

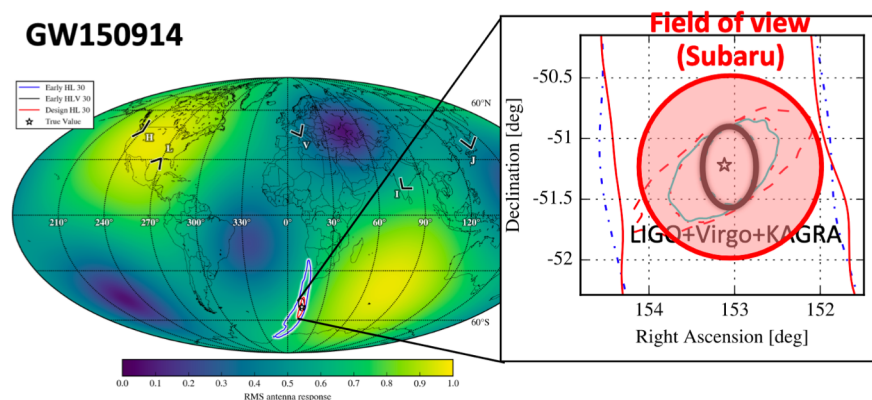
重力波干渉計KAGRAの 突発的なノイズの解析

小坂井 千紘 (重力波プロジェクト)

2020/1/17 @国立天文台三鷹キャンパス

KAGRA

- レーザー干渉計を使った重力波望遠鏡。
 - 地下に建設。
 - 連星合体イベントやバーストイベントをLIGO/Virgo と同時観測することで、到来方向の測定精度向上が期待される。



Localization area (realtime analysis)

LIGO: 600 deg² => 300 deg²

LIGO + Virgo: 5.5 deg²

LIGO + Virgo + KAGRA: 1.2 deg²

<https://arxiv.org/pdf/1703.08988.pdf>
TAUP2019 talk by M. Tanaka

干渉計ノイズ

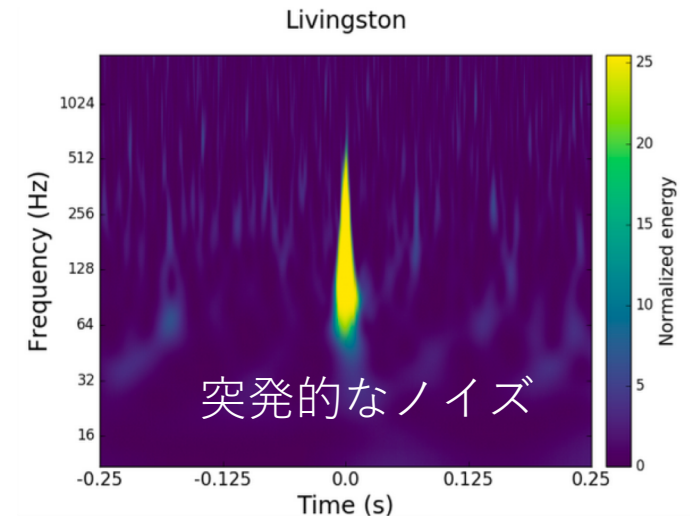
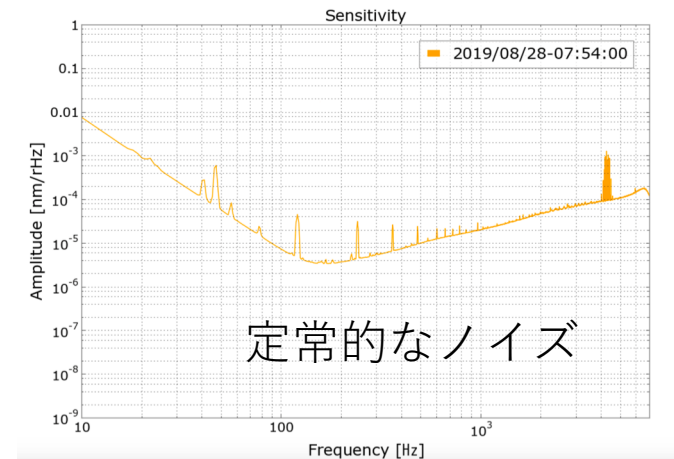
● ノイズは大きく2種類に分けられる。

