



機械学習を用いた重力波信号の雑音分類

押野翔一（東大宇宙線研）

シミュレーション天文学のこれまでとこれから
-ハードウェア・アプリケーション・サイエンス-

自己紹介

- 2008年 牧野研
 - 総研大博士課程
 - P³Tスキームの開発

自己紹介

- 2008年 牧野研
 - 総研大博士課程
 - P³Tスキームの開発

「プログラムは書いた通りに動く」

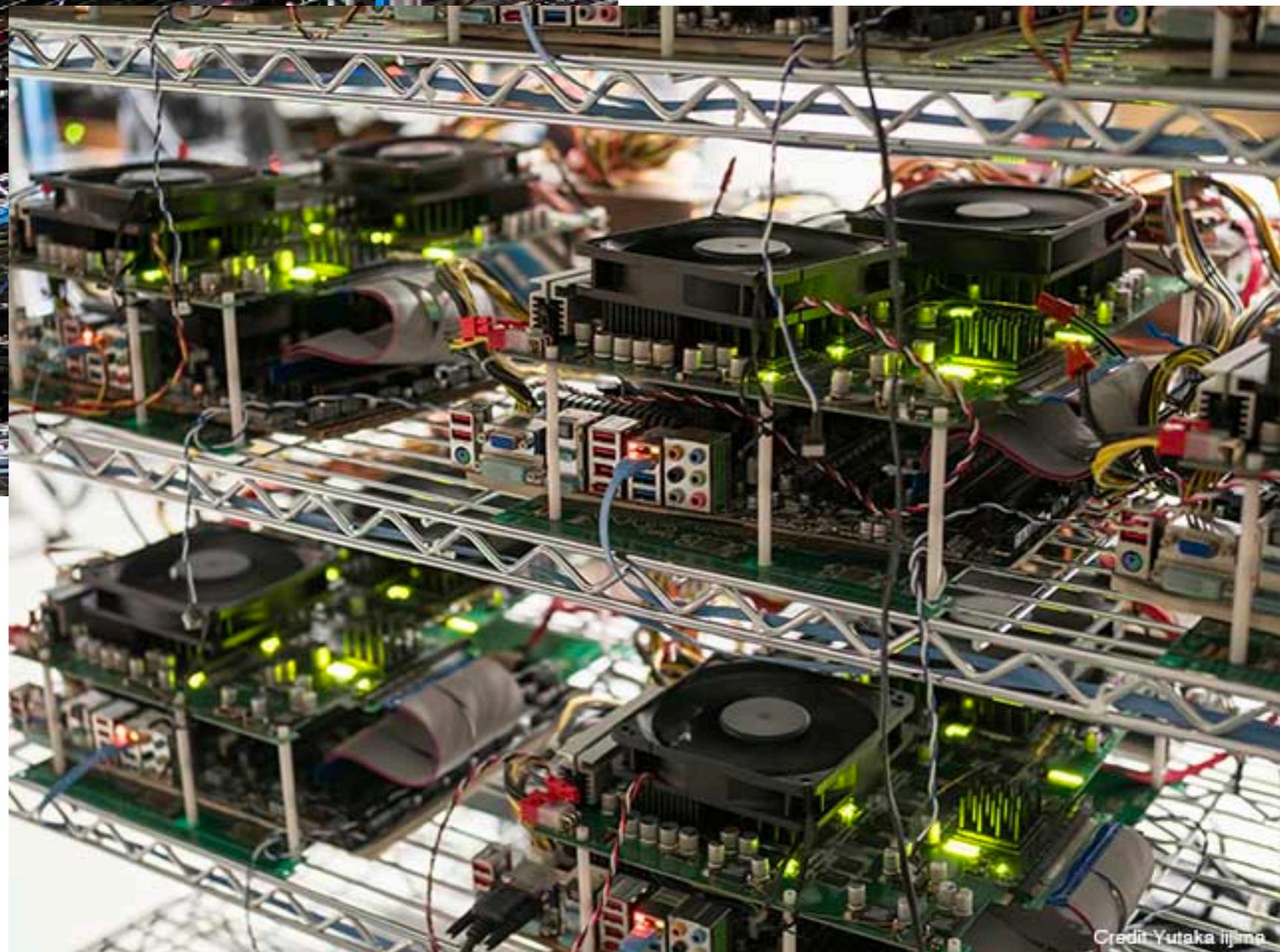
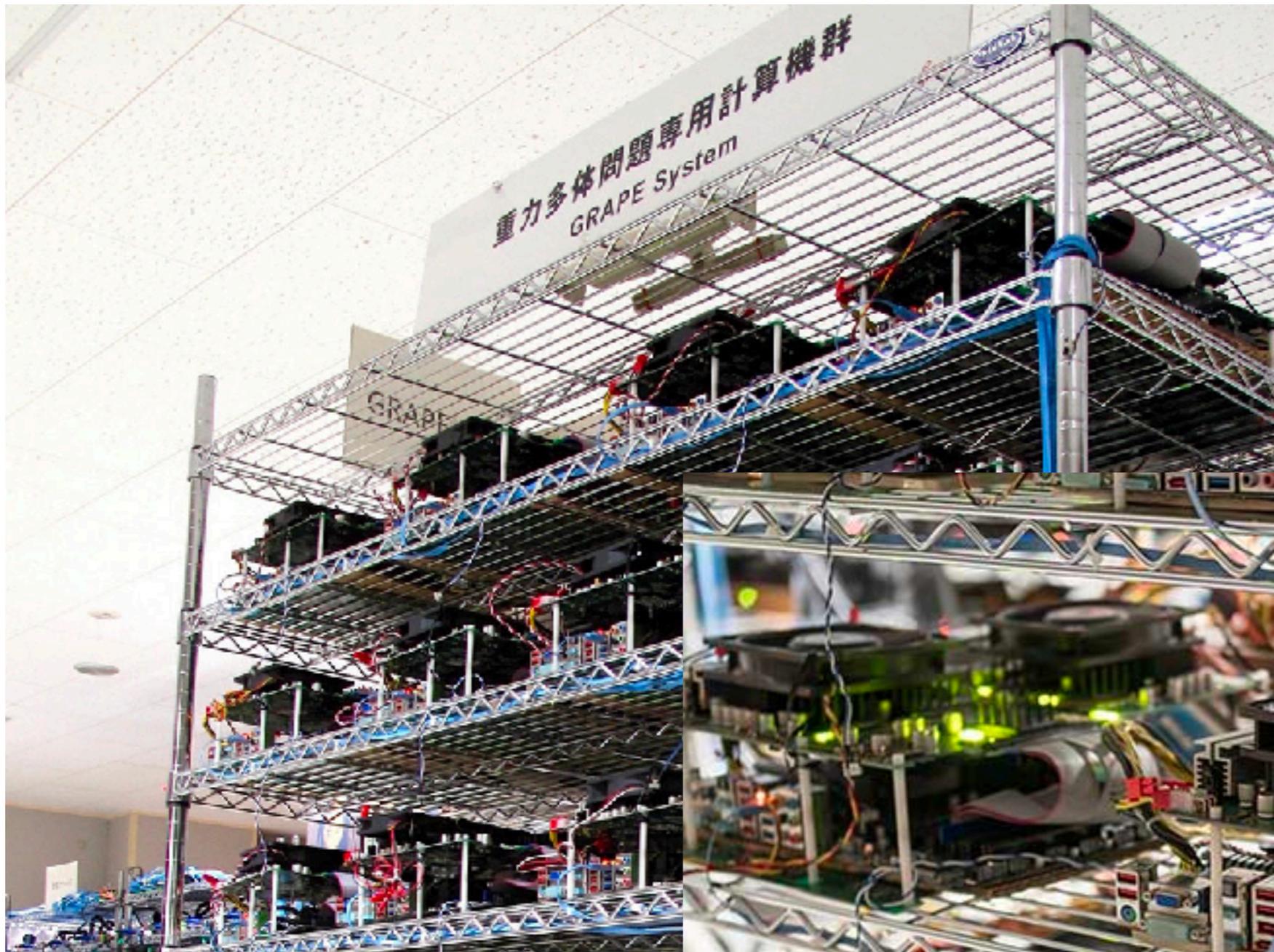
自己紹介

