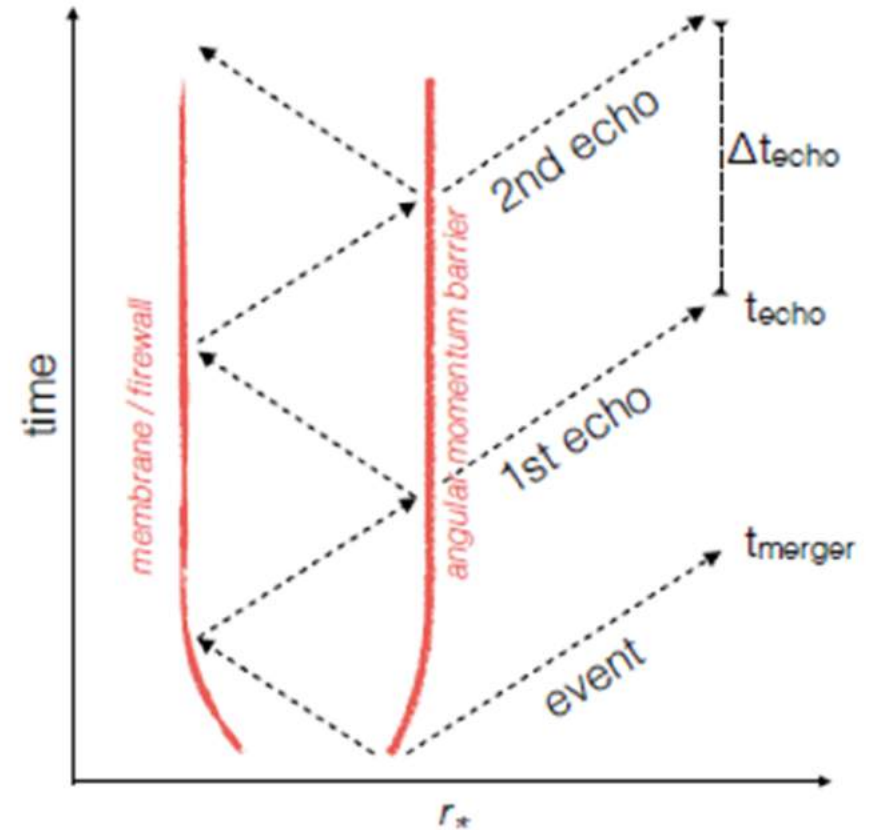


FIG. 1: Spacetime depiction of gravitational wave echoes from a membrane/firewall on the stretched horizon, following a black hole merger event.

4.2 Method

Livingstone、Hanford
二か所のデータを解析

方法

①LIGOの公開データを利用

ノイズによる分布を
調べたい

②合体直後のデータと重力波信号のないデータを取り出す。

③それぞれの周波数帯域を重力波信号の周波数領域にしぼる。

超大質量中性子星だと
重力波
2kHz~3kHz付近
の周波数

方法(続き)

