

重力波天文学

小形 美沙 木村 和貴 鈴木 雄大 村上 耕太郎 山下一彬

Superviser
川村 静児先生

TA

伊藤 洋介先生

苔山 圭以子先生

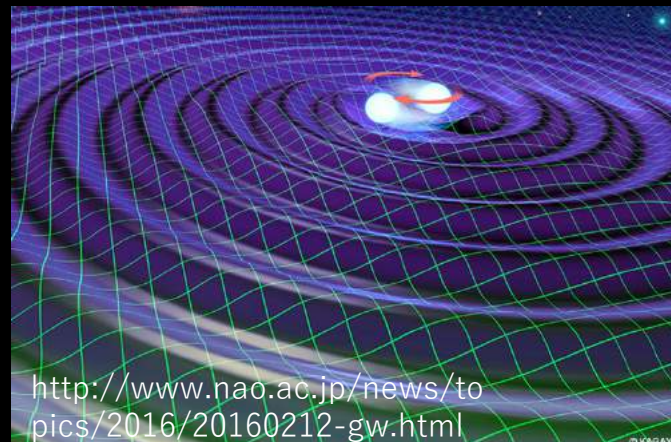
桐井 真さん

重力波とは

加速度運動をする質量によって生じる時空のゆがみが横波として伝わっていく現象。

天体現象から発生する重力波は、その現象に特有の情報を持っており、電磁波や宇宙線では見えなかった様々な情報を取り出すことができる。

特に初期宇宙に関しては、宇宙誕生の瞬間まで直接観測することが可能である。



We did it!!

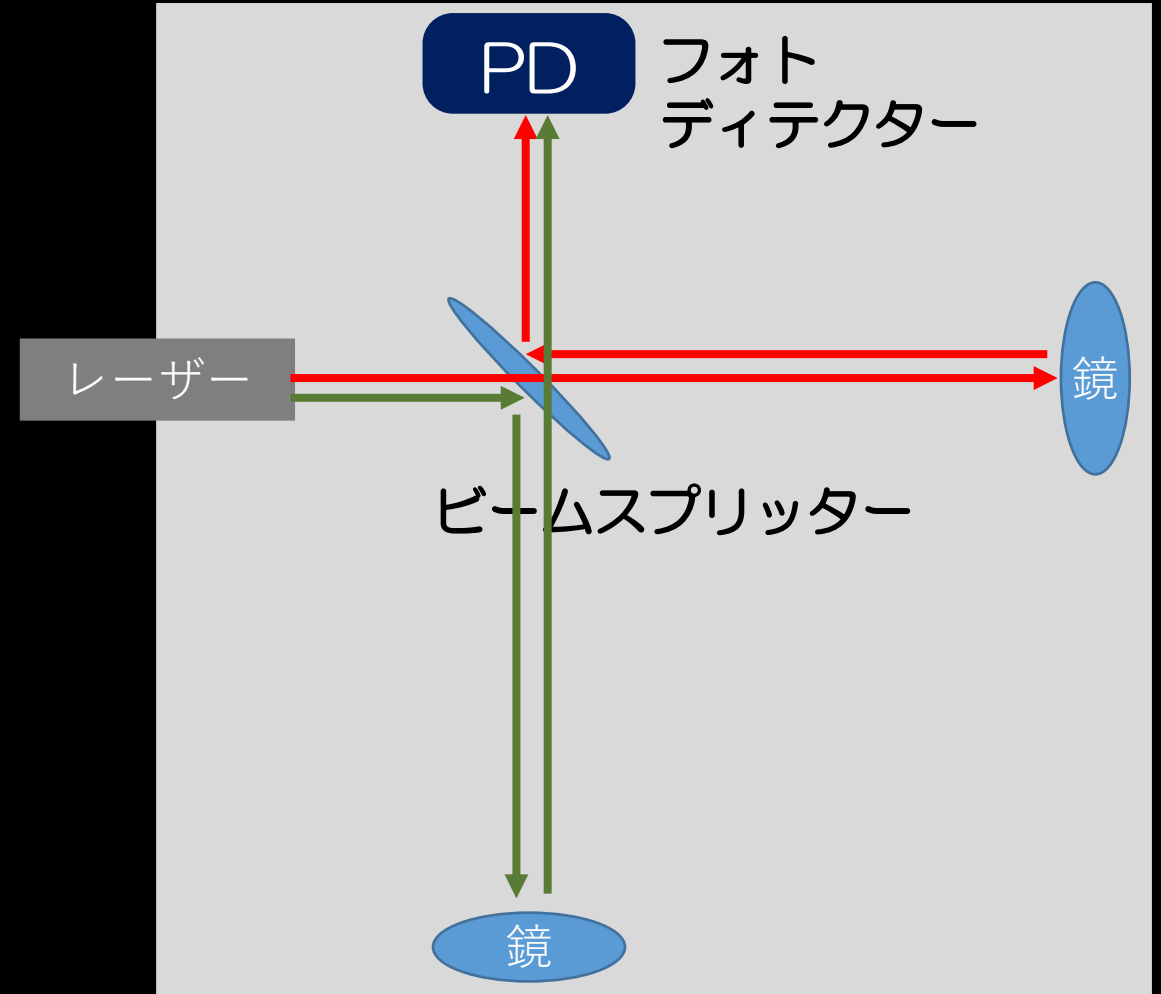
<http://blogs.yahoo.co.jp/ddogs38/39818602.html>

レーザー干渉計

重力波が到達すると空間が伸縮する



経路差が生まれ、PD上に明暗の差が出現



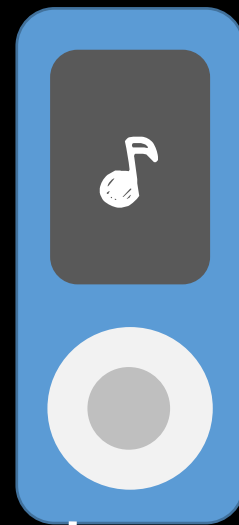
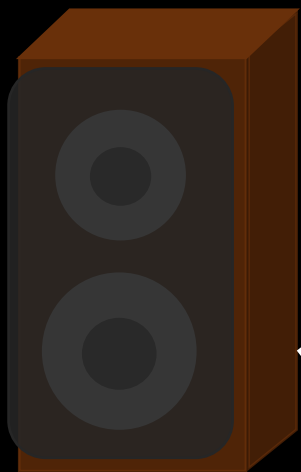
今回の内容