- 2008年 牧野研
 - 総研大博士課程
 - P³Tスキームの開発

「プログラムは書いた通りに動く」

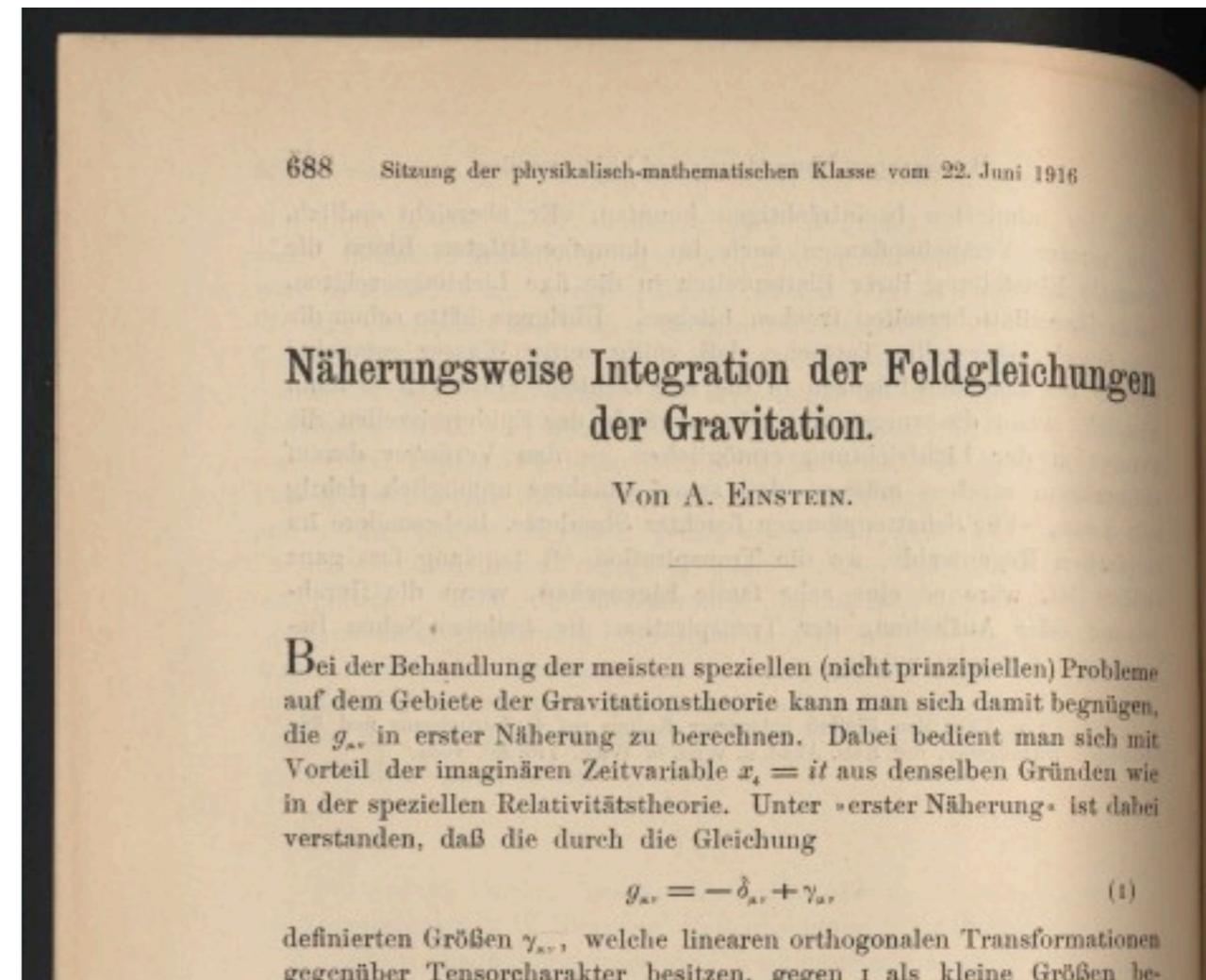
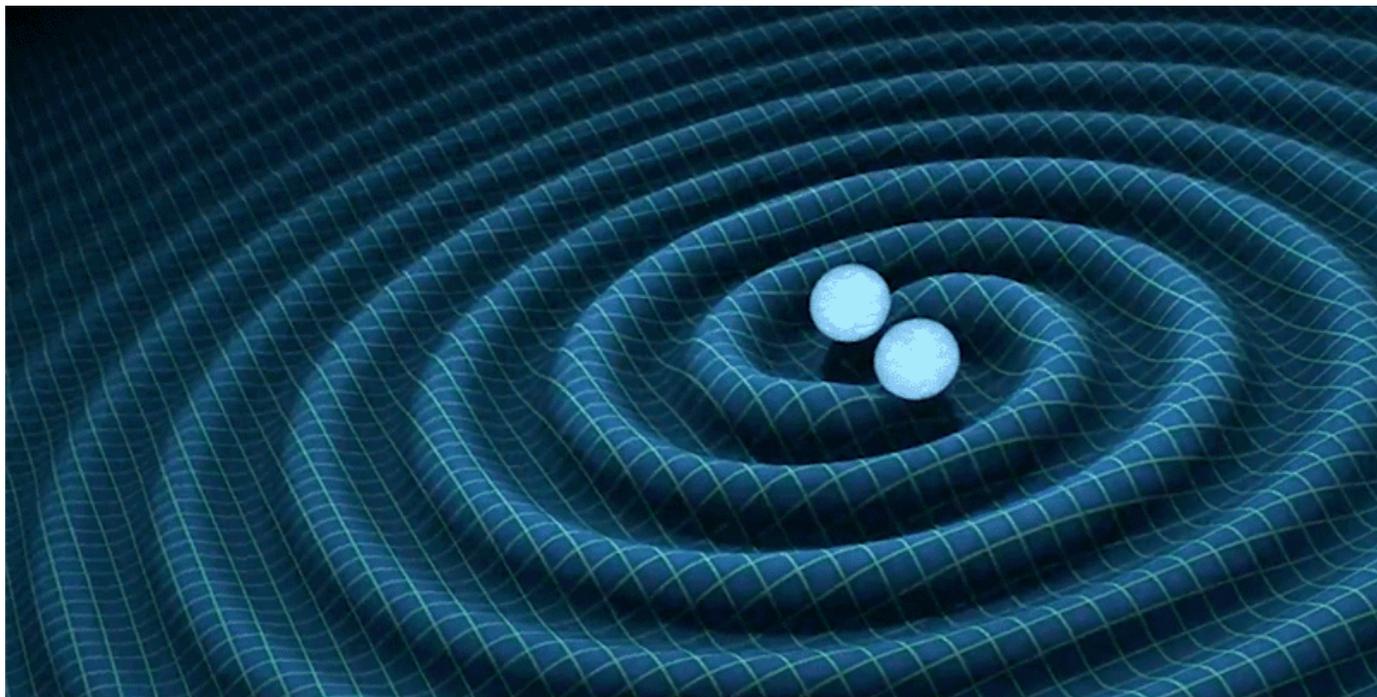
- 2011年 国立天文台CfCA
 - 共同利用計算機^の管理・運用
 - 惑星形成N体シミュレーション
- 2018年 東大宇宙線研
 - 干渉計のデジタル制御用計算機^の管理・運用
 - Detector Characterization





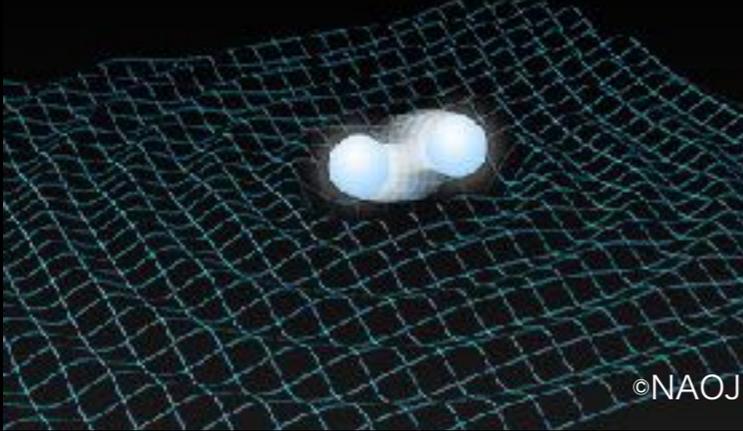
重力波とは？

- 1916年 アルバート・アインシュタインが予言した時空の歪みが波として伝搬する現象
- 非常に重い物体が加速運動する時に時空は激しく揺らされ、その時空の歪みが光速で伝わっていく