1. 定常的なノイズ

- 時間的に局在しない雑音によるもの。

2. 突発的なノイズ

- **グリッチ(Glitch)**と呼ばれている。何らかのハードウェア側の原因で、検出器に大きな信号が現れることがある。

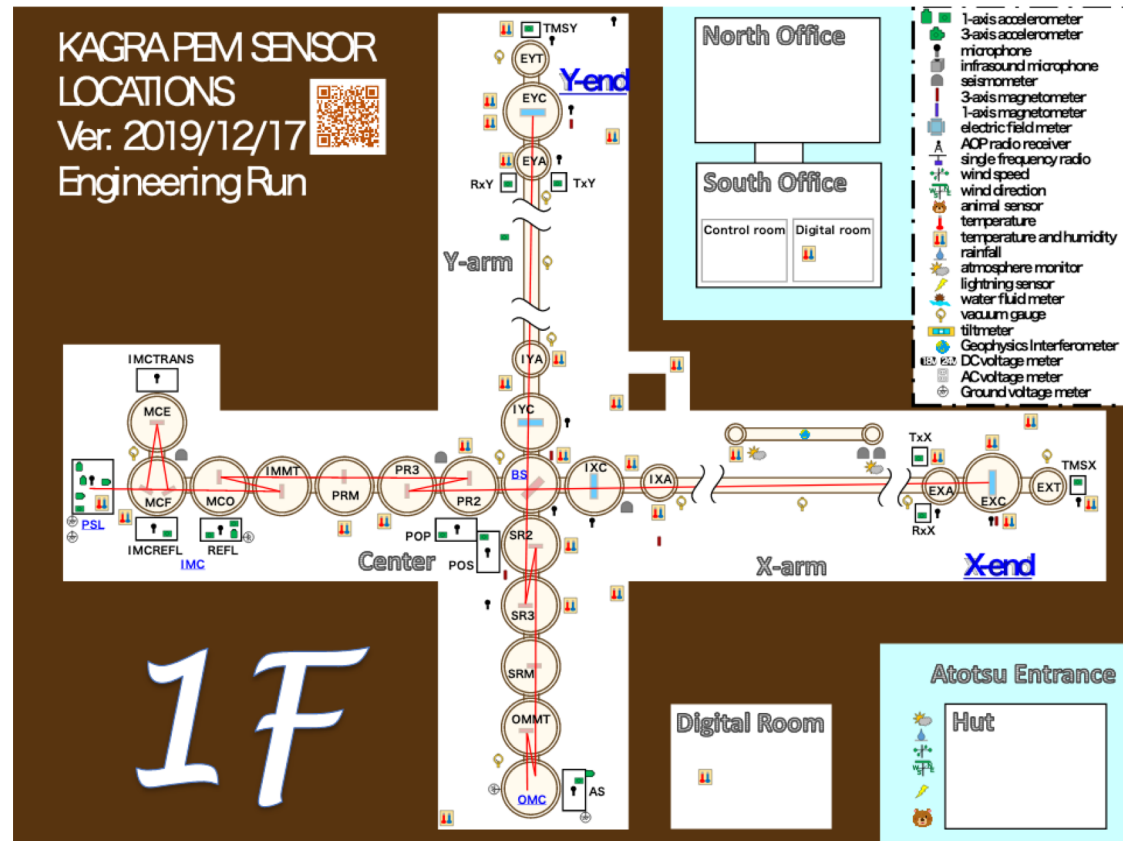


グリッチノイズの調査

- モチベーション
 - データ解析におけるグリッチノイズ
 - 連星合体・バーストイベントなどの重力波信号と、ハードウェア由来のノイズとを区別する必要がある
 - 干渉計ハードウェアにおけるグリッチノイズ
 - そもそもグリッチノイズが起こる原因が何かを突き止めて、原因を取り除いたり影響が出なくなるように改良して、感度を向上させたい
- グリッチノイズ調査では、重力波信号以外の、光学系・鏡の防振系や環境についても調べる必要がある。