1. 重力波検出計の詳しい原理

実際にミニサイズのものを1人1台ずつ作成

2. データ解析

“あの” LIGOのデータの解析

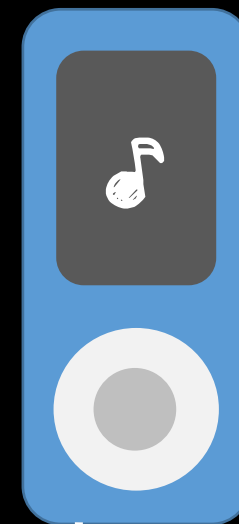
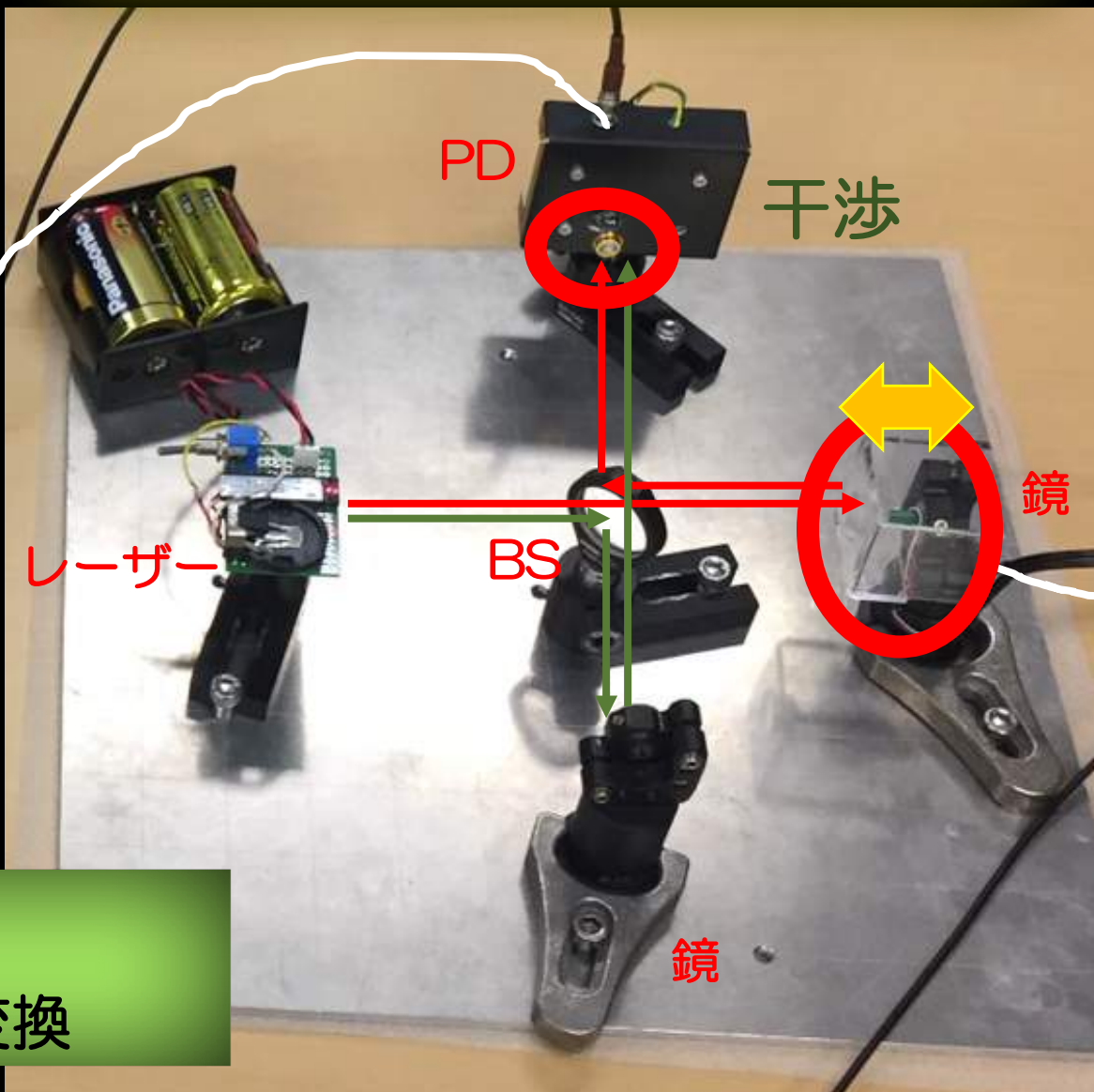
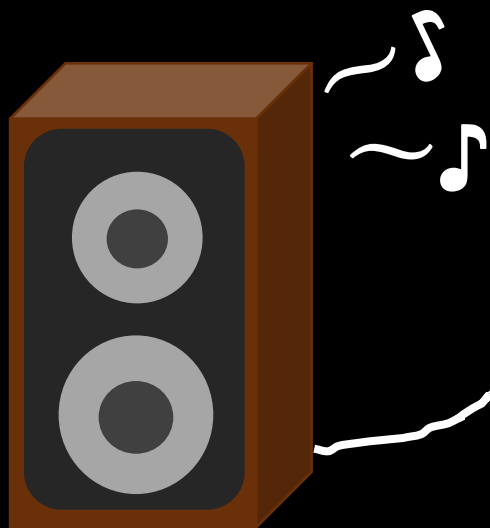


素子

に変換

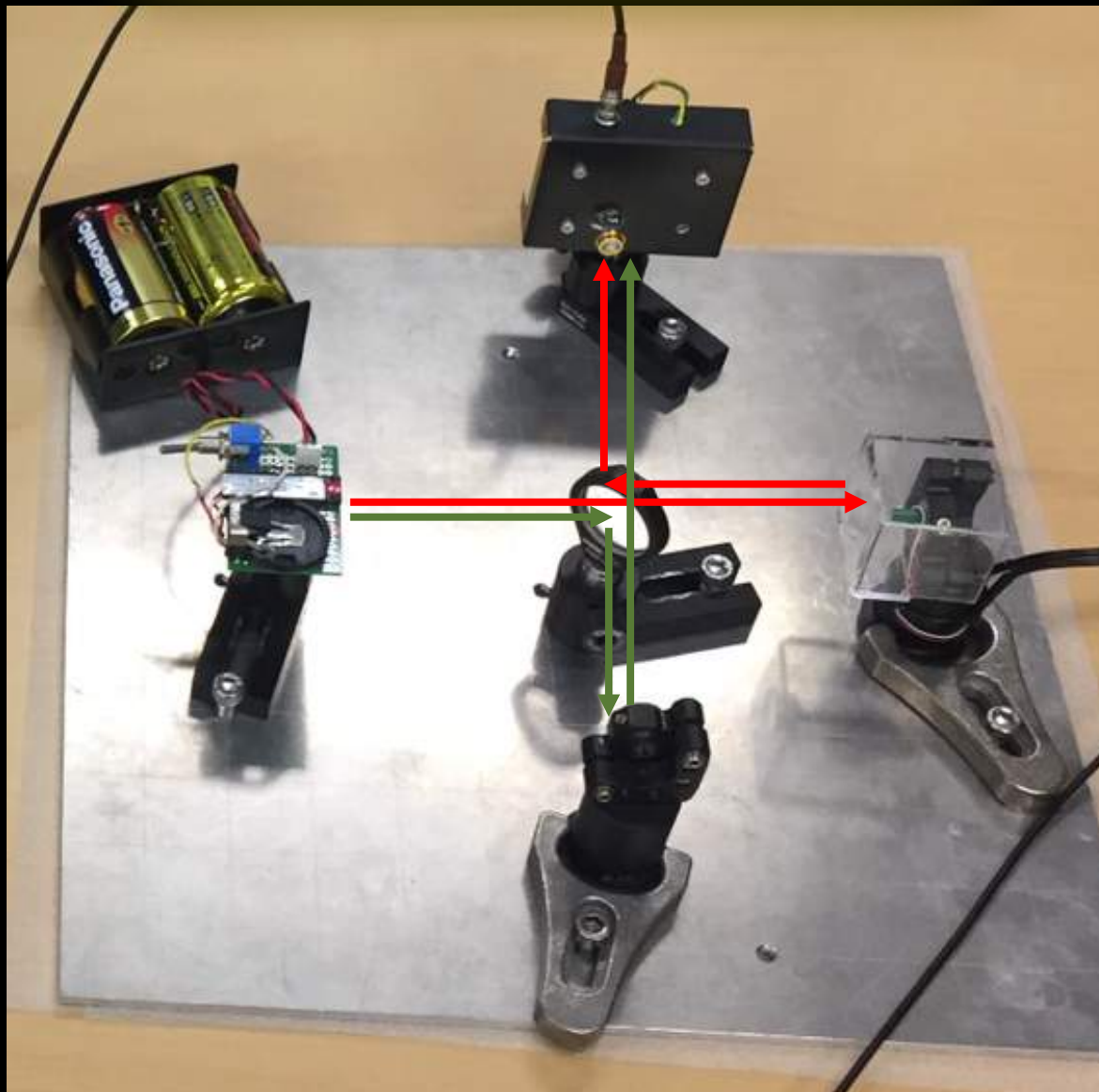
変えることも可能)