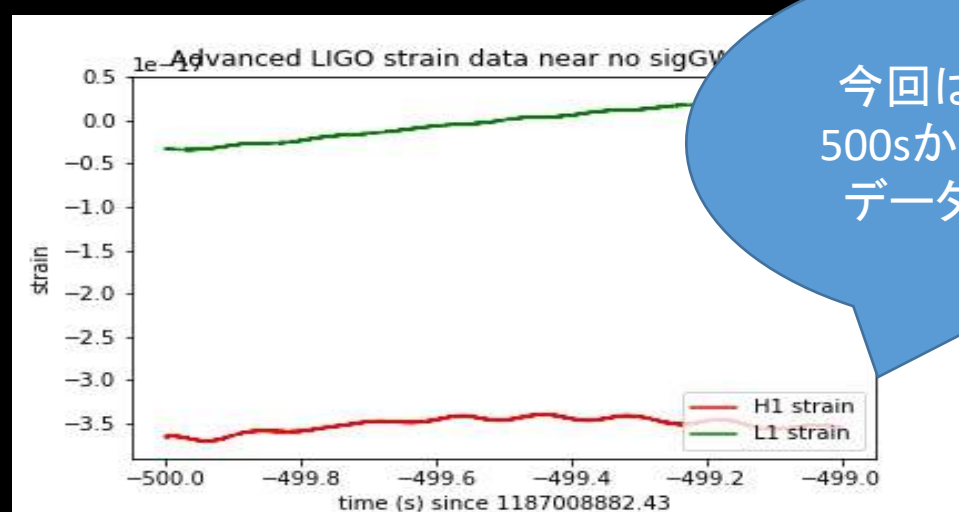
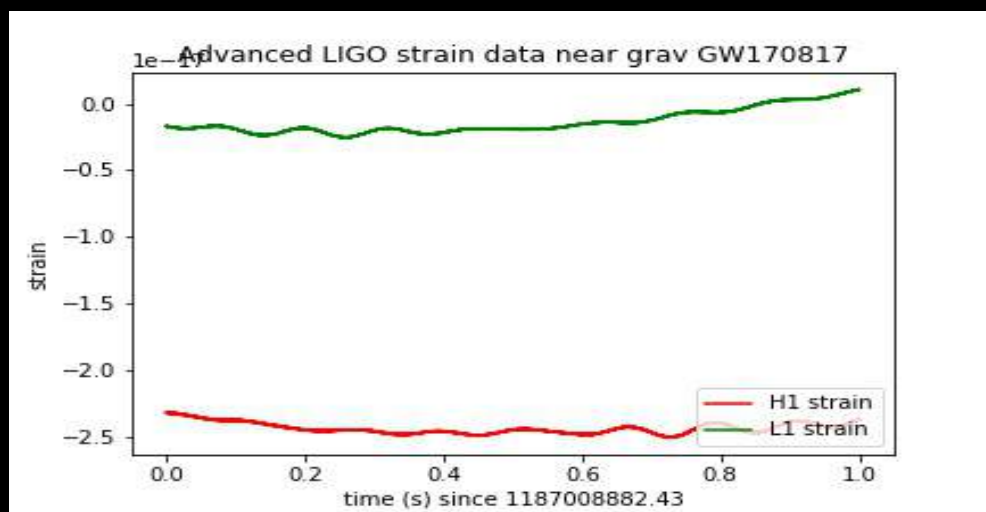
- ④データにwindow関数をかけてフーリエ変換
- ⑤合体直後のデータと重力波信号のないデータのP(信号強度)をもとめる。
- ⑥重力波信号なしのPのヒストグラムを作成し、重力波信号のPと比較し考察

① LIGOの公開データ

<https://losc.ligo.org/events/>

The screenshot shows the LIGO Open Science Center website. At the top, it says "LIGO LIGO Open Science Center" and "LIGO is operated by California Institute of Technology and Massachusetts Institute of Technology and supported by the U.S. National Science Foundation." Below this, there is a navigation menu on the left with items like "Getting Started", "Data", "Events", "Bulk Data", "Tutorials", "Software", "Detector Status", "Timelines", "My Sources", "GPS -- UTC", "About the detectors", "Projects", and "Acknowledge LOSC". The main content area is titled "Data Releases for Observed Transients" and "Data Releases: Compact Object Mergers". It says "Click icons below for data and documentation:" and shows seven icons for different gravitational wave events: GW150914, LVT151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814, and GW170817. Below this, there is a section for "Audio files" with a link to "Listen to audio files from LIGO detections." and a section for "Rapid Triggers from LIGO Data" with a list of event IDs: GW150914, LVT151012, GW151226, GW170104, GW170608, GW170814, and GW170817.