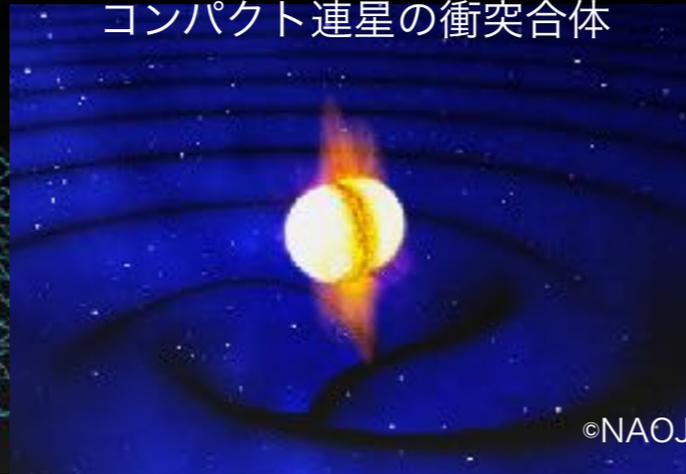


重力波の発生源の候補天体

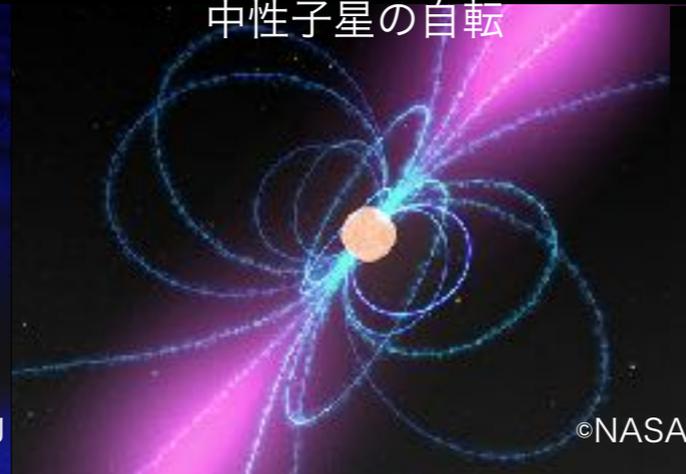
コンパクト連星の公転



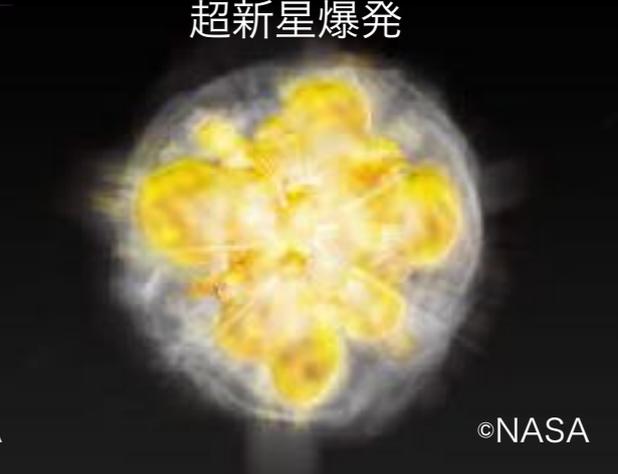
コンパクト連星の衝突合体



中性子星の自転

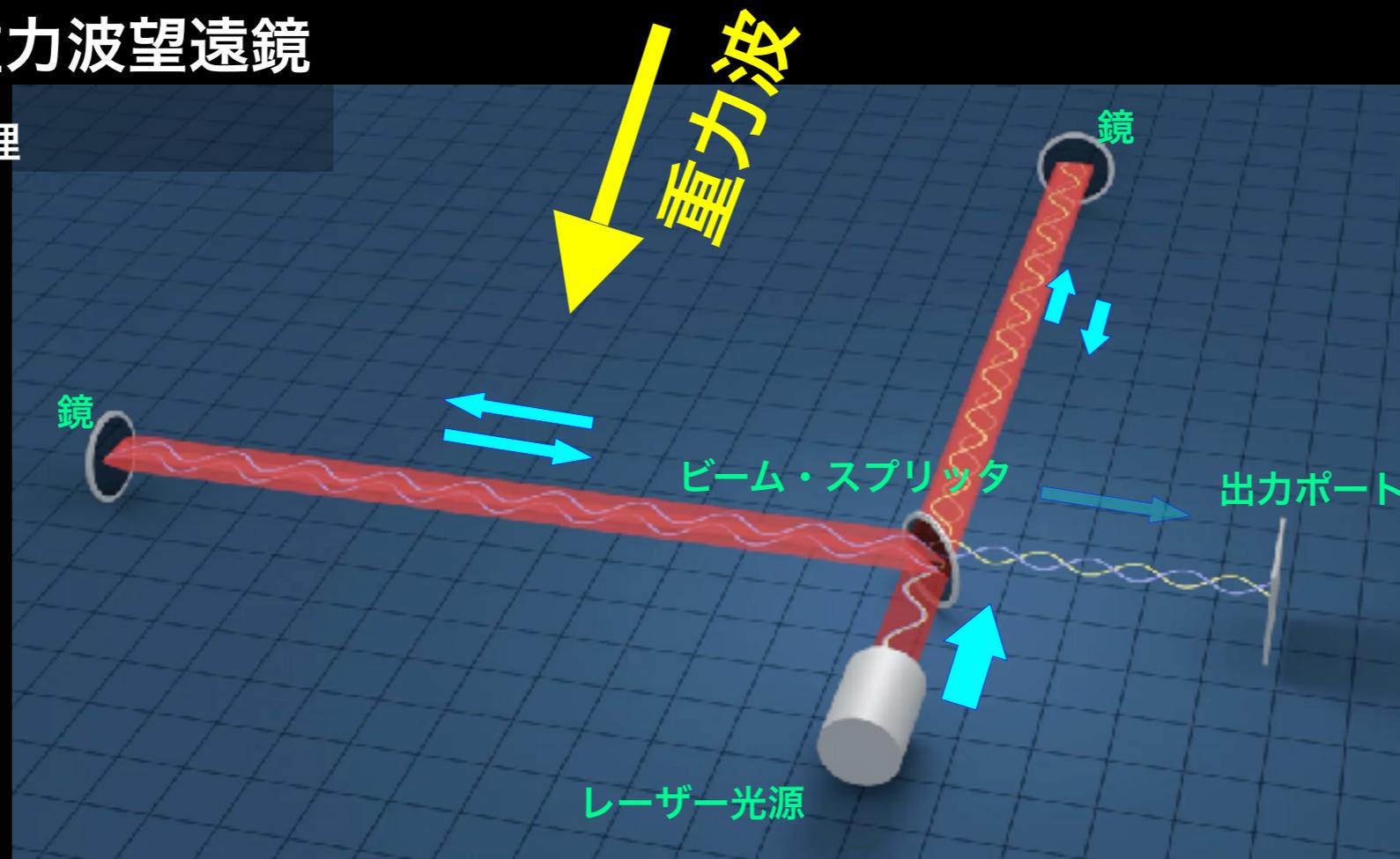


超新星爆発



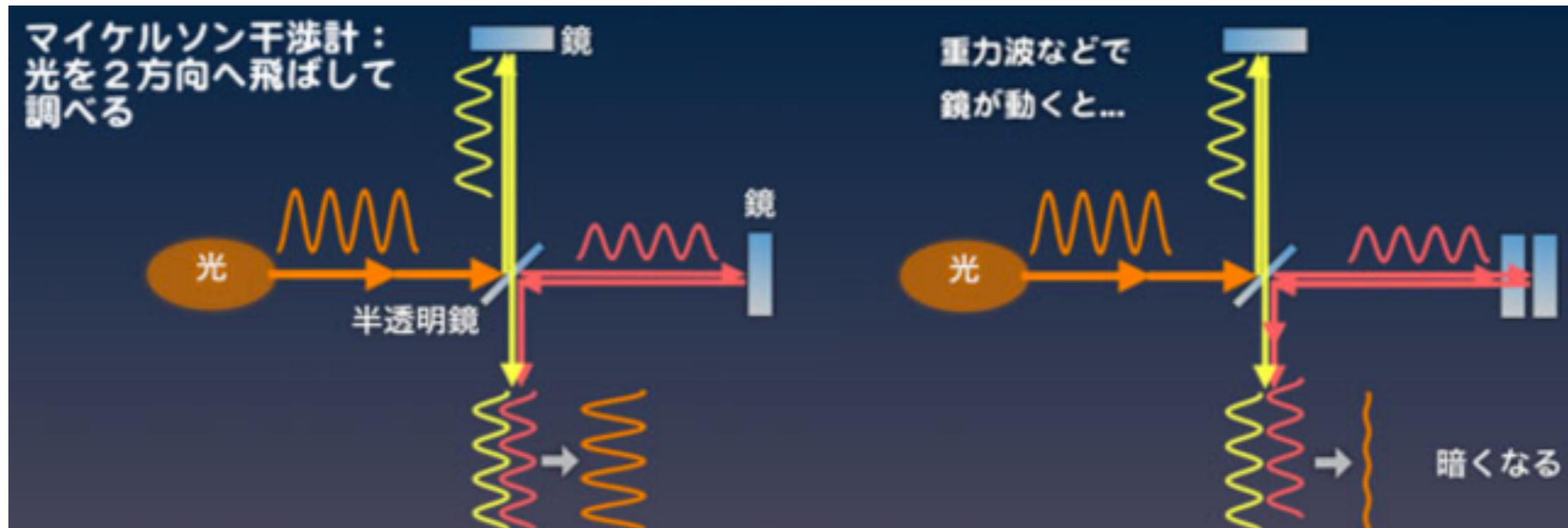
レーザー干渉計重力波望遠鏡

の基本原理



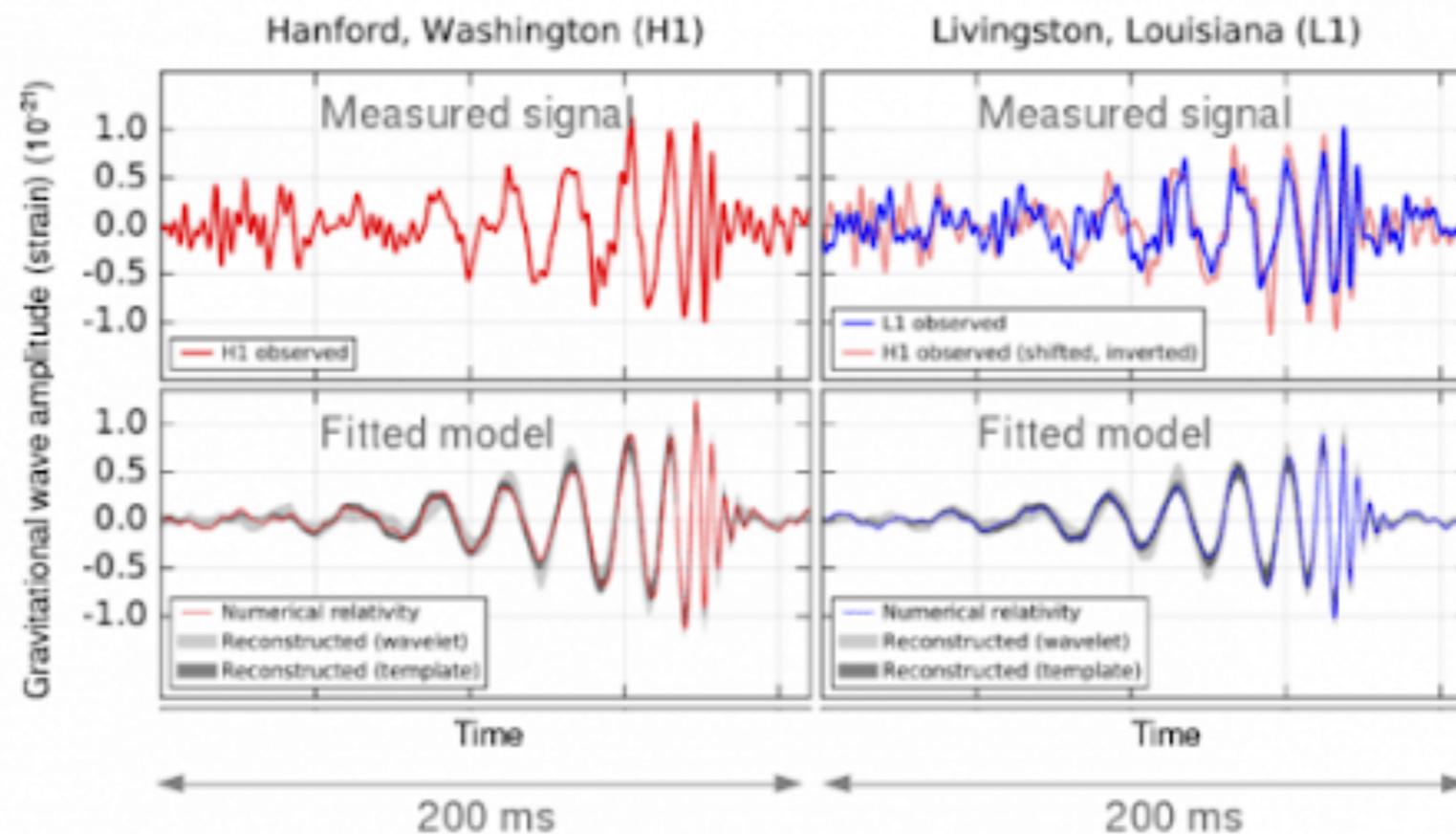
重力波検出器

- ・ レーザー干渉計
 - ・ レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐
 - ・ 鏡で反射された光を干渉させる
- ・ 重力波が到来 → 腕の長さが変わって**光量**が変化

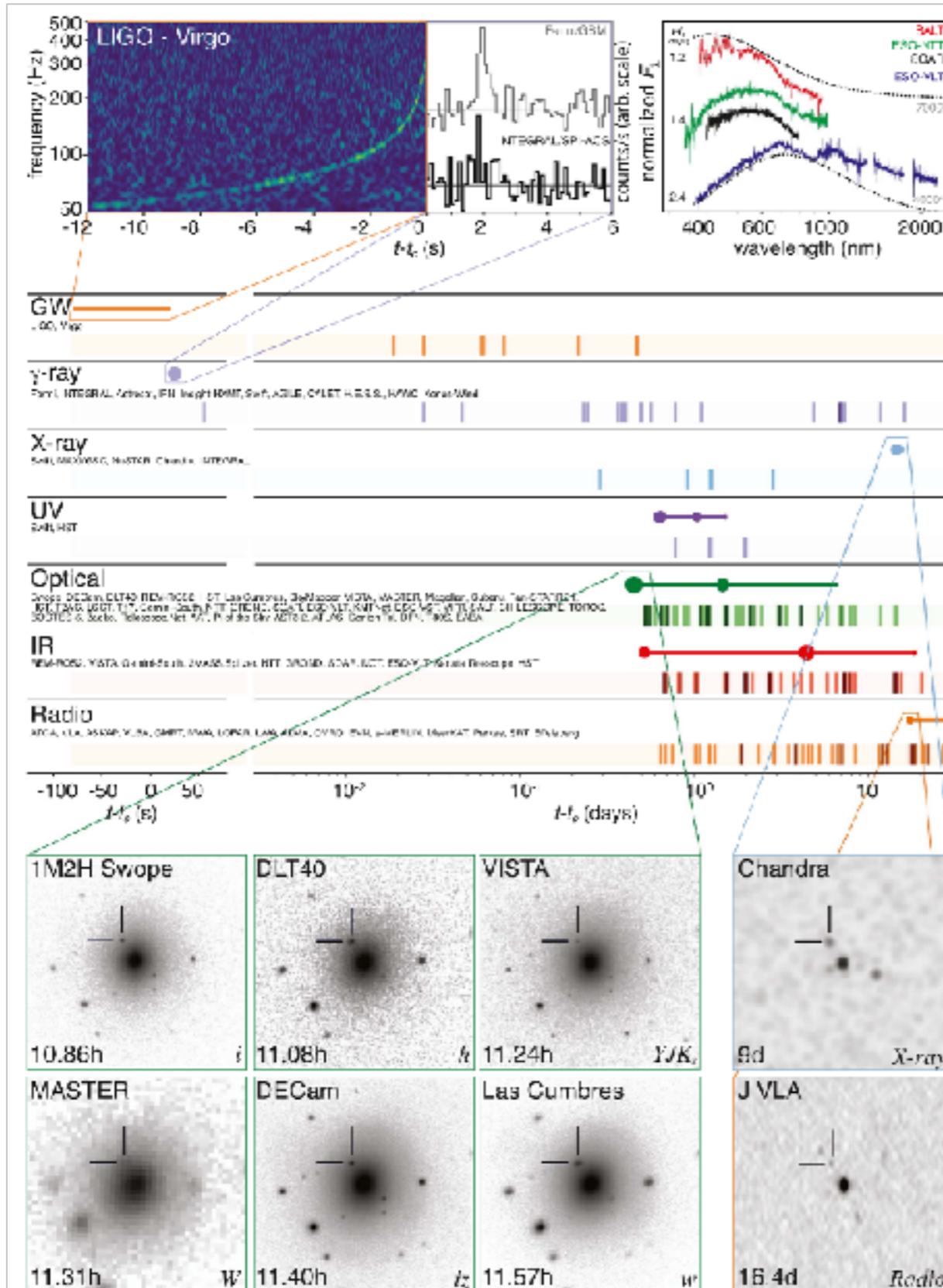


LIGOによる重力波初検出

- 2015年9月14日
- 二つのブラックホールの合体からの重力波を検出
(発表は2016年2月11日)
- 初めて重力波を直接検出
- 合体前のBH質量：太陽質量の約36倍と29倍
→ 合体後の質量は約62太陽質量