干渉計の仕組み

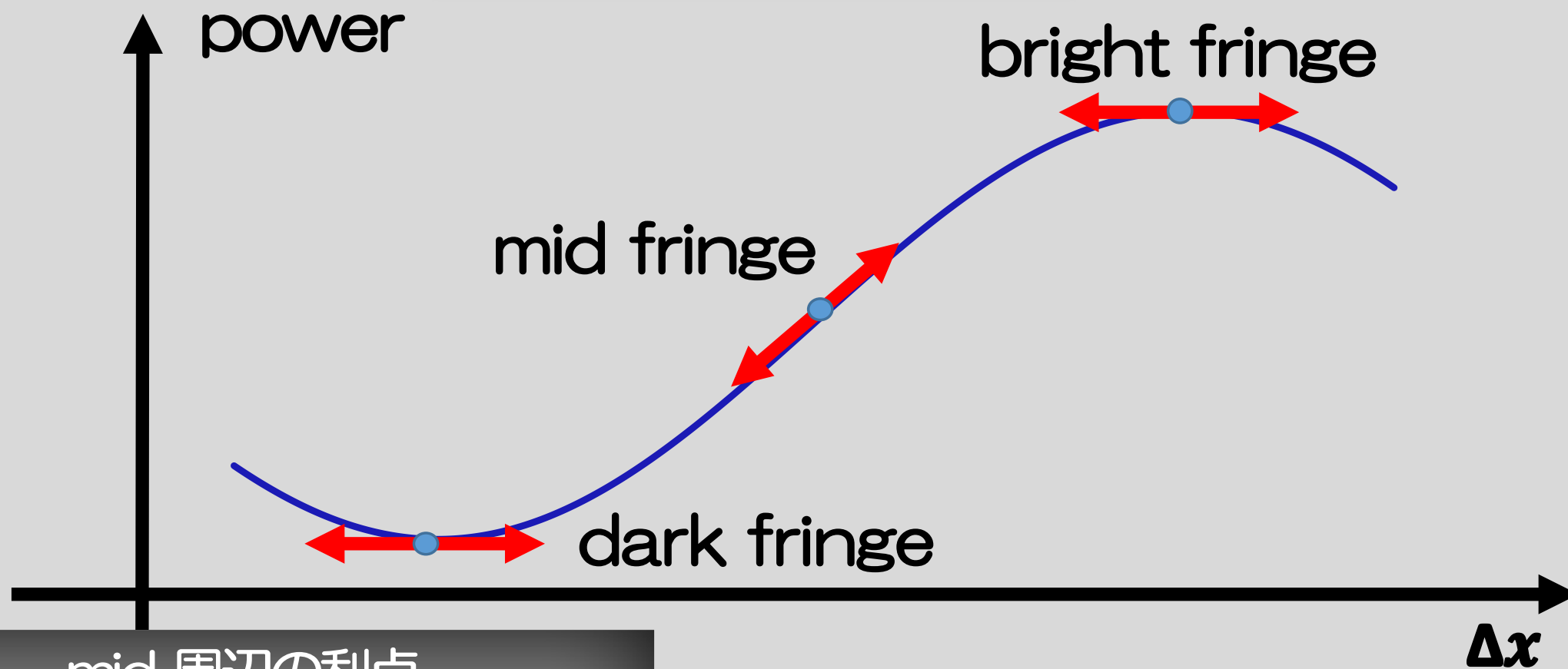


圧電素子
電圧を変位に変換

干渉計の出力



干渉計の出力

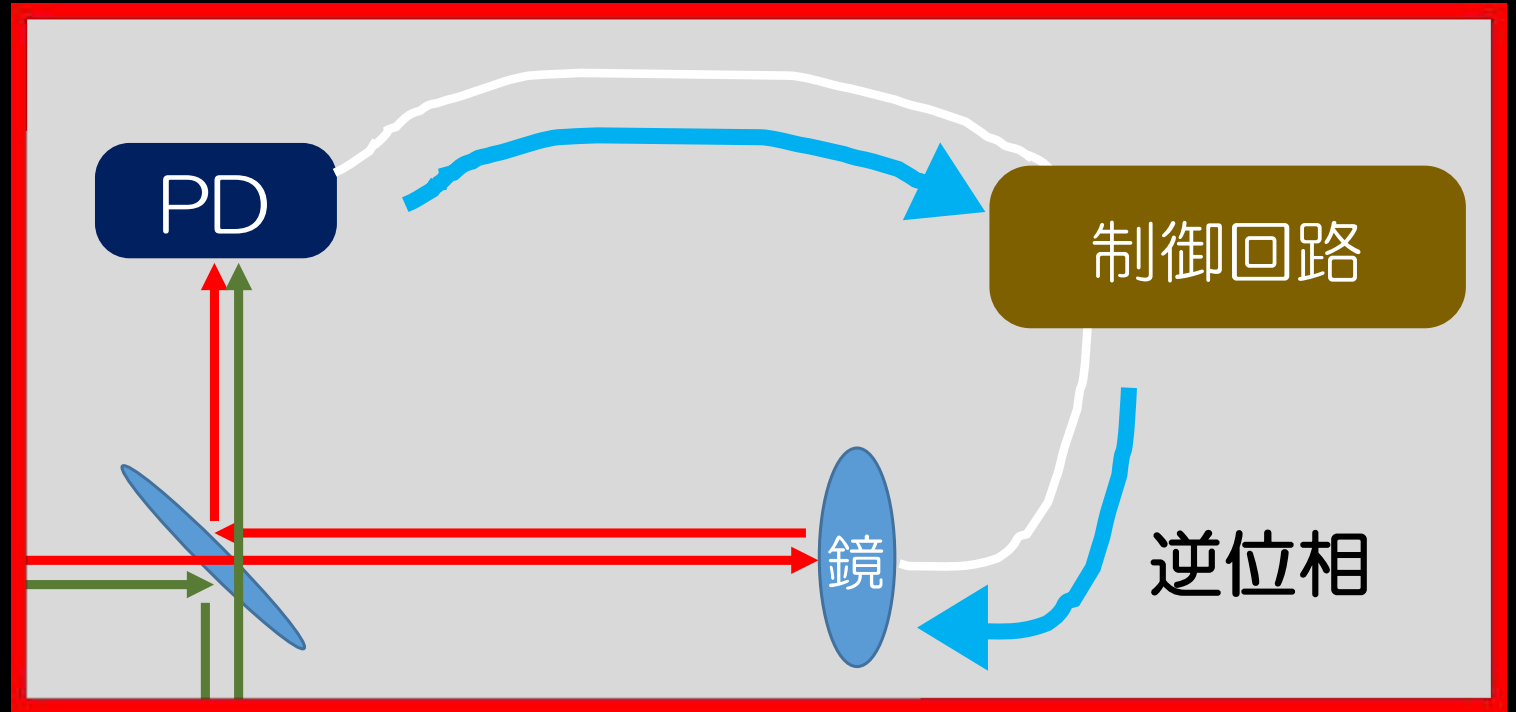


mid 周辺の利点

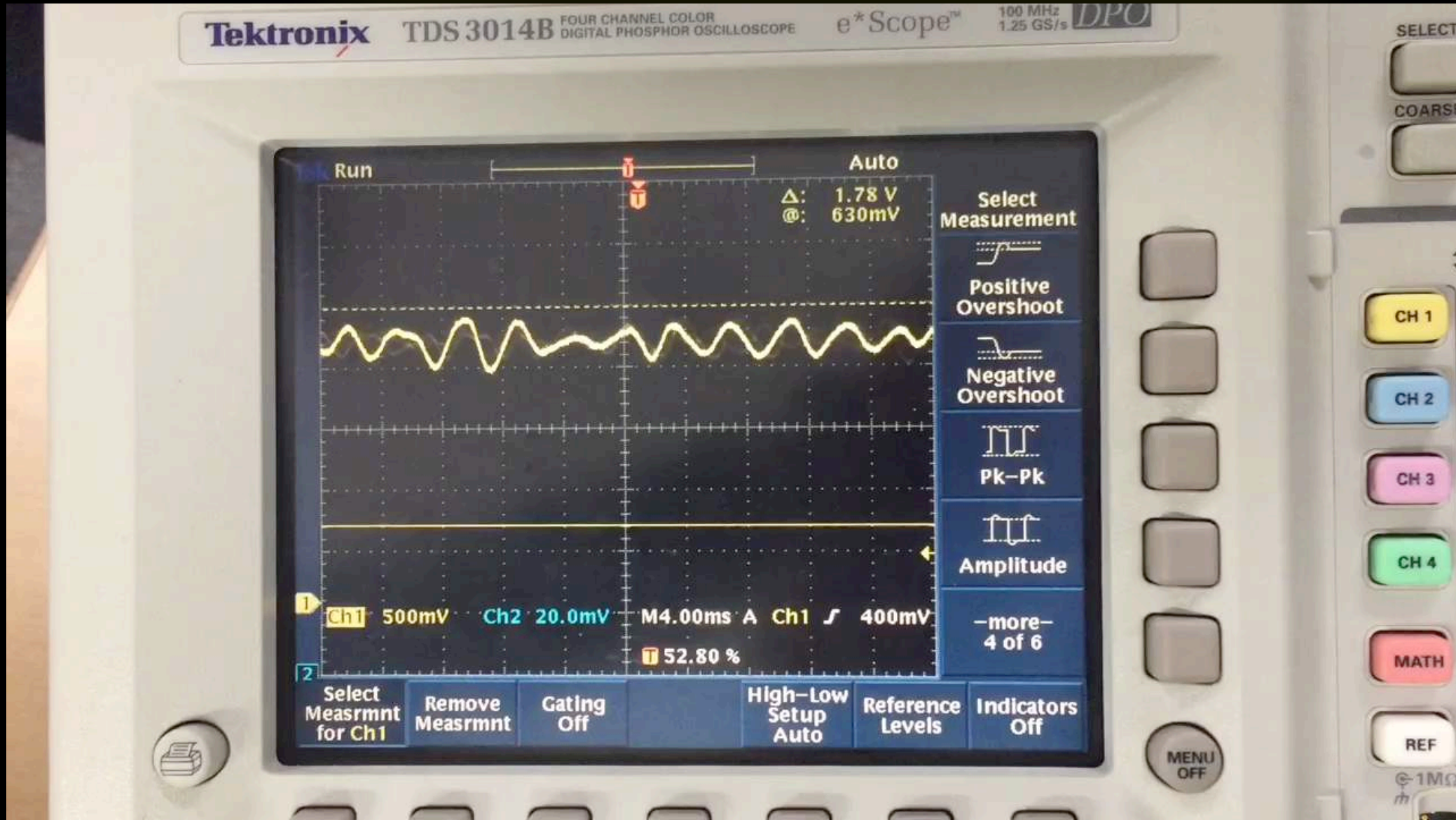