② 合体直後のデータと重力波信号のないデータを取り出す



今回はteventから
500sから1000s前の
データから1秒間

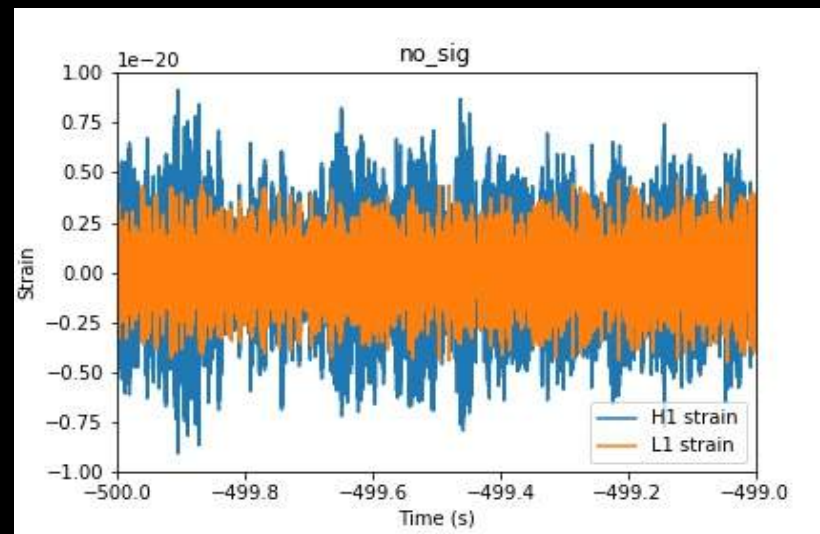
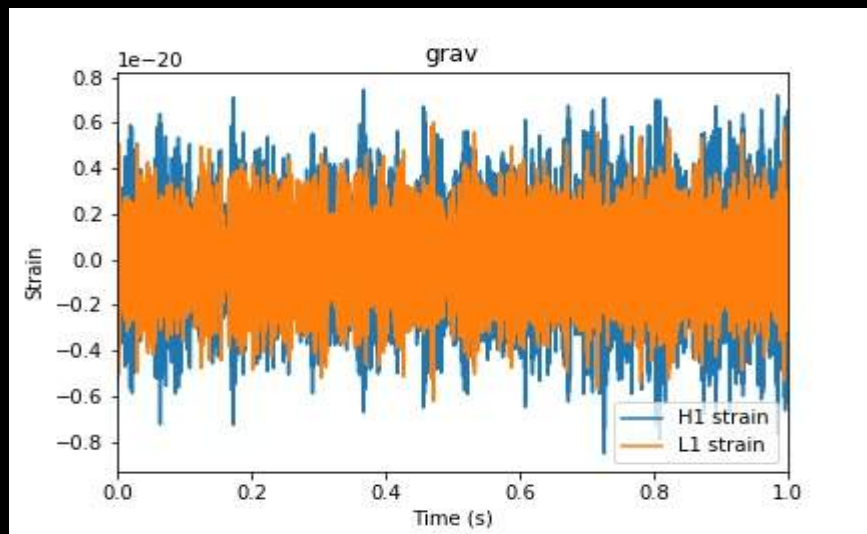
③それぞれの周波数帯域を重力波信号の周波数領域にしぼる。