マルチメッセンジャー天文学

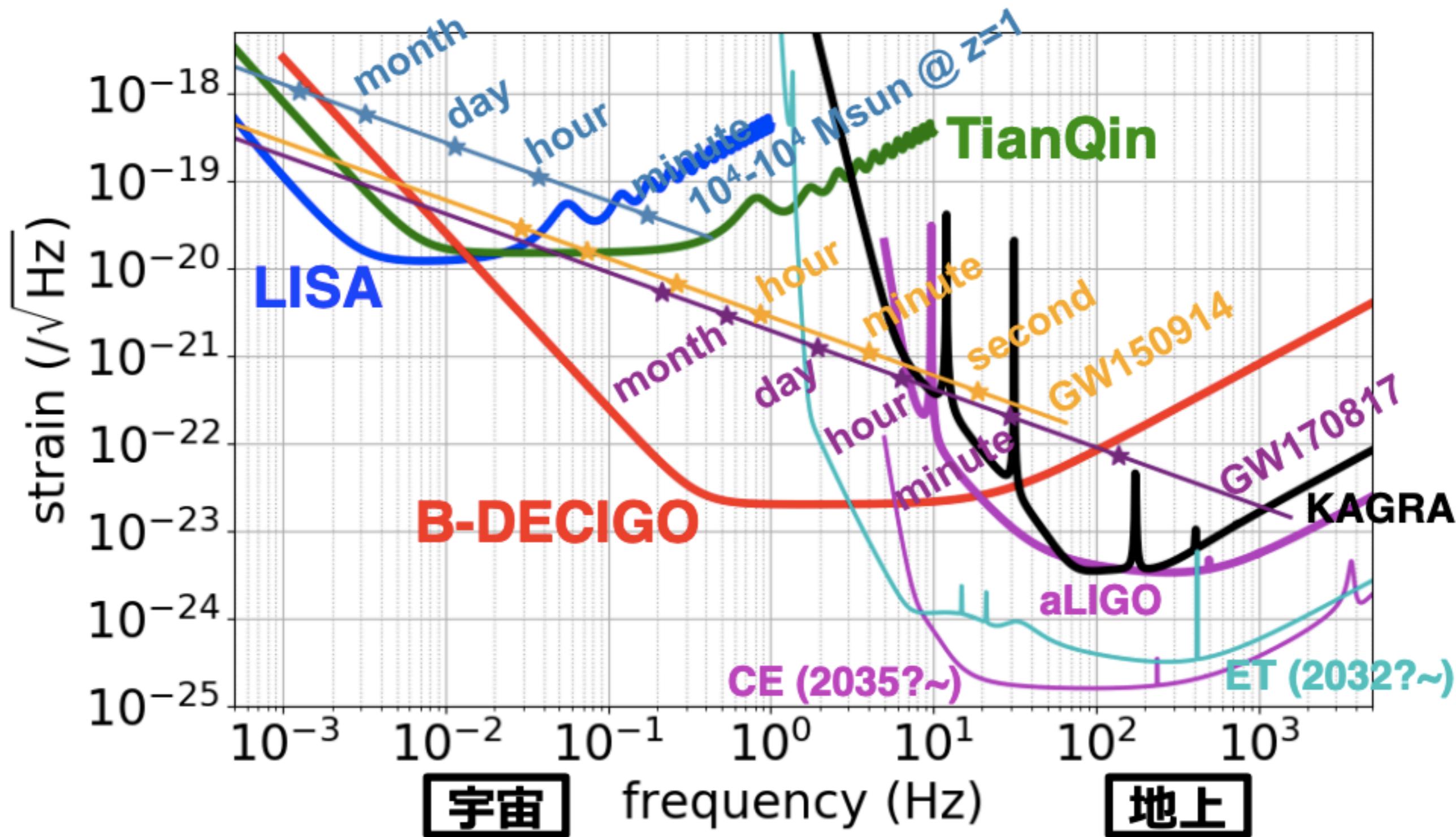


- 中性子星連星合体イベント GW170817に対して行われた広範囲の周波数領域の電磁波観測

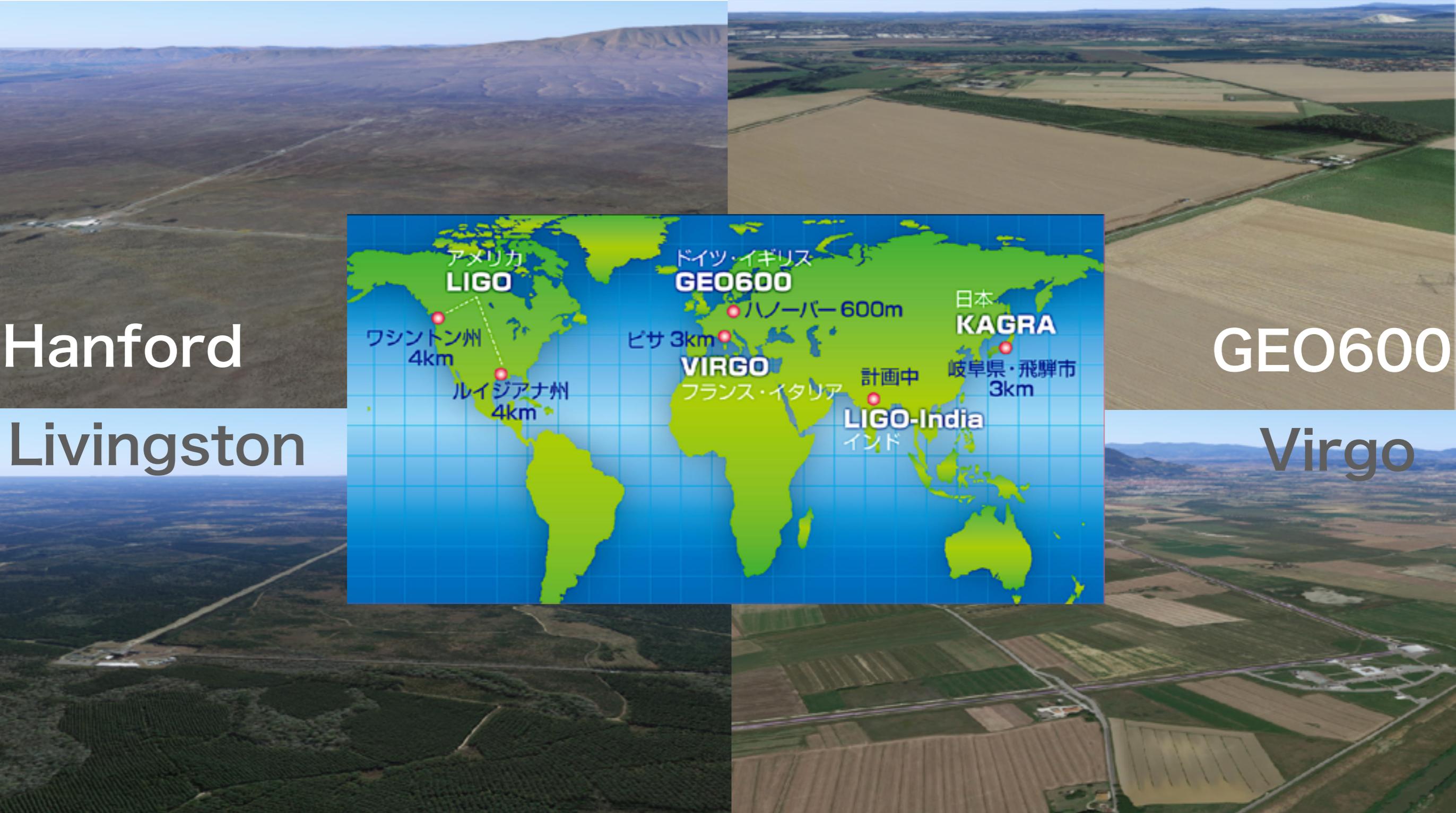
- 複数の波長の光学観測、ニュートリノなどの宇宙線、重力波の観測を総合して天体現象を解明することが可能になった

宇宙と地上での多波長観測

- 宇宙望遠鏡で合体時刻の予測が可能



大型重力波望遠鏡による国際重力波観測網



Hanford

Livingston



GEO600

Virgo

大型重力波望遠鏡による国際重力波観測網

Hanford

Livingston



GEO600

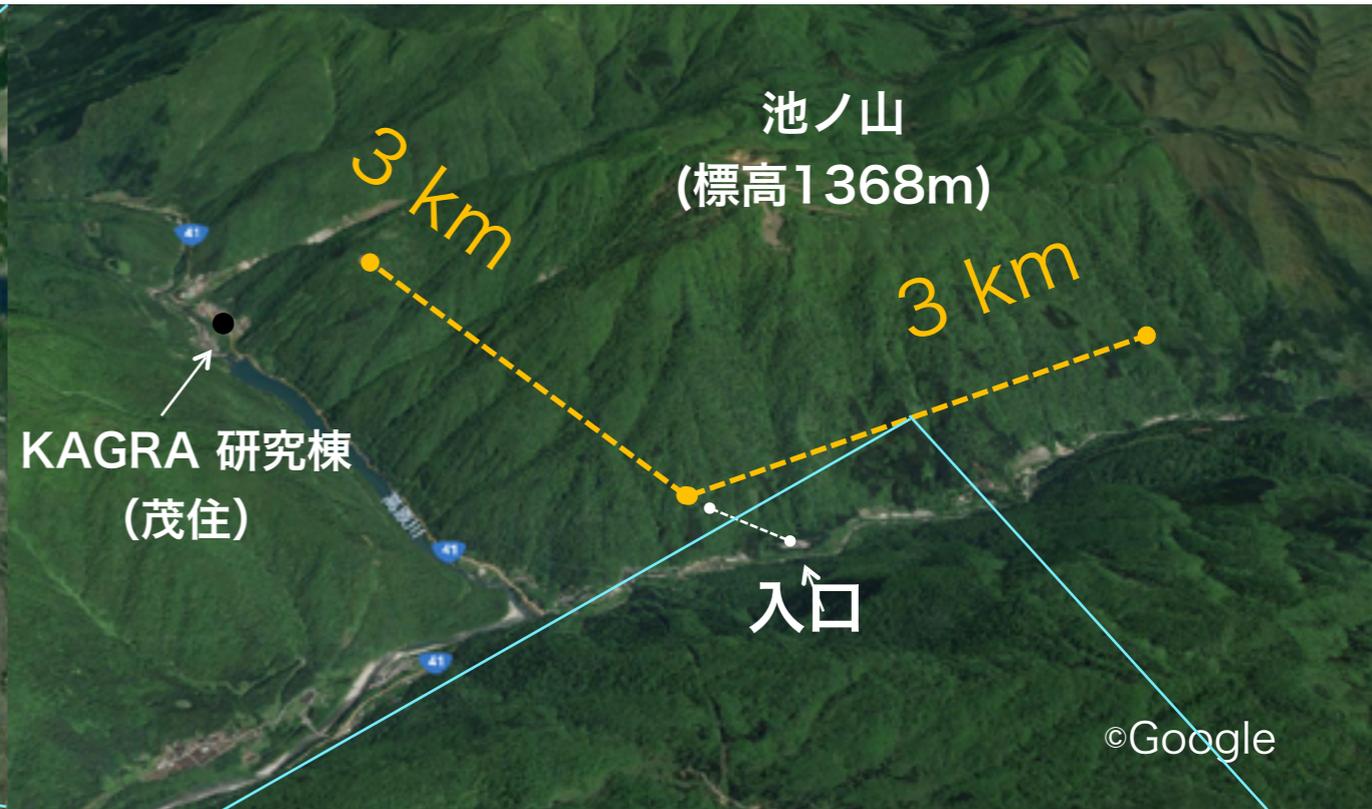
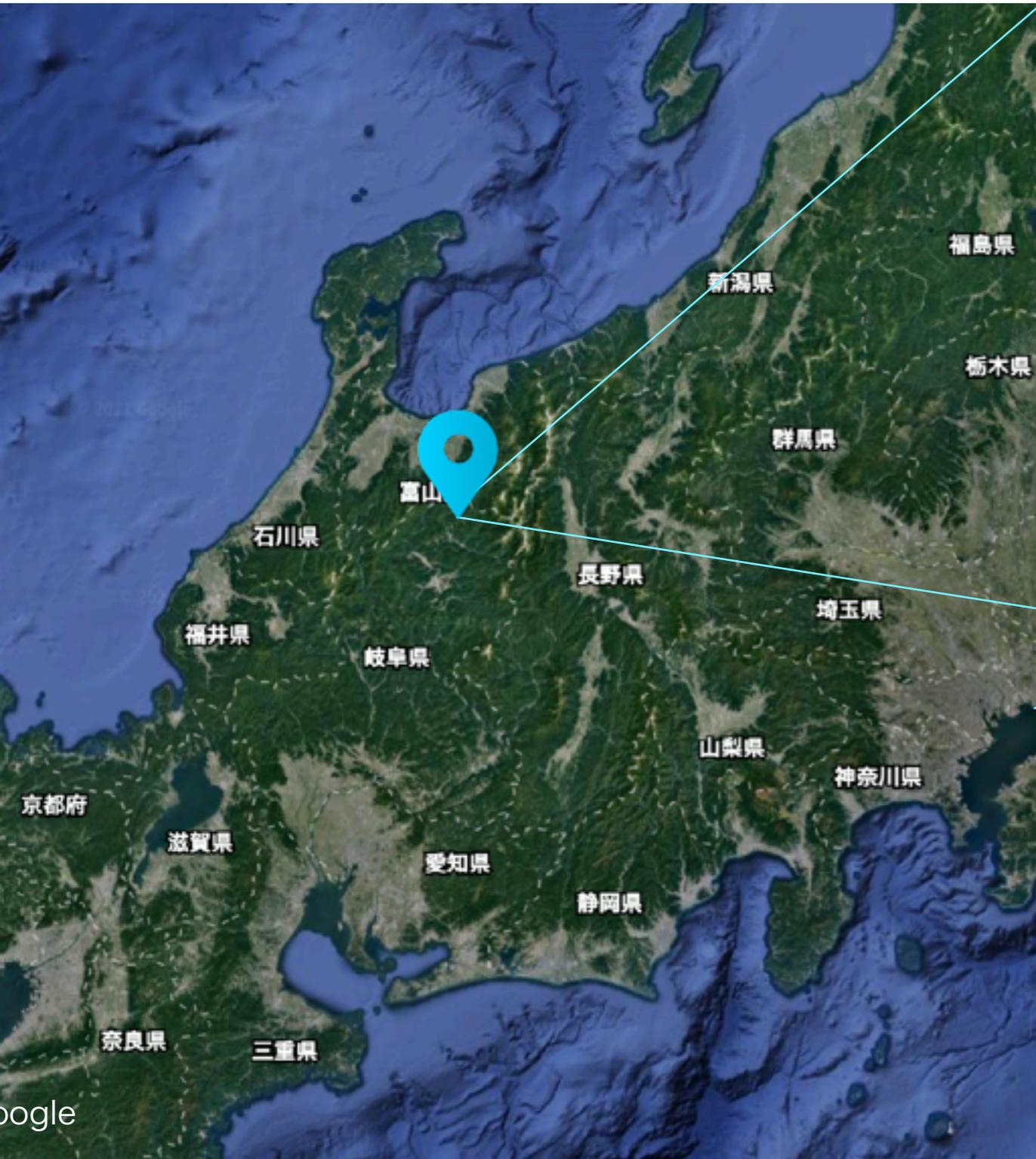
Virgo