- 少しの変位で大きな出力
- 線形 etc.

フィードバック制御

PD
↓
制御回路
(LPF、逆位相、オフセット)
↓
mid fringe にロック



フィードバック制御

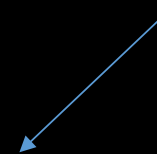
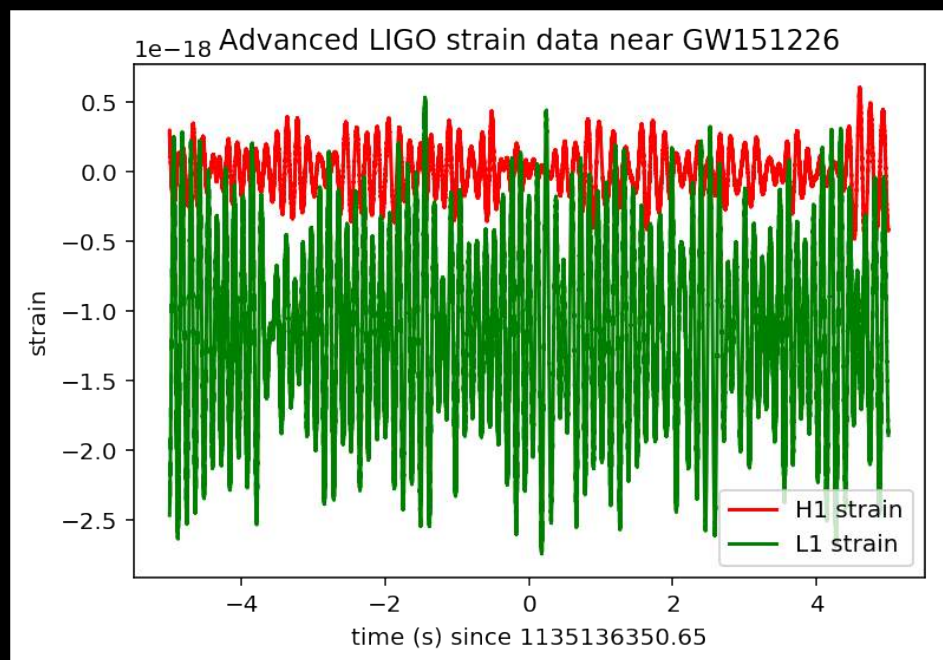