→バンドパスフィルター

今回は、(1)1500～2500Hz

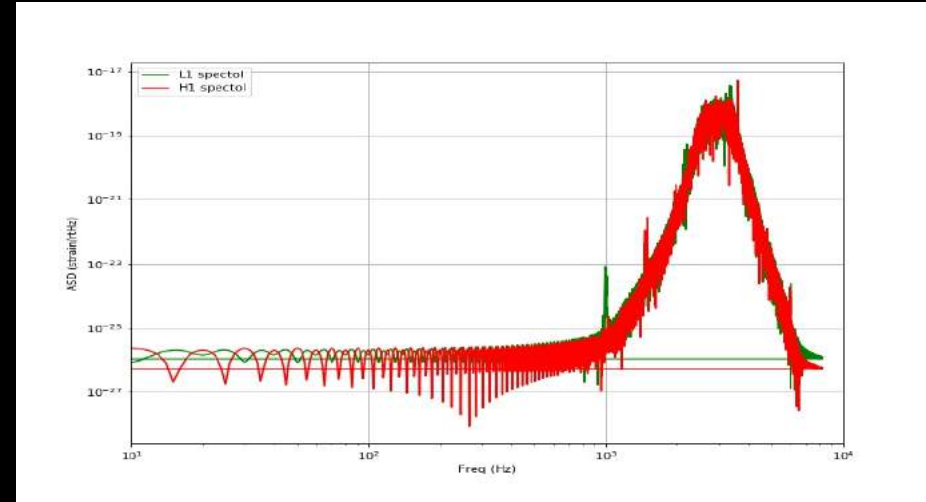
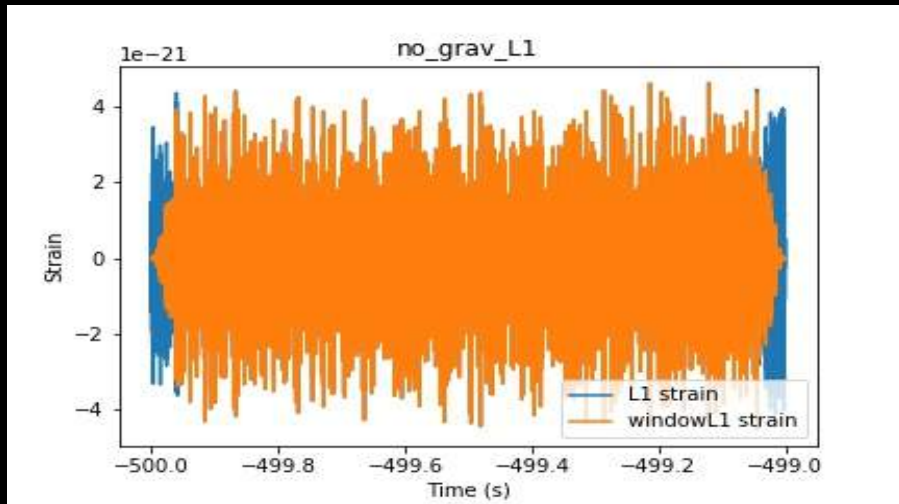
(2)2500～3500Hz