観測網に参加する観測所が増えることによる利点:

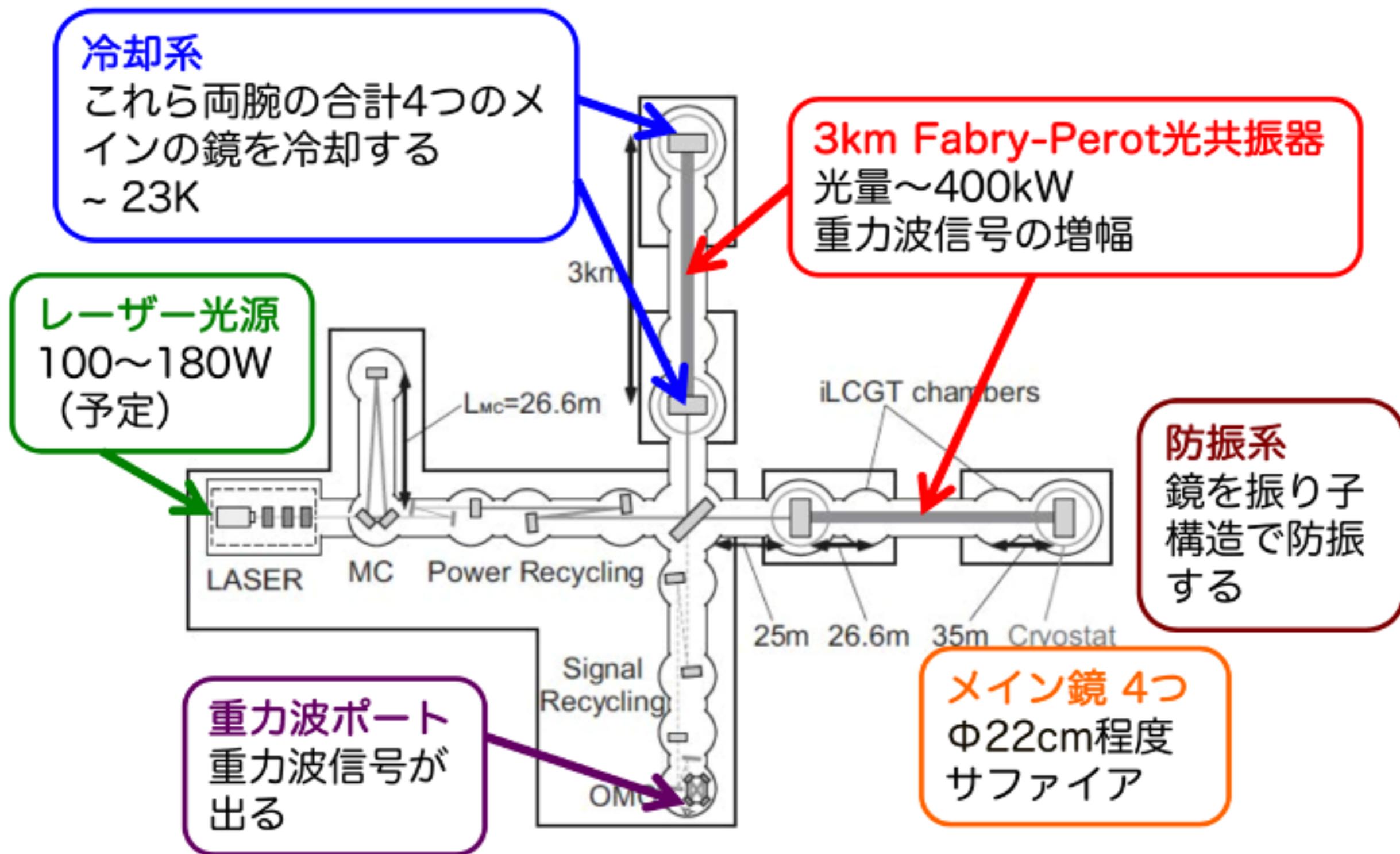
- ・ 重力波源の方向決定精度の向上
- ・ 偏極, 軌道面傾斜角と距離の縮退が解ける
- ・ 全天カバー率の向上
- ・ 複数台の検出器の稼働率向上