実際のレーザー干渉計

- 多段振り子で上から吊るされている
→ ほぼ自由質点とみなせる
- フィードバック制御機構はピエゾ素子ではない
→ KAGRAの場合は Coil Magnet Actuator
- mid ではなく dark の部分にロックしている
→ ショットノイズの 信号雑音比(SNR)が良くなる

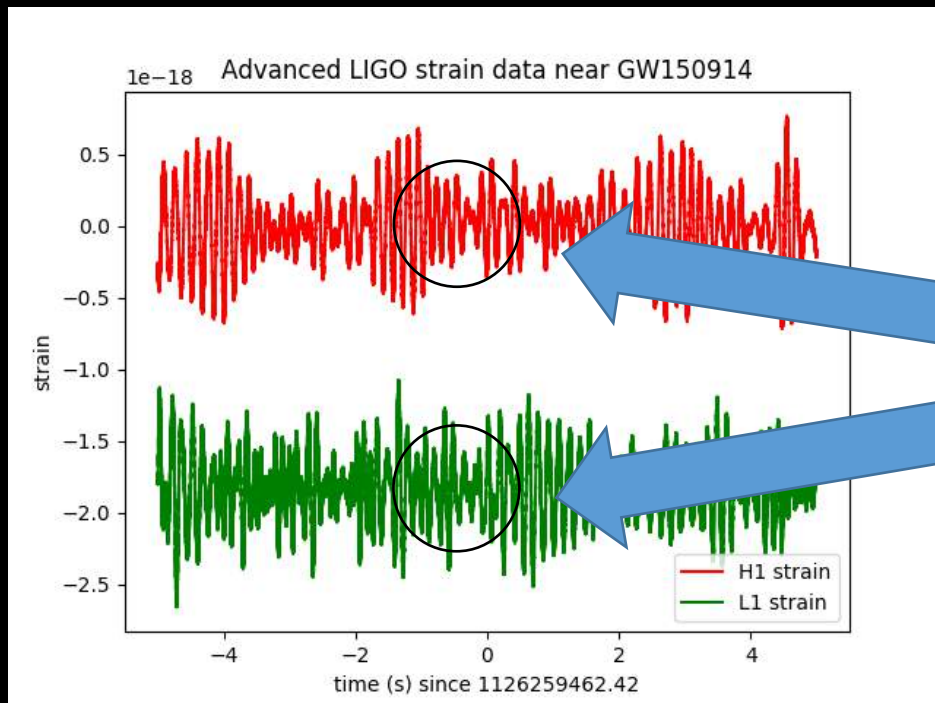
データ解析

- マッチドフィルタについて
- 実際のLIGOのデータ



データ解析の手法

2015年9月14日にLIGOで出力されたデータ



ここに重力波の信号
があるはず！

実際のデータでは重力波のデータはノイズ
に埋もれて見えない。

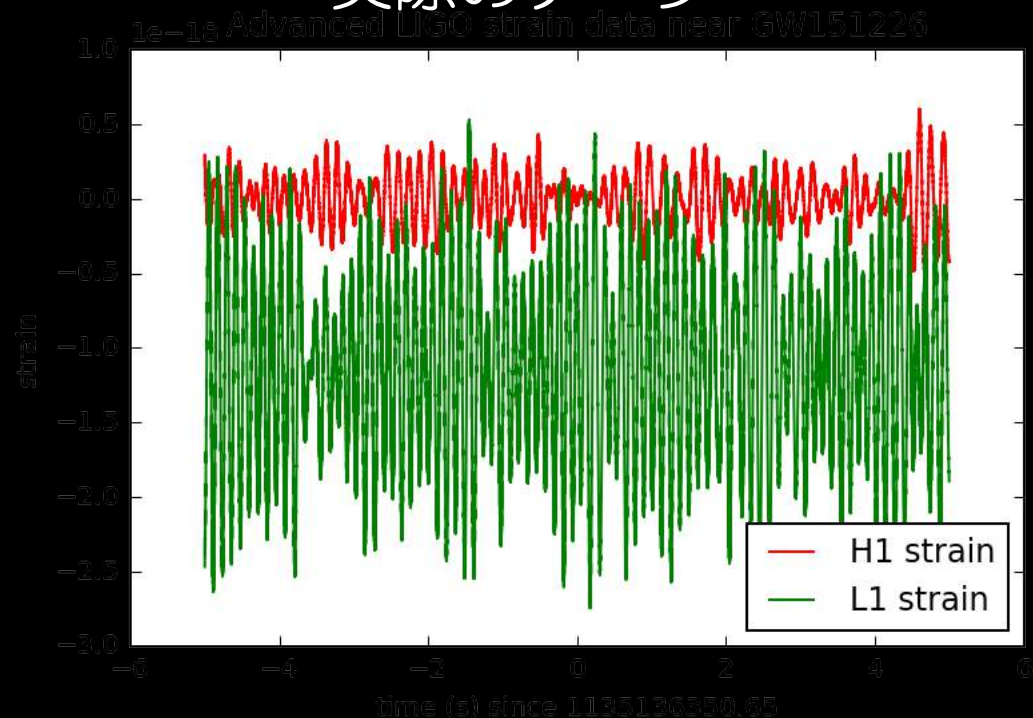
どのようにして重力波の波形を見つけるのか？？

マッチトフィルターという手法で波形を見つける。

マッチトフィルターとは？

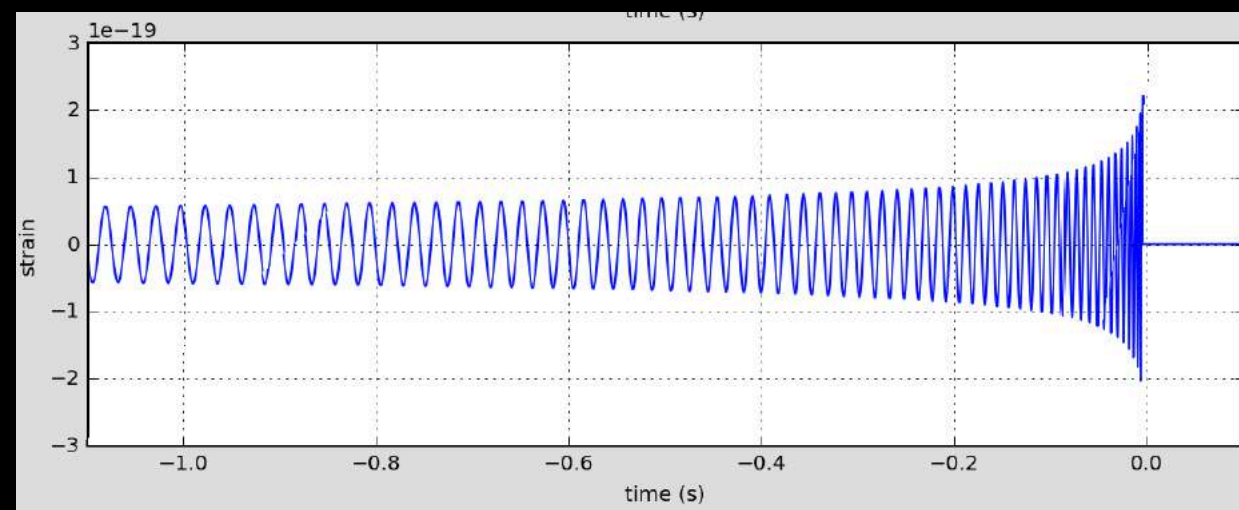
実際のデータと予測波形の相関を取る

実際のデータ



×

一般相対論から計算される予測波形



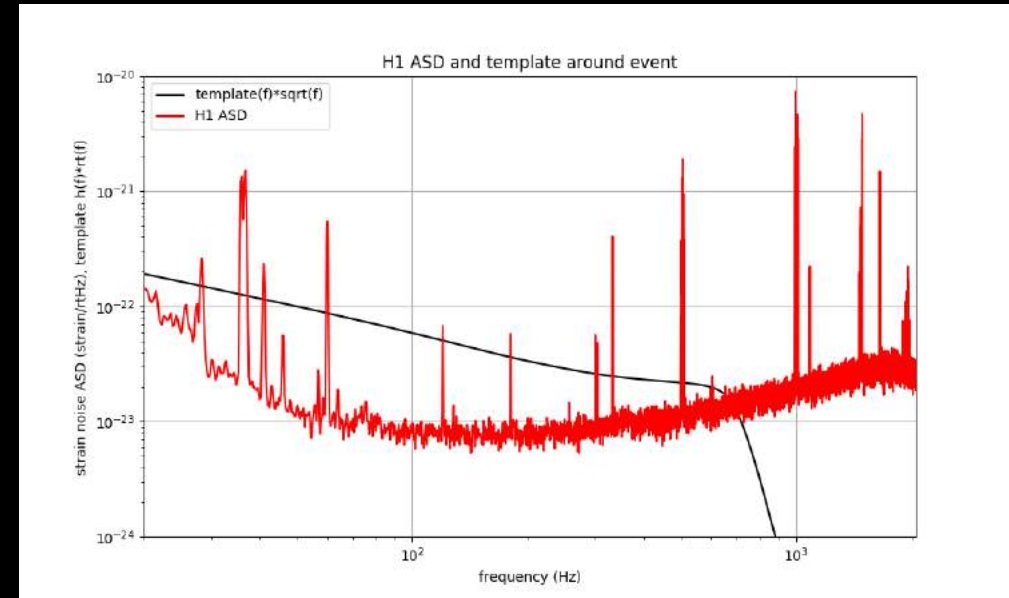
マッチトフィルターとは？

相関関数

$$\langle s | h \rangle (t) = 4 \int_0^\infty \frac{\tilde{s}(f) \tilde{h}^*(f)}{S_n(f)} e^{2\pi i f t} df$$

$\tilde{s}(f)$: 測定値のフーリエ変換

$\tilde{h}(f)$: 理論値のフーリエ変換 (右図の黒線)