ノイズ源モニター

- 環境ノイズを含め、様々なノイズ源がある
 - 地震
 - 雷
 - 音
 - 振動
 - 電気回路ノイズ
 - ...
- これらのノイズ源を特定できるように、干渉計の要所要所に環境モニターも設置。



突発的なノイズの調査

- シンプルに、プロットを目視で調べてノイズの原因を調査できるツール (GlitchPlot) を開発した。
 1. 突発的なノイズの探索には Virgo で開発された既存ツールや、データ解析パイプラインからのトリガーを利用
 2. 1. の結果を元にハードウェアの状態や環境を見られる各チャンネルのプロットを作成
 3. コヒーレンスやQ変換を使って、原因と関連しそうなチャンネル候補リストを作成
 4. ICRR譲原さんに協力していただいて、Webページで一覧でき、また推定した原因を投稿できるようにした。
- ✓ 重力波イベント候補が見つかった時に、簡易的に検出器の状態を確認するツールとしても利用可能
- ✓ ロックロスの調査にも利用可能

プロット作成

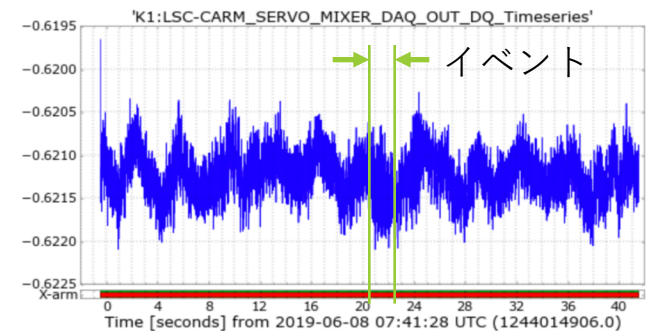
- 基本的なプロットを複数、影響がありうる各チャンネルについて用意。
 - 時系列
 - 時系列(グリッチの帯域のみ
フィルターをかけたもの)
 - スペクトル
 - スペクトログラム
 - Q-transform
 - コヒーレンスグラム
 - メイン(トリガー)チャンネル
 - 上流のチャンネル
 - 制御に使うチャンネル
 - 防振系のチャンネル
 - 環境モニターチャンネル など
- グリッチには様々な種類があるので、プロットにする時に個々の性質によってパラメータ調整が必要。

→ トリガーの情報を使ってプロットに使うパラメータを自動設定

プロットパラメータ設定

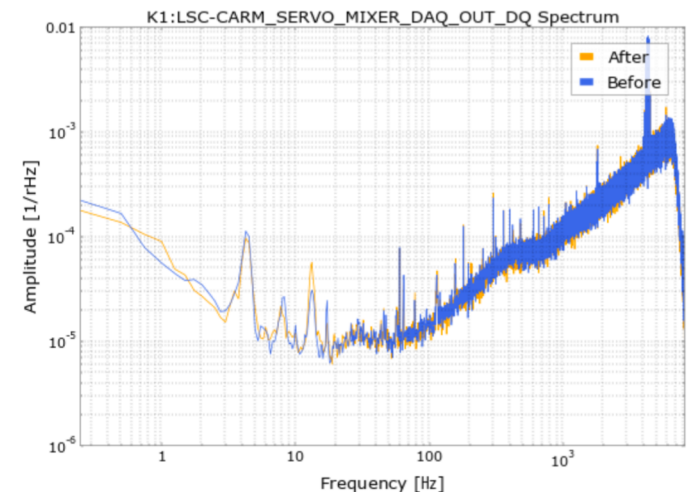
● 時系列プロット

- 直前直後の状況も見えるように、イベントの長さの10倍ずつ前後にとる。ただし、短すぎる場合は2秒ずつに伸ばす。
 - ✓ イベントがプロットの中心の見やすい位置になる
 - ✓ 後述のスペクトログラムに合わせて調整
- トリガー周波数帯域のみフィルターしたのもも作成