など

大型低温重力波望遠鏡KAGRA

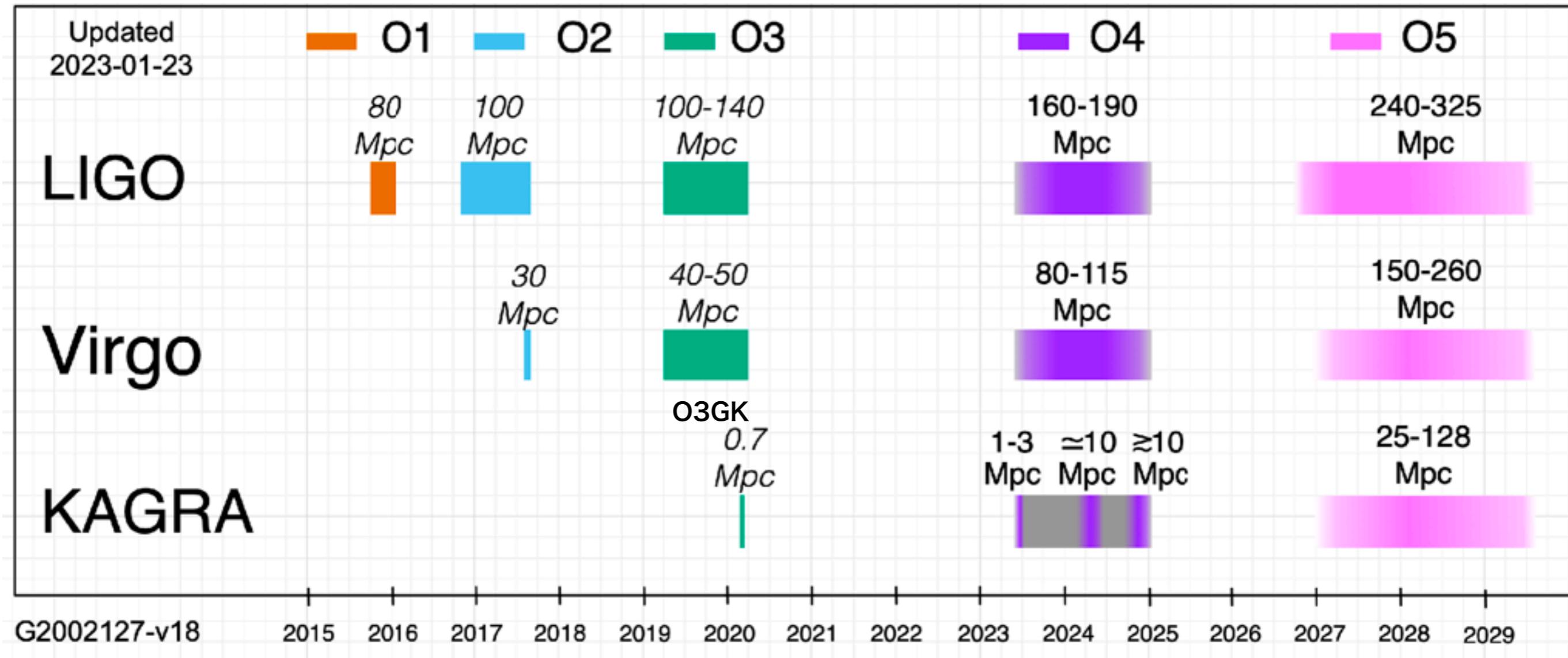


KAGRAのシステム概観



観測スケジュール

BNS range [Mpc]: 連星中性子星合体の観測可能距離

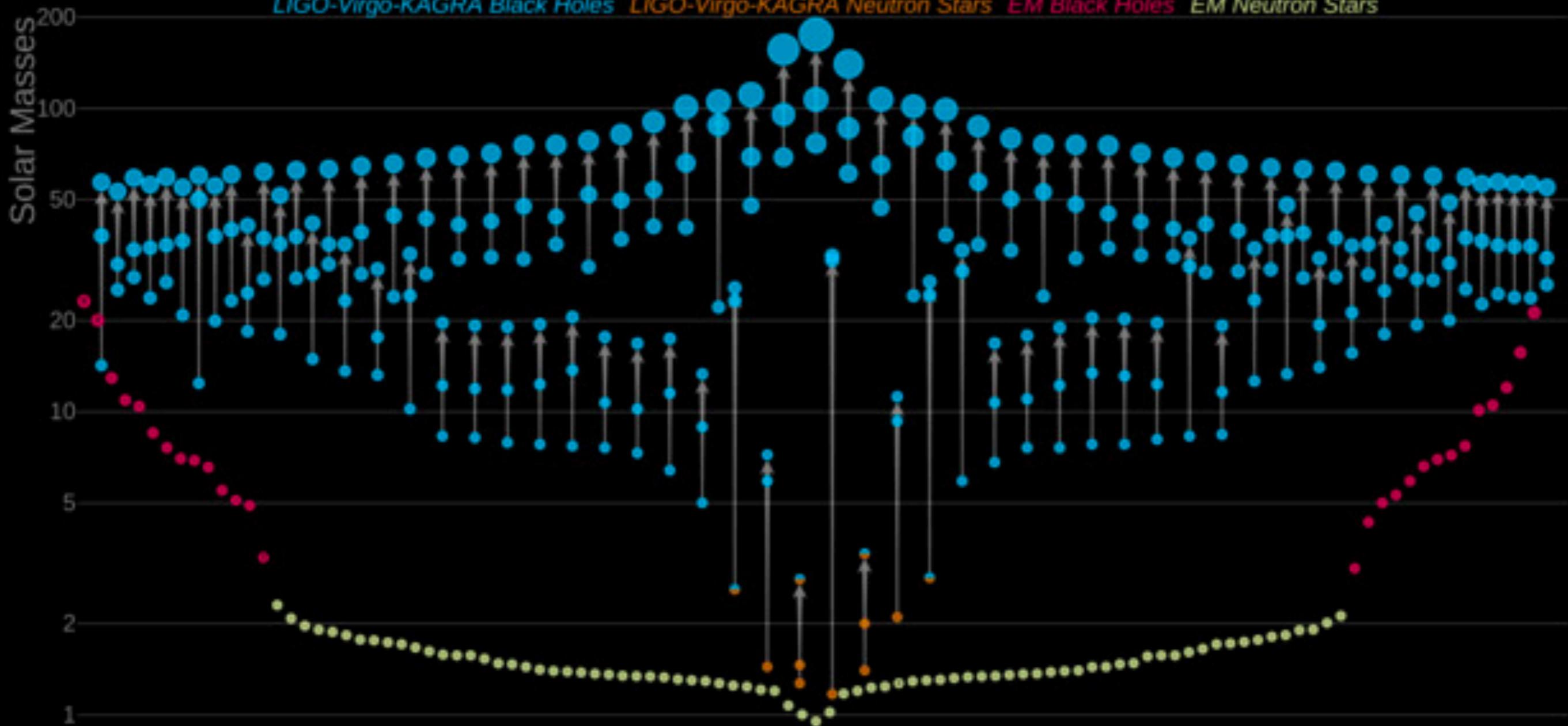


Copyright © 2023 the KAGRA Collaboration, the LIGO Scientific Collaboration, and the Virgo Collaboration.

これまでに観測された重力波イベント

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars

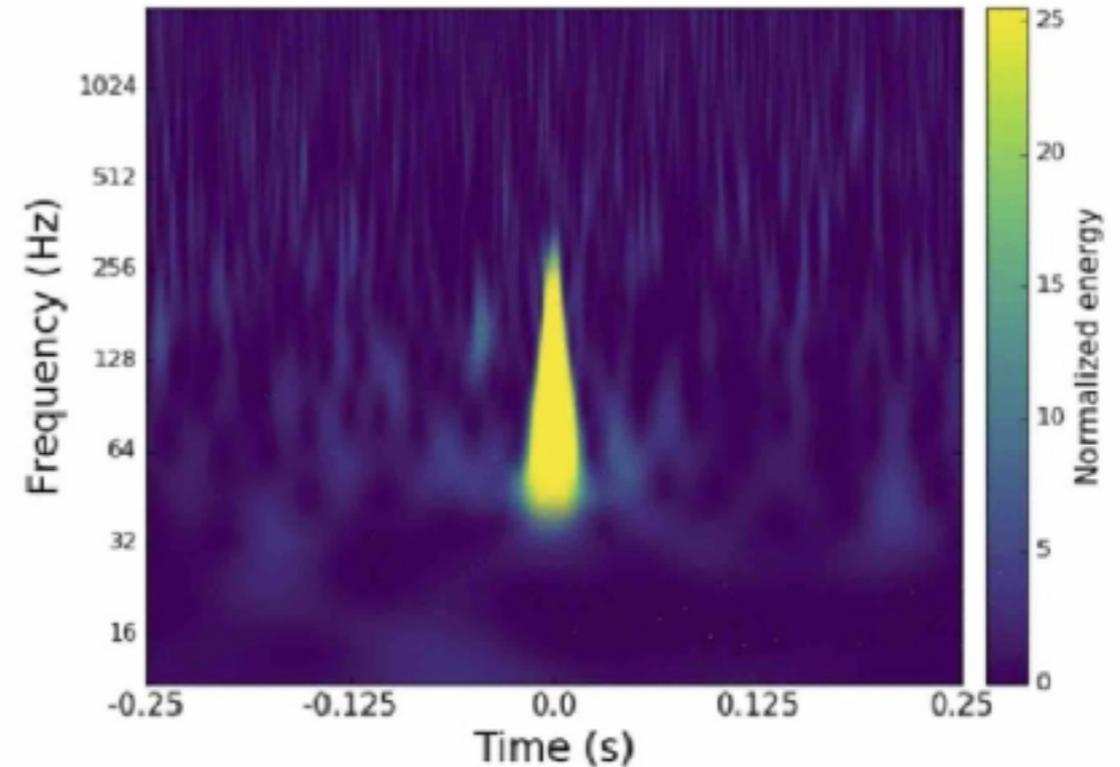
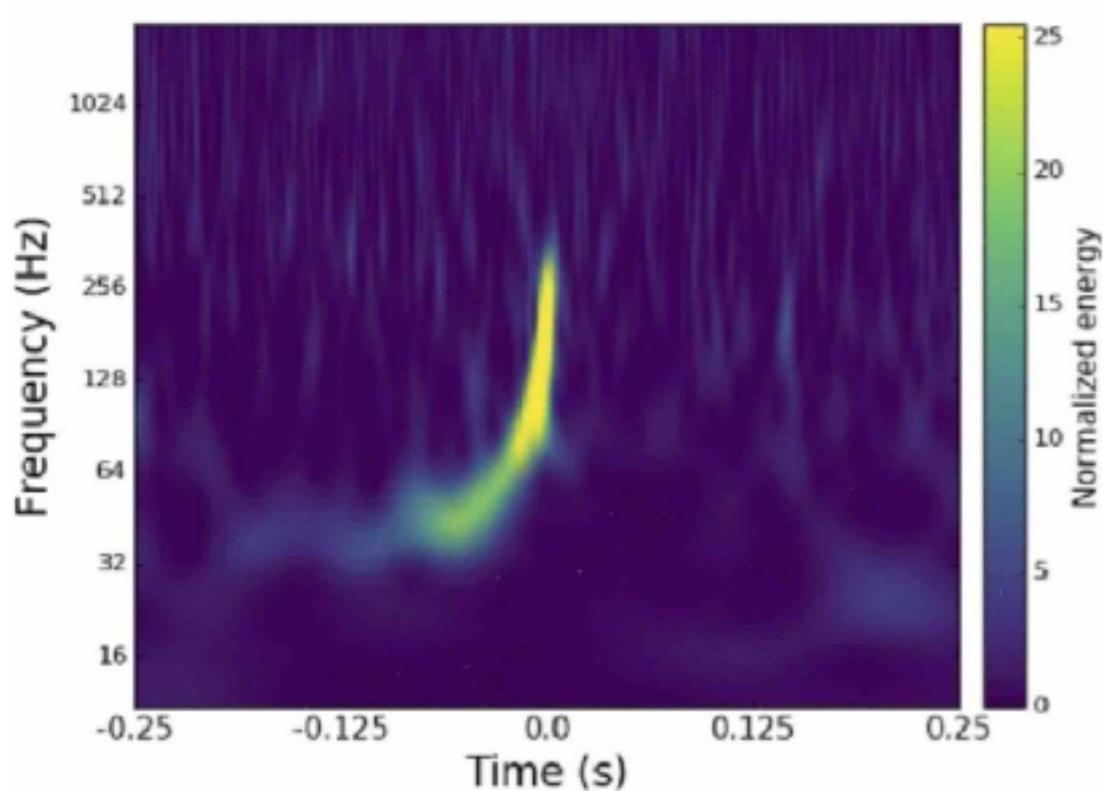


LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University.

突発的な雑音(グリッチ)

重力波検出器に現れる非定常な雑音をグリッチと呼ぶ

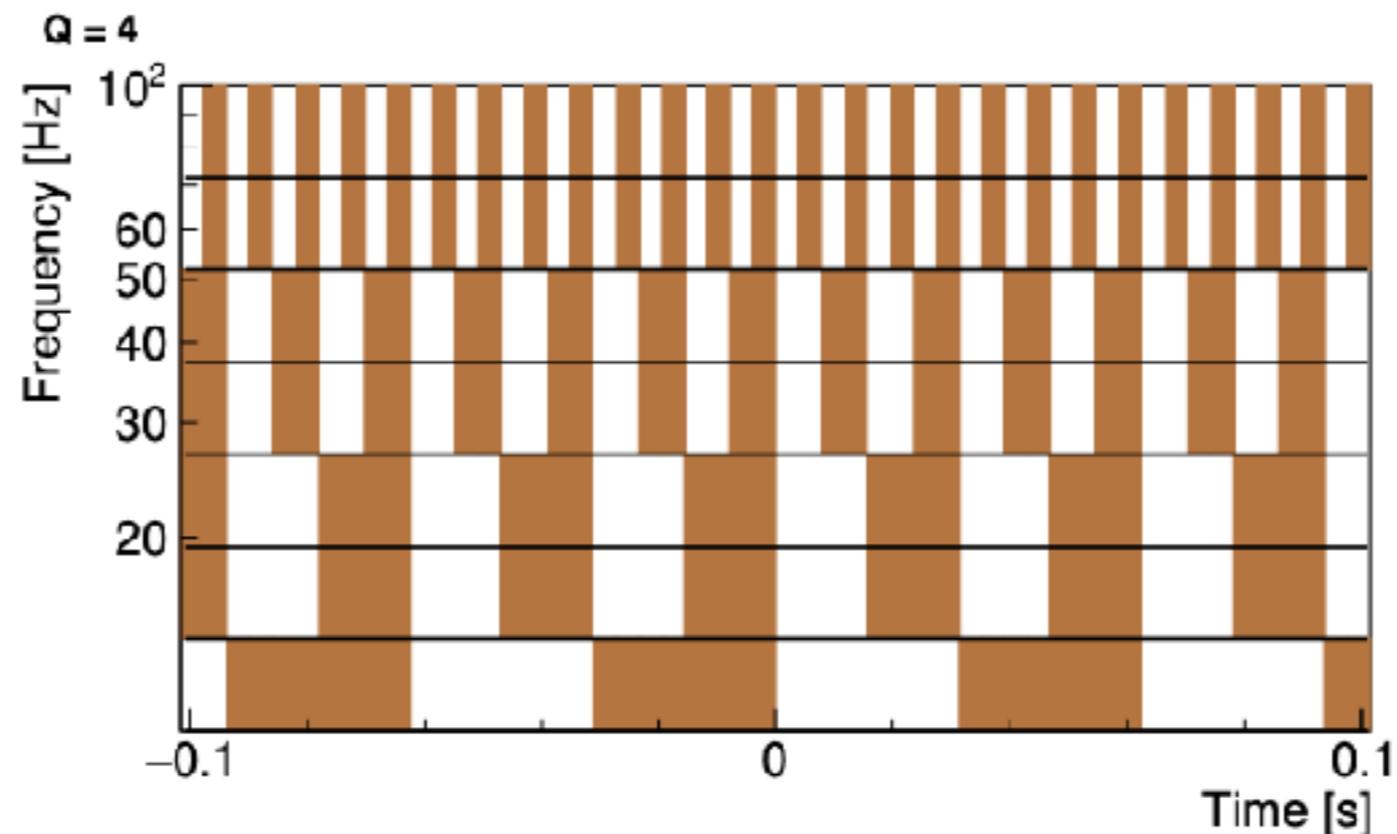


Bahaadini+ (2018)