さらに、相関関数から信号雑音比 SNR(signal-to-noise ratio)を求める。

ある値以上の SNRが出ると重力波イベントの候補となる。

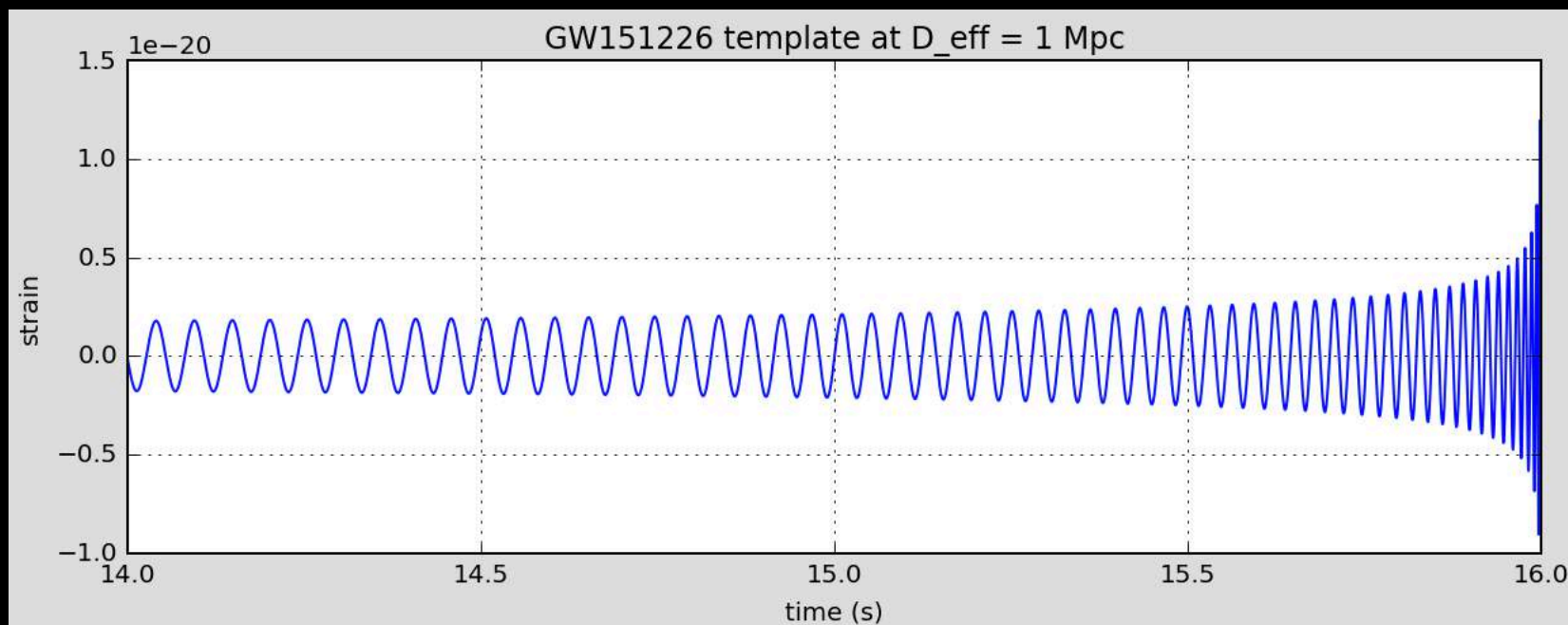
マッチトフィルター

デモンストレーション

LIGOの重力波を検出していないデータに、自分達で作った重力波の波形を組み込んで、マッチトフィルターによってその波形を検出する。