● スペクトル

- イベント期間+2秒のマージンを取って、前後のスペクトルを見る。(イベント自体のスペクトルは別のプロットで)
 - ✓ イベントの影響が残っていないかをみる
- イベントのバンド幅に合わせて、十分な周波数分解能を設定。



プロットパラメータ設定

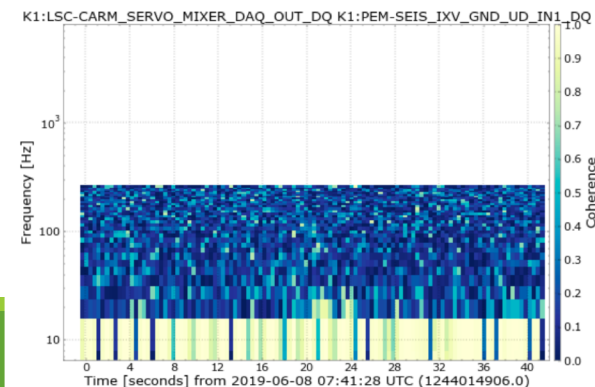
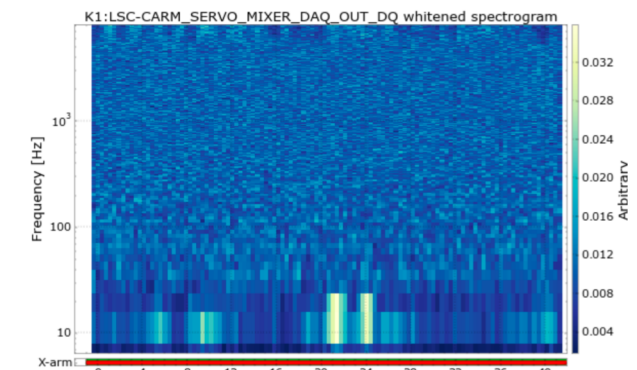
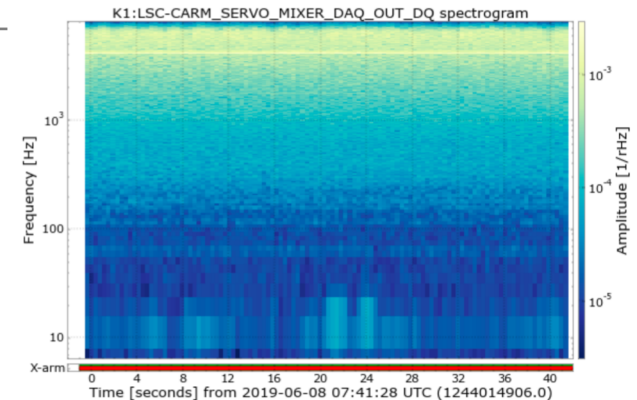
- スペクトログラム：

$$X(\omega, t) = \int_{-T}^T x(\tau) w(t - \tau) e^{-i\omega t} d\tau$$

- 時間ビン幅がイベントより短くなるように設定
 - 周波数分解能とトレードオフになる。イベントが短い場合はイベントの長さの半分、長い場合はトリガー情報の時間幅に応じて設定。
- ホワイトニングしたものもプロットする
 - ホワイトニング：各周波数成分の大きさを規格化し、時間変化を見やすくする。

- コヒーレンスグラム：
$$\text{coh}^2(\omega) = \frac{|S_{xy}(\omega)|^2}{S_{xx}(\omega)S_{yy}(\omega)}$$