- 連星合体イベントの重力波信号と、環境、装置などを起源とするノイズを区別し、天体現象による重力波だと確定する
- 突発的な雑音が起こる原因を突き止めて、原因を取り除くなどの改良を行い感度を向上させる

突発的な雑音(グリッチ)

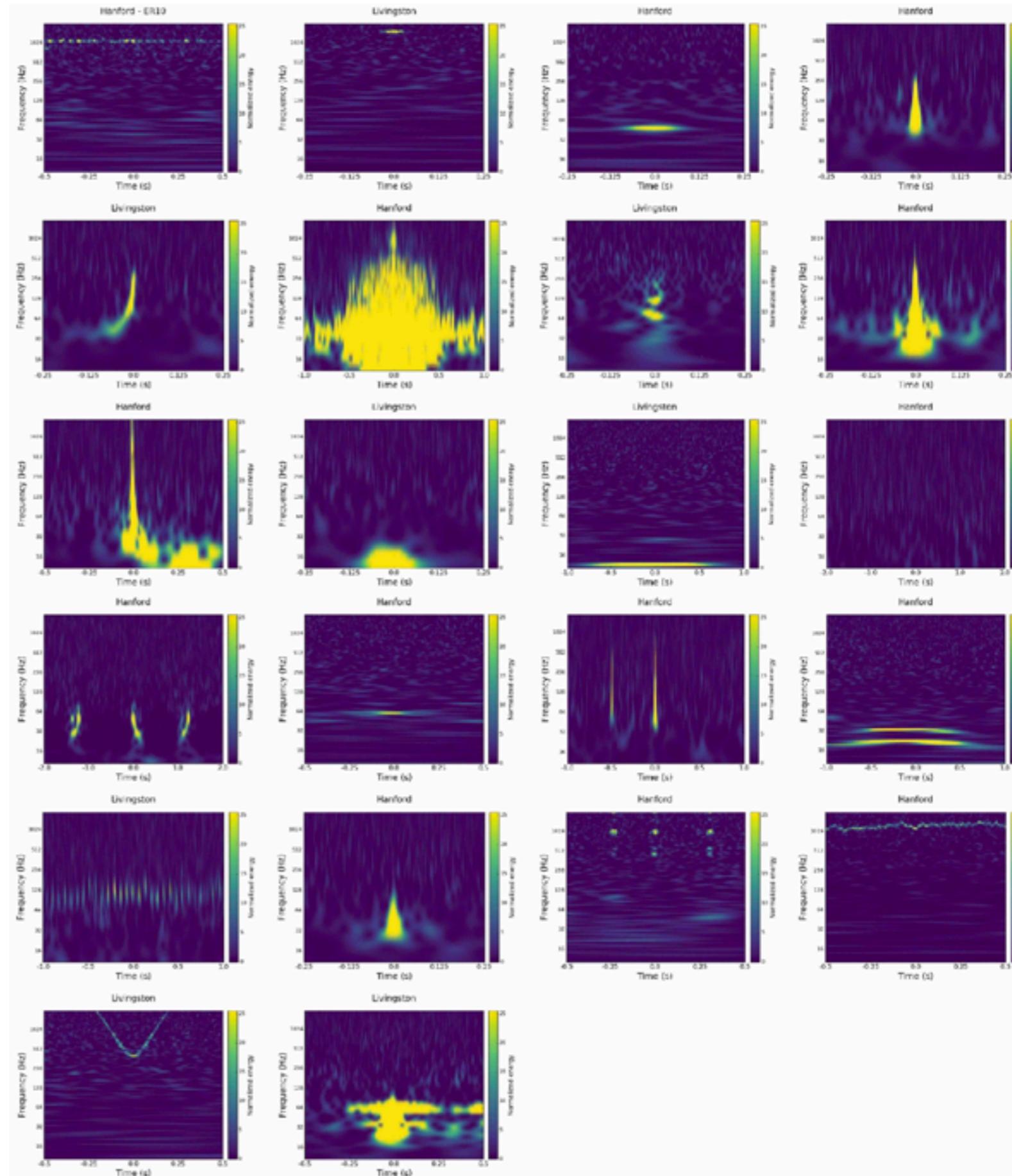
Q変換を行なって、突発性雑音の時間-周波数空間の画像を作成
雑音源によって異なる形状の画像が得られる



Q変換：時間幅を周波数に応じて変えるスペクトログラム
複数のQ値に対して実行してSNRを最大化する

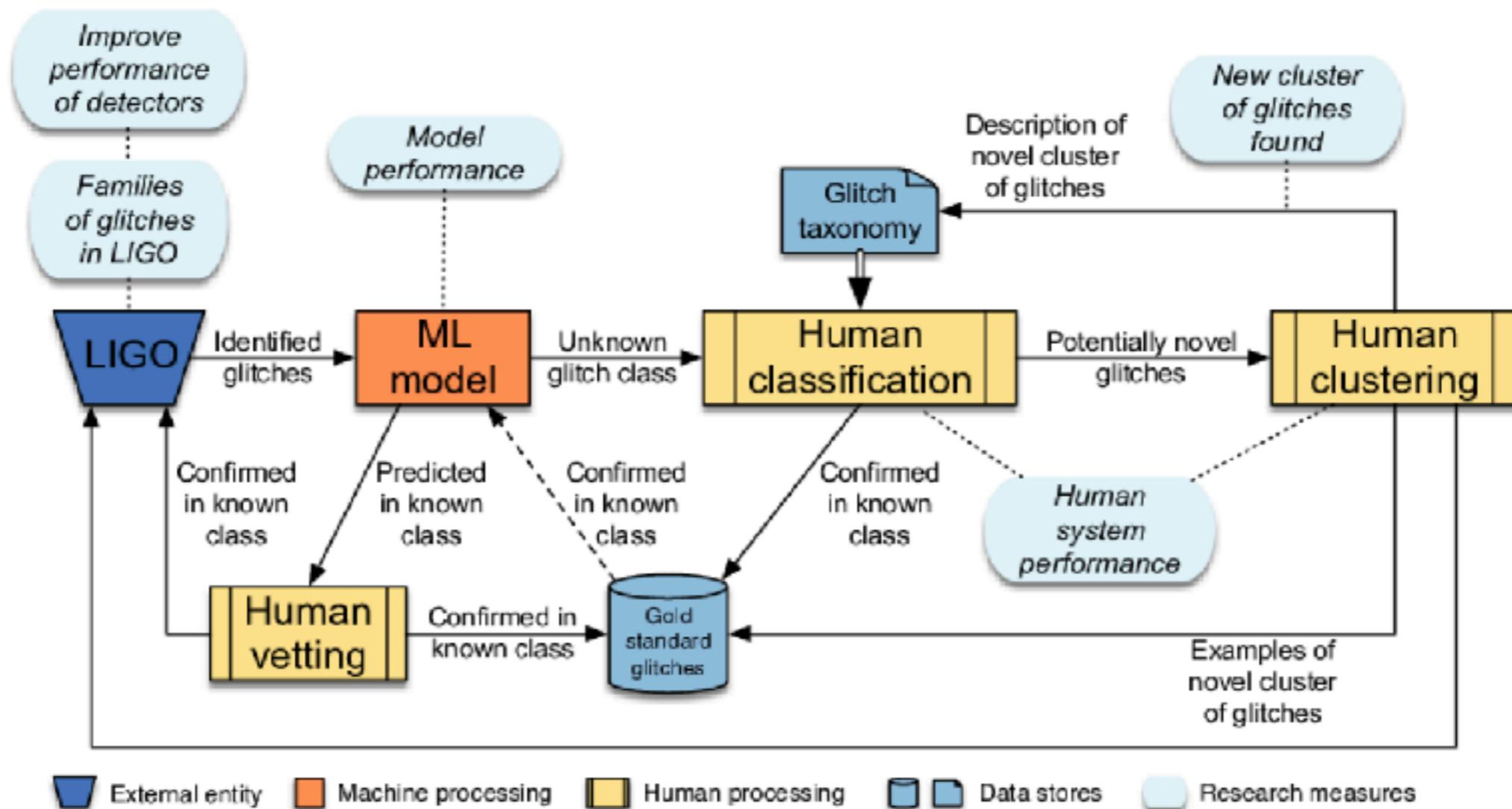
Gravity Spy

LIGO O1データを市民科学者の協力のもと分類するプロジェクト
突発性雑音を22種類に分類した
データセットを公開しており、雑音分類の基礎学習用データとして
利用されている



Gravity Spy

- LIGOデータのグリッチ分類を市民科学者にクラウドソーシングするプロジェクト
- 分類した画像データを使った学習モデルは97.1%の精度で分類を行える (Zevin+ 2017)



教師なし学習による雑音分類 (Sakai+ 2022)

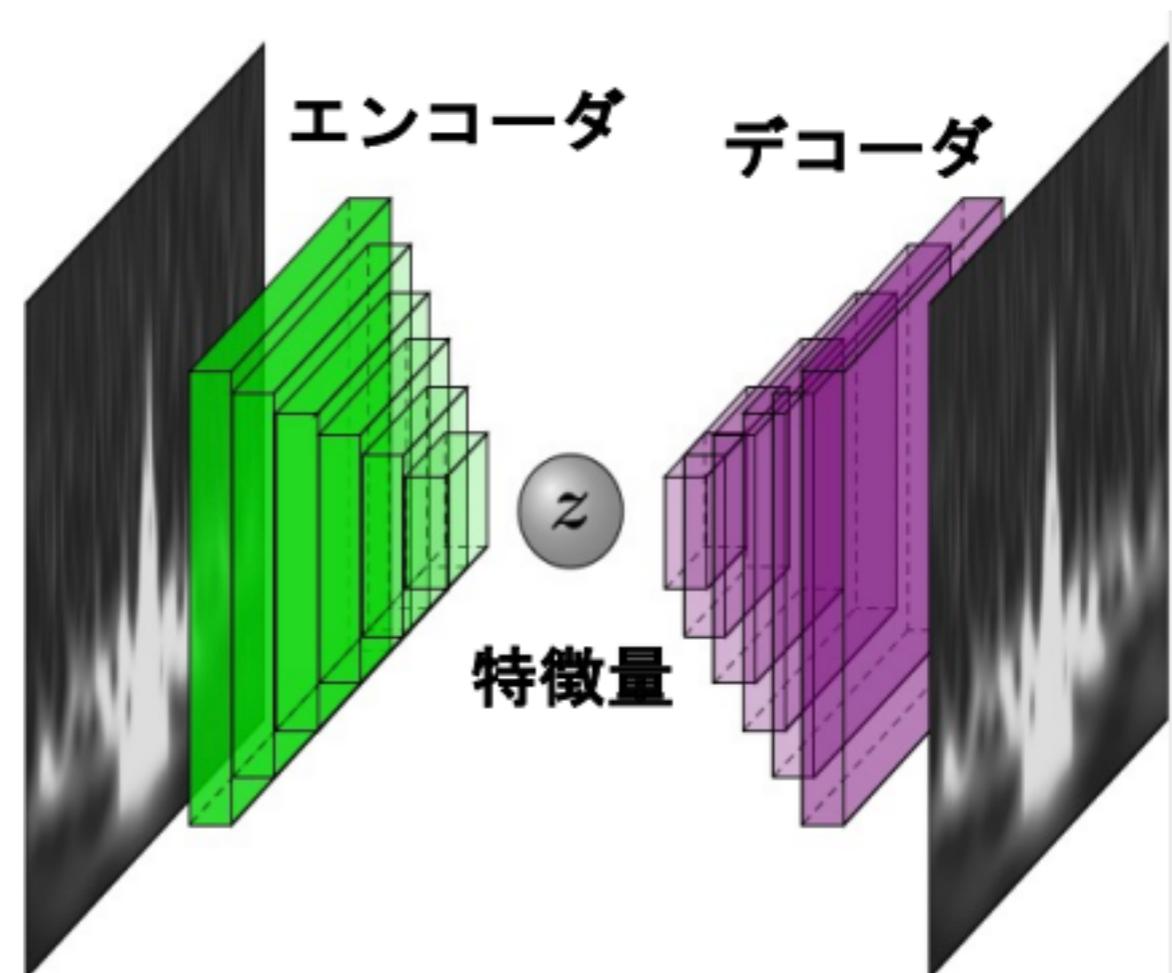
- 教師あり学習を行う場合、事前に学習データの分類、ラベル付けが必要
- KAGRAとLIGOの検出器構成が異なるため、必ずしも同じ形状のグリッチが発生するとは限らない
- **教師なし学習による雑音分類**の手法を確立して、Gravity Spyデータセットを学習・分類した
- ▶ “Unsupervised learning architecture for classifying the transient noise of interferometric gravitational-wave detectors”, Sakai+, 2022
- ▶ “Training Process of Unsupervised Learning Architecture for Gravity Spy Dataset”, Sakai+, 2022