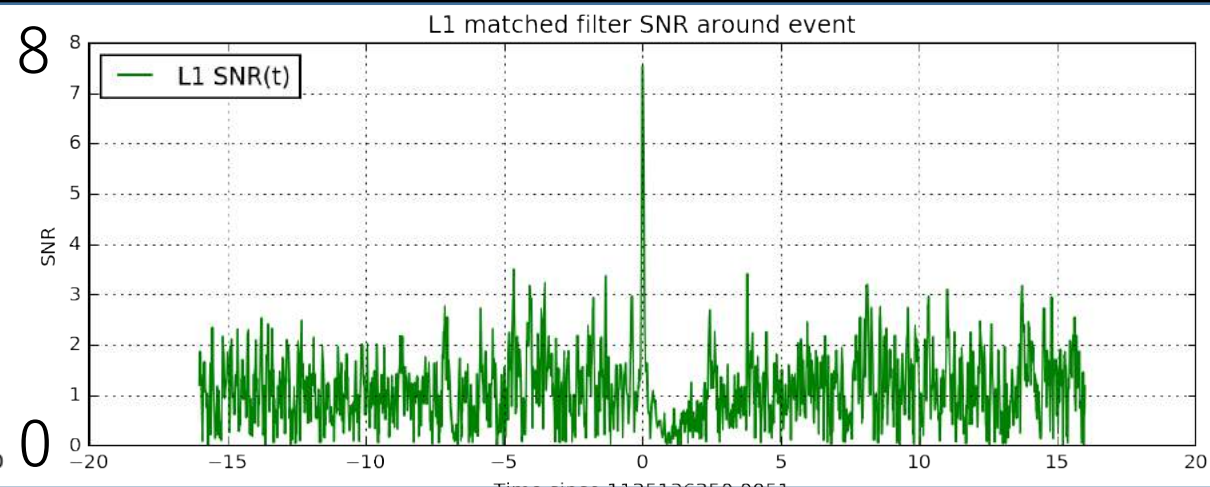
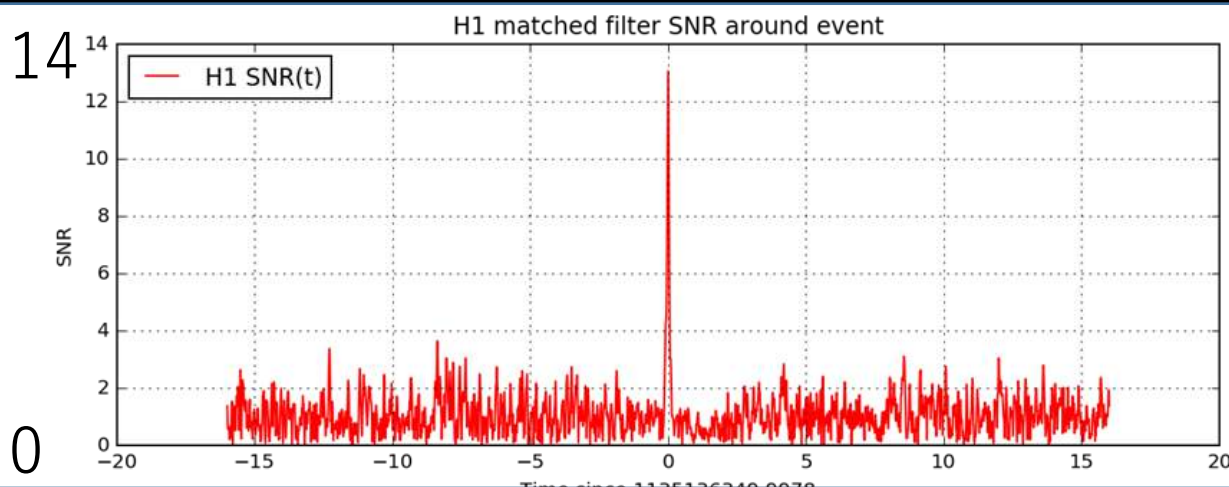
入力する重力波

$m_1 = 20M_{\odot}$ $m_2 = 6.7M_{\odot}$ のブラックホール連星合体の重力波

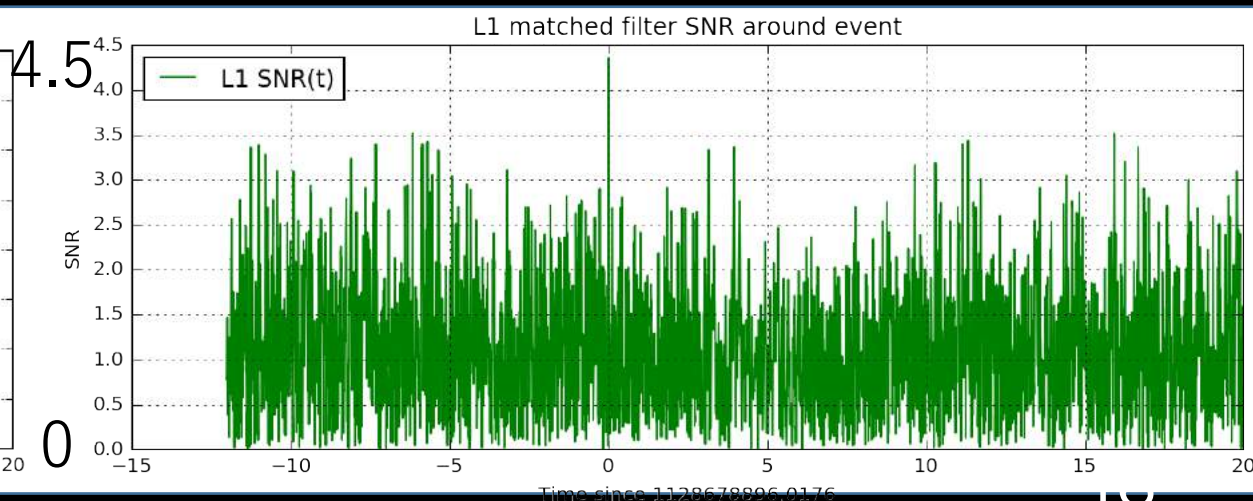
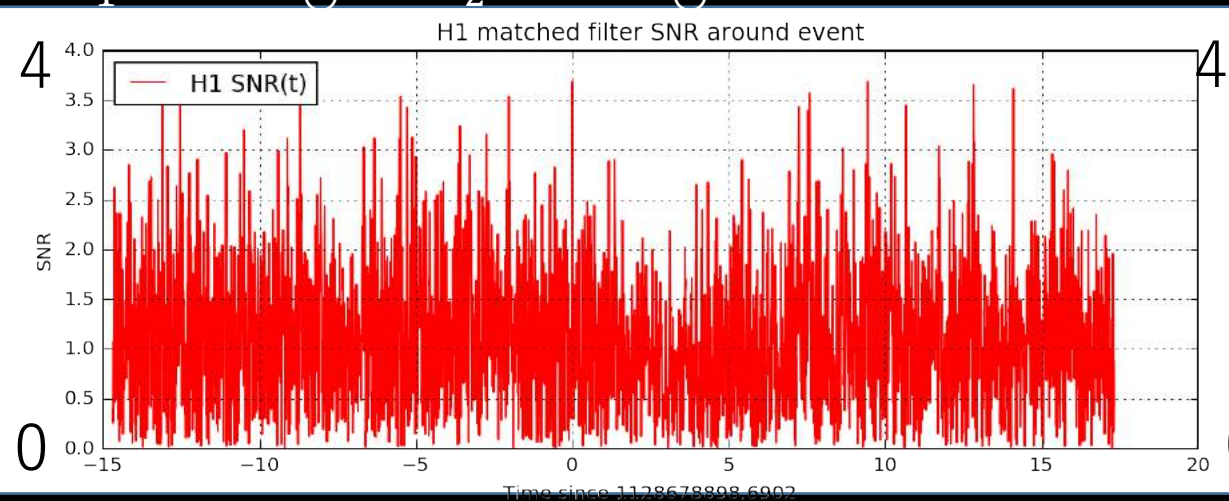