の2つの周波数帯域を解析。



④ **window関数**をかけてデータをフーリエ変換
window関数をかけることでより正確なスペクトルが
得られる。

$$\rightarrow y_k = \sum_{j=0}^{N-1} X_j \cdot e^{-2\pi i j k / N}$$



⑤ 合体直後と重力波信号なしの**P(信号強度)**をもとめる。

$$\rightarrow P = \sum_k |y_k|^2$$

⑥重力波信号なしのPのヒストグラムを作成し、重力波信号のPと比較し考察

→今とっているのは、teventから500s前のデータから1秒間

→ほかの時間からの1秒間のデータも集めてノイズの分布をつくる

→⑤でもとめた合体直後のPと比較

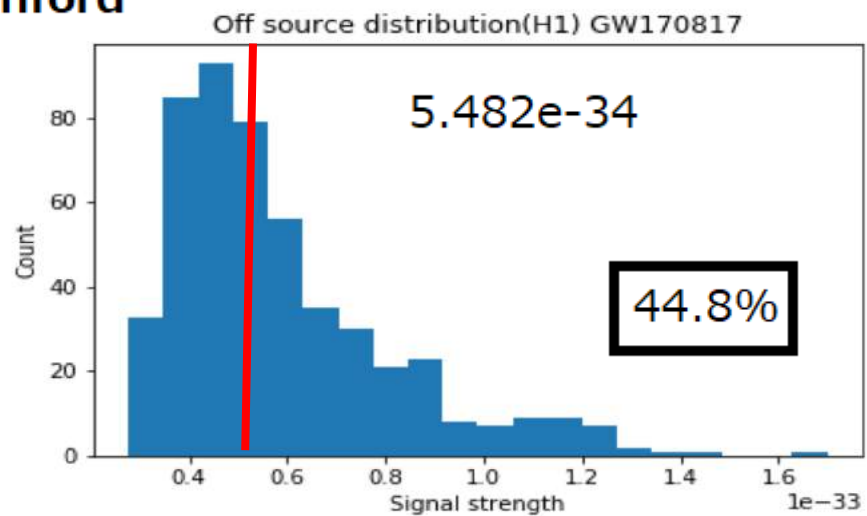
4.3 Result

(A)連星中性子星合体直後の信号

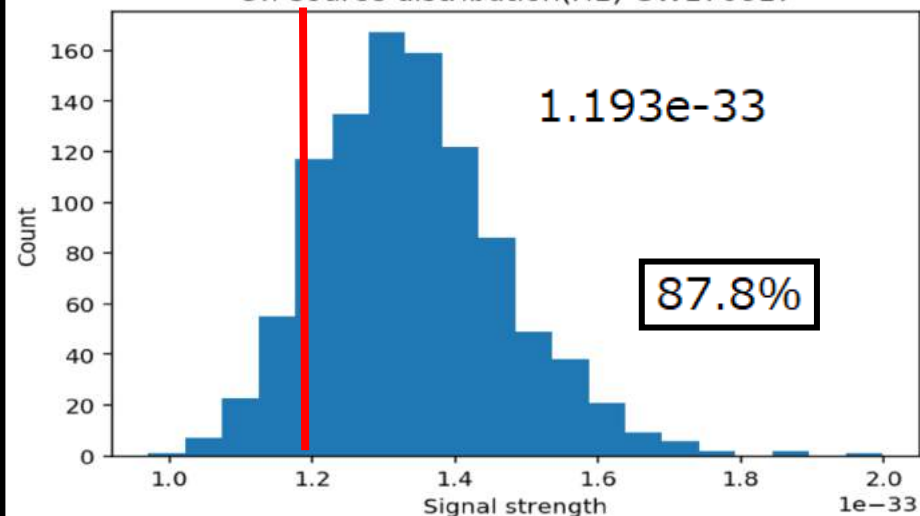
1500~2500Hz

2500~3500Hz

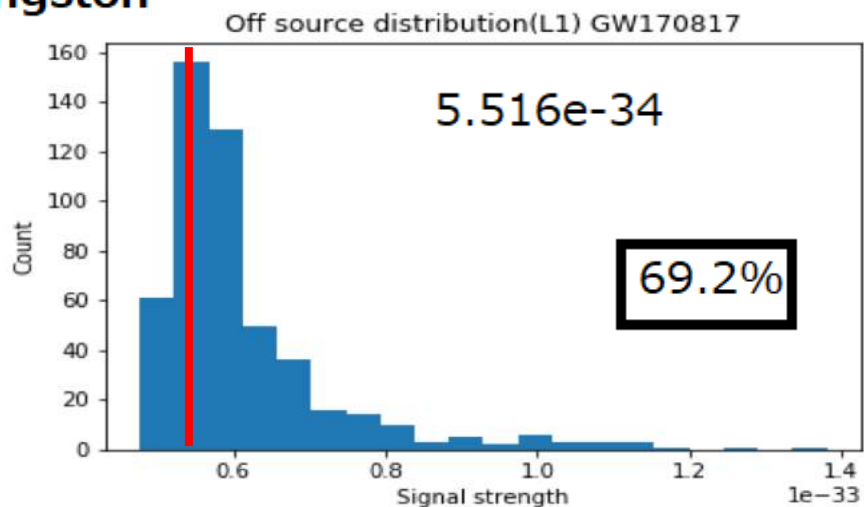
Hanford