教師なし学習による雑音分類 (Sakai+ 2022)

2つの深層畳み込みニューラルネットワークの組み合わせ

1. 変分オートエンコーダ (Variational Auto Encoder :VAE)
2. 不変情報クラスタリング (Invariant Information Clustering : IIC)

- 突発性雑音の画像を入力データとして変分オートエンコーダを学習
 - エンコーダ：入力画像から特徴量を抽出
 - デコーダ：特徴量から入力画像を再構成

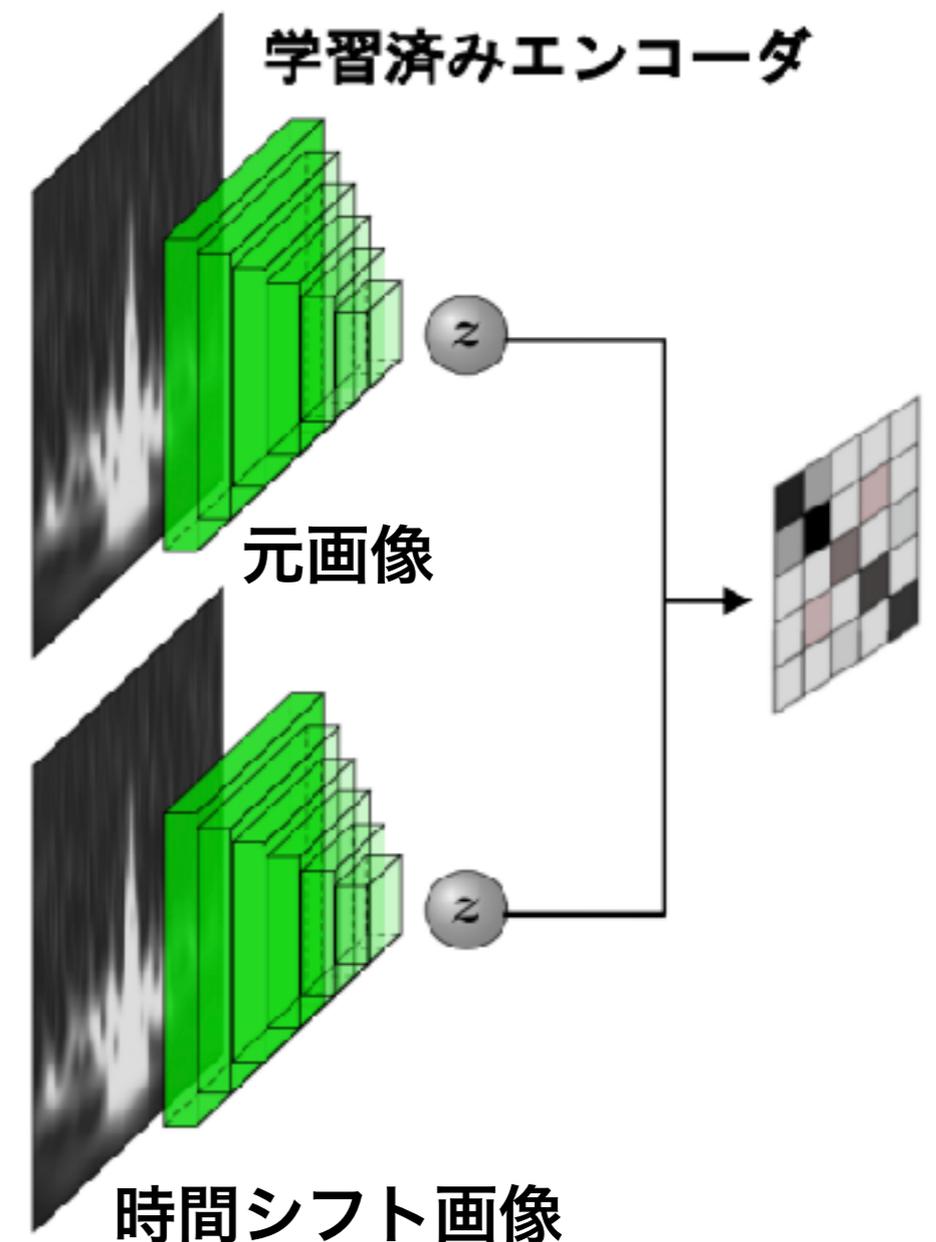


教師なし学習による雑音分類 (Sakai+ 2022)

2つの深層畳み込みニューラルネットワークの組み合わせ

1. 変分オートエンコーダ (Variational Auto Encoder :VAE)
2. 不変情報クラスタリング (Invariant Information Clustering : IIC)

- 学習済みのVAEのエンコーダを用いて、突発性雑音の特徴量から不変情報クラスタリングの学習を行う
- 突発性雑音を時間中心で切り抜いた画像と、中心からランダムに $\pm 24\text{px}$ だけ左右にシフトしてから切り抜いた画像をペアとして扱う

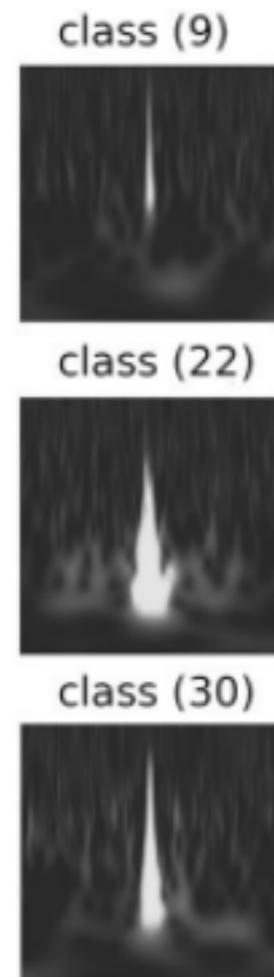


教師なし学習による雑音分類 (Sakai+ 2022)

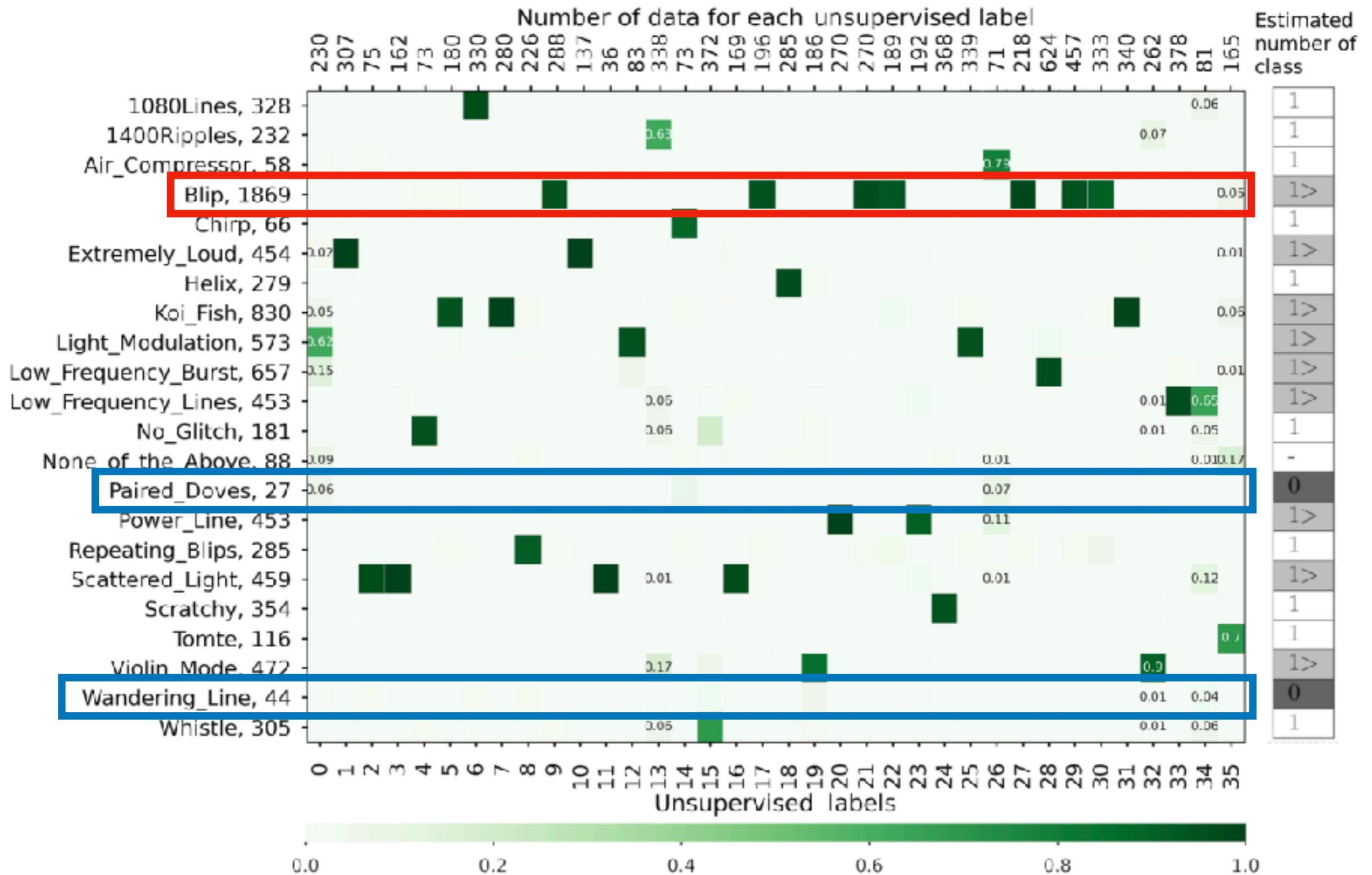
- 計算機資源:NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti x2
- 学習データ : 8583枚(Gravity Spy LIGO O1データセット)に対し時間方向にシフトさせて49種類の異なる画像を作成

- 結果

- 精度 : 90.9% (Gravity Spy projectでは97.1%, Zevin+ 2017)
- Gravity Spyの分類より細かいクラスに分類できた



教師なし学習による雑音分類 (Sakai+ 2022)



まとめ

- 教師なし学習を用いて、突発性雑音を90.9%の精度で分類可能
 - VAE + IIC
 - 教師あり学習の場合は 97.1%
- 人間による分類より細分化したクラス分けが可能

- 今後の予定
 - LIGOの最近(O2, O3)の観測データセットに適用して画像分類を行う
 - KAGRAのデータセットを作成し、Sakai+ (2022)で開発した教師なし学習による分類を行う