マッチトフィルター

$m_1 = 20M_\odot$ $m_2 = 6.7M_\odot$ の予測波形でマッチングした結果 SNR=14、7.6



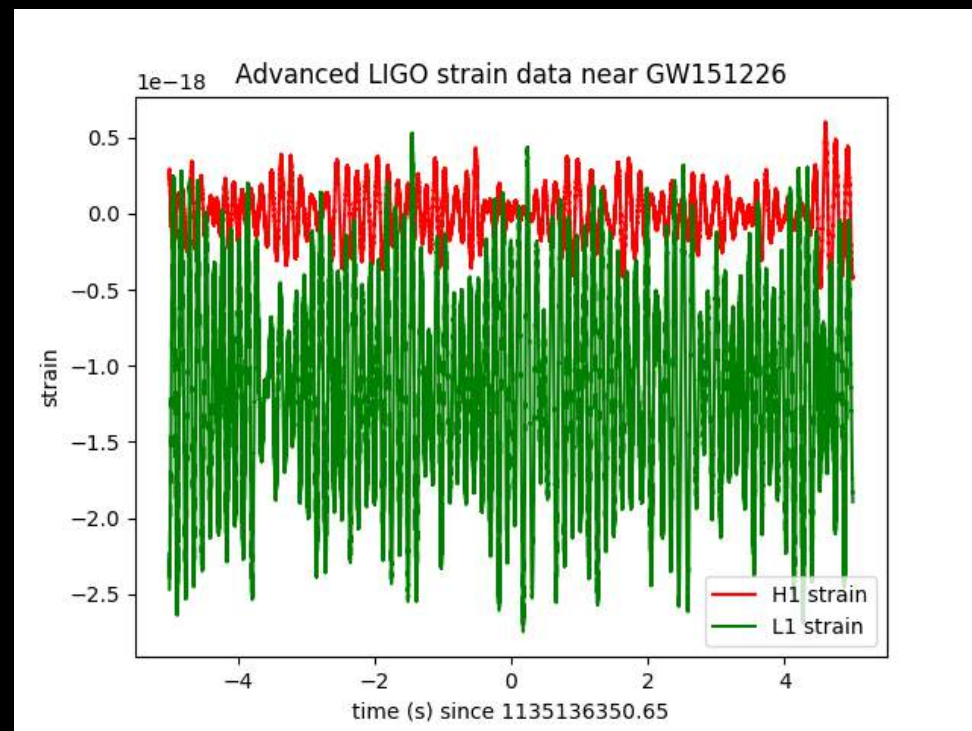
$m_1 = 1.4M_\odot$ $m_2 = 2.0M_\odot$ の予測波形でマッチングした結果 SNR=3.7、4.4



LIGO のデータ解析

目的： $1M_{\odot}$ 以下のブラックホール連星の合体が出す重力波の信号を検出したかどうかをマッチトフィルターで確認する。

使用するデータ：
2015年12月26日にLIGOで取得された
データ



LIGO のデータ解析

実験の意義

$1 M_{\odot}$ 以下のブラックホールは通常ないとされているが、
もしかするとあるかもしれない。
LIGOもまだ探していない $1 M_{\odot}$ 以下のブラックホール
を自分たちで探してみる。

LIGO のデータ解析

方法

LIGO Open Science Center (<https://losc.ligo.org/tutorials/>) で公開しているpythonスクリプトに基づいて解析を行う。

質量をパラメータとしてtemplate(マッチングさせる理論曲線)を作成できるプログラムを作る。

公開しているスクリプトのtemplateと置き換え、質量を $1 M_{\odot}$ 以下の間でそれぞれ $0.01 M_{\odot}$ 刻みで変化させながらマッチングする質量がないか探す。

LIGO のデータ解析

SNRのしきい値 ρ_* を求める。

ノイズをGauss分布と仮定して

今回のマッチング回数 $N=5050$ (回) $\times 32$ (秒) $\times 4096$ (回/s) で、
ノイズがしきい値を越える確率が0.01%以下になる時、しきい値は

$$\rho_* = 8$$

となる。

つまり、SNRの値が 8 を越えると重力波イベントの候補となる。

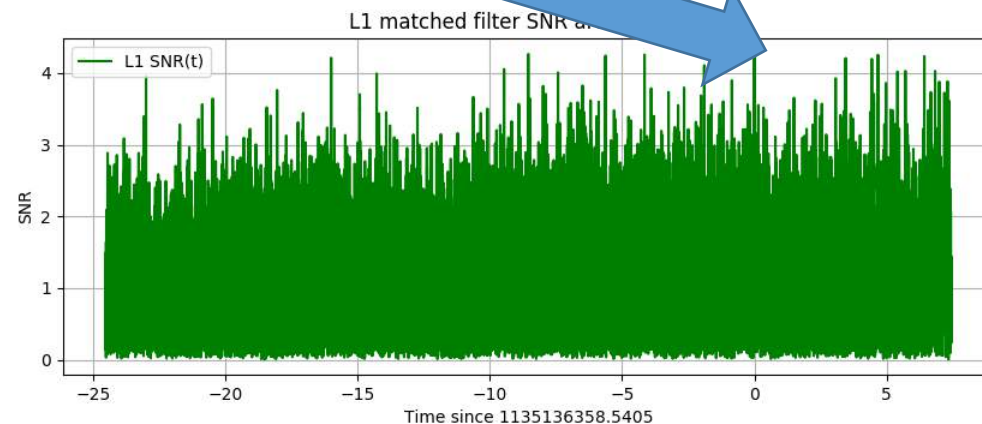
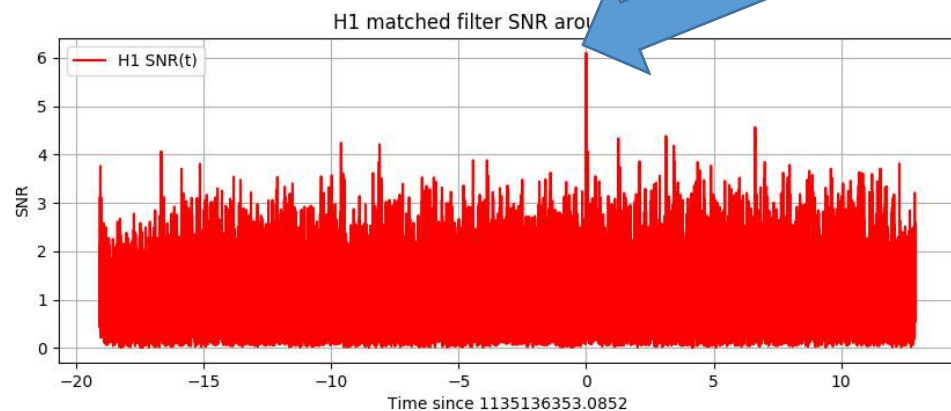
LIGO のデータ解析

最大のSNRが出たマッチング $m_1 = 0.08M_{\odot}$ と $m_2 = 0.89M_{\odot}$

ハンフォードの検出器では
SNR= 6.1 ($< \rho_* = 8$)

リビングストンの検出器では
SNR = 4.3 ($< \rho_* = 8$)

ピークが現れた時間も大きくずれている。



“We did it ?”

“We didn’t.”

まとめ

今回の解析では限られた時間で自分たちのマッチングした $1M_{\odot}$ 以下のブラックホール連星の合体による重力波の検出はできなかった。