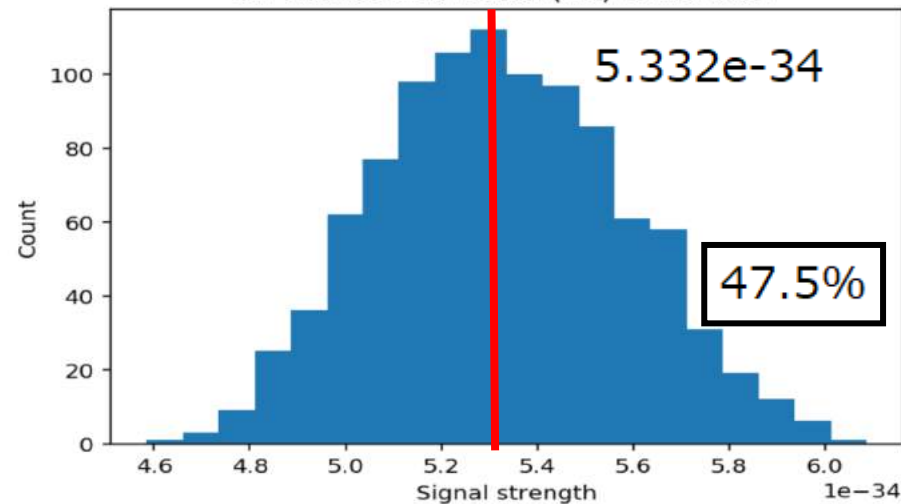
Off source distribution(H1) GW170817



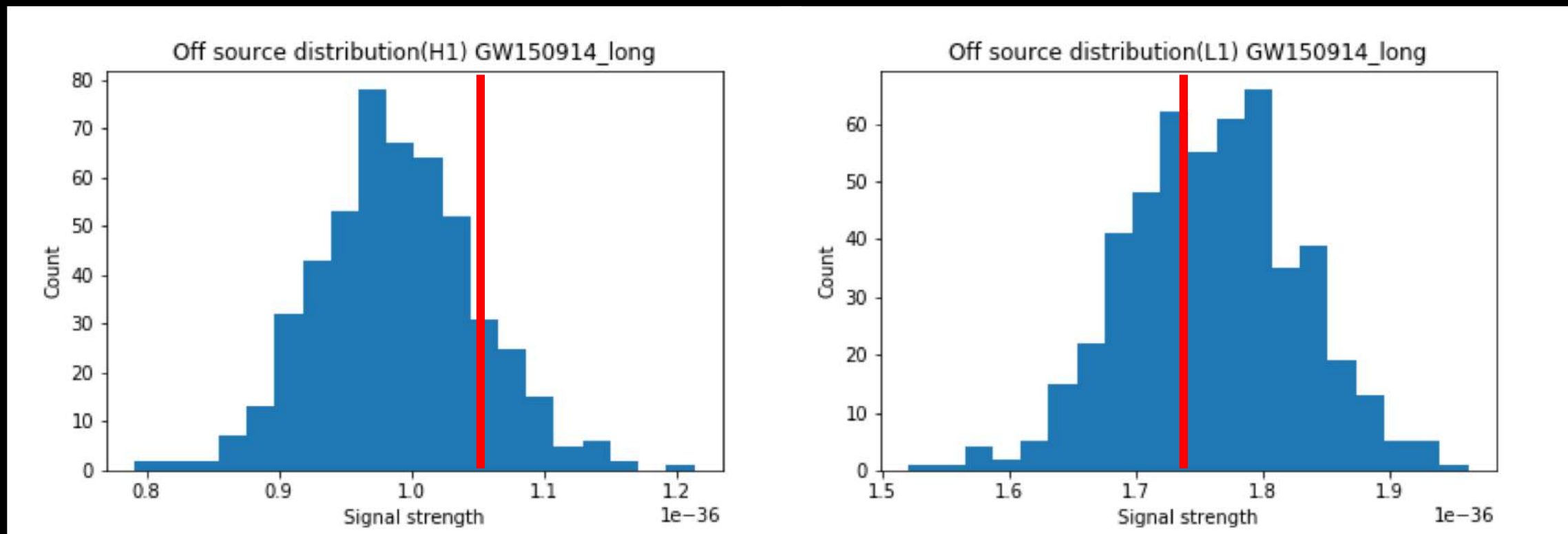
Livingston



Off source distribution(L1) GW170817



(B)Echo signal



→ノイズである確率 H1 : 12.6%、L1 : 68.4%

ノイズの可能性が高い

4.4 Discussion

- (A)超大質量中性子星からの重力波とみなせる信号は検出できなかった。

→今回検出された信号より大きい放射はないことがわかった

- (B)エコー信号もノイズの可能性が高い

5. Conclusion

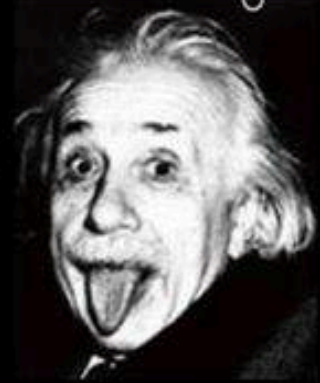
まとめ

- ・マイケルソン干渉計を作製し、重力波検出の原理を体験した。
- ・LIGOのデータを用いて、データ解析の一連の流れを理解した。
- ・今回の解析では、連星中性子星合体直後の信号に超大質量中性子星重力波とみなせる信号は見つからなかった。
- ・BHのfirewallからのecho信号は見つからなかった。