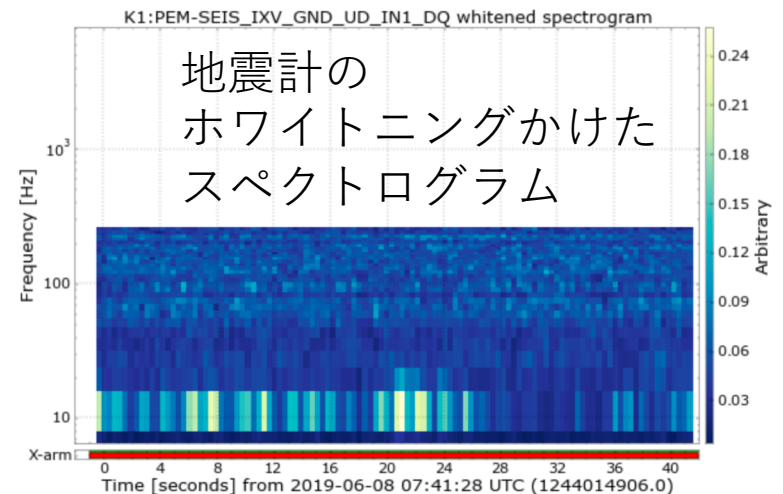
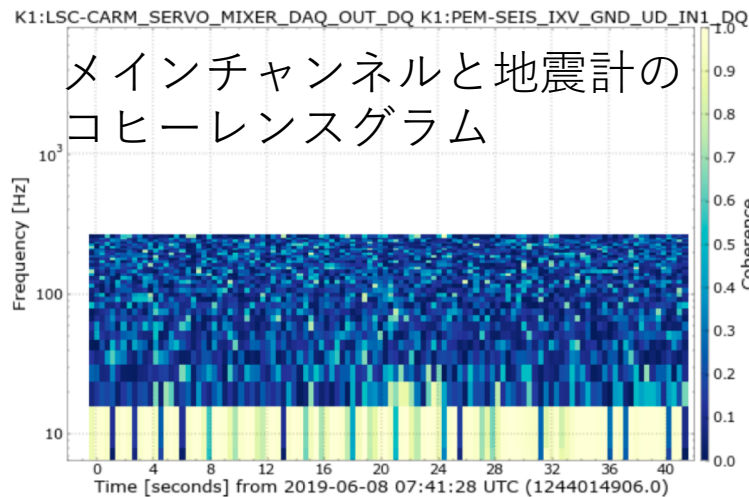
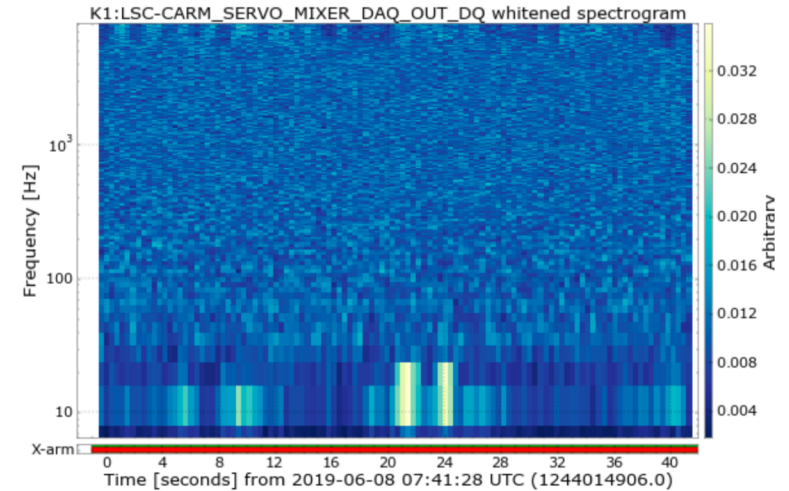
- スペクトログラムと同じパラメータを利用。



雑音によるグリッチの例