学べば学ぶほど、

自分がどれだけ無知であるか
思い知らされる。

自分の無知に



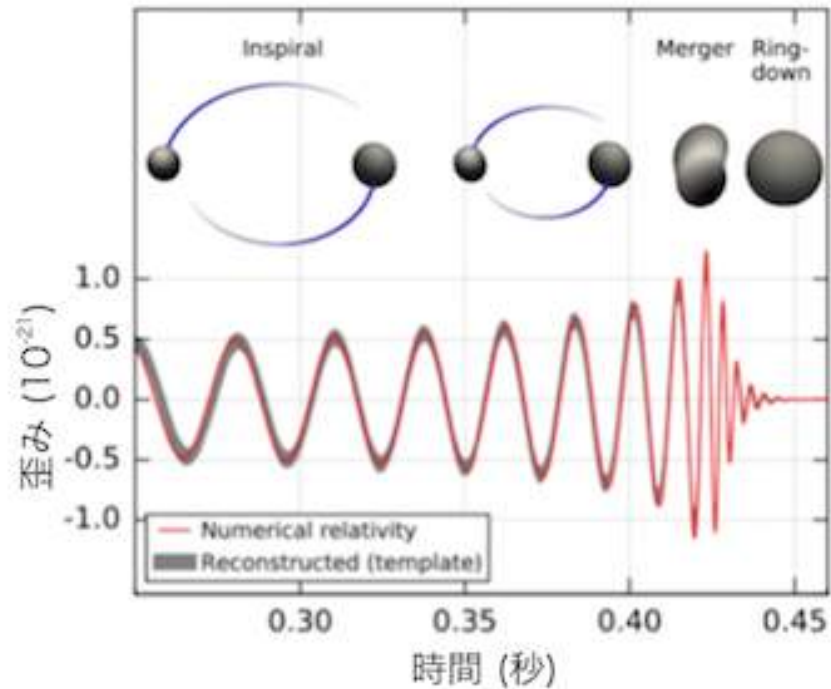
気づけば気づくほど、

より一層学びたくなる。

アインシュタイン

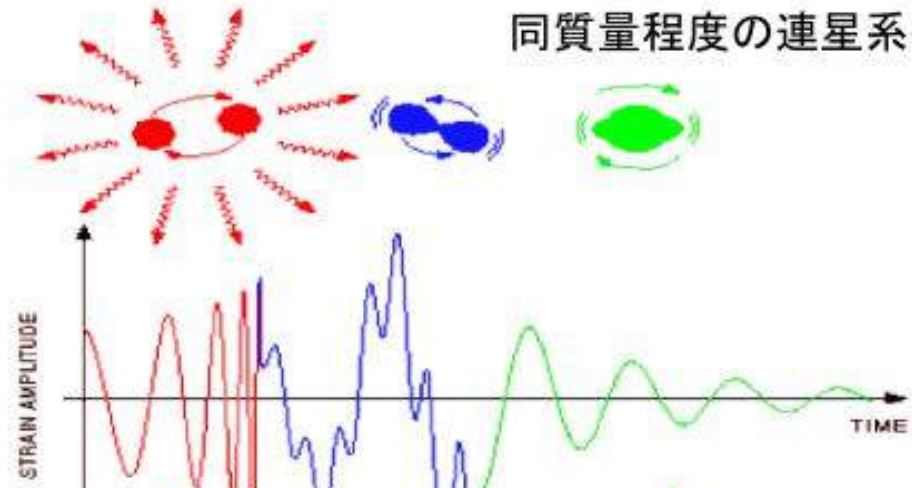
ご清聴ありがとうございました。

質問用



重力波波形の解析法

同質量程度の連星系の場合



Inspiral phase :
ポストニュートン法
(v/c) で展開

merging phase :
数値相対論

Einstein eq.を数値的に解く。
非線形の効果が必要な場合

ringdown phase :
ブラックホール擾動法
中心BHの重力場が支配的
(背景時空) + (摂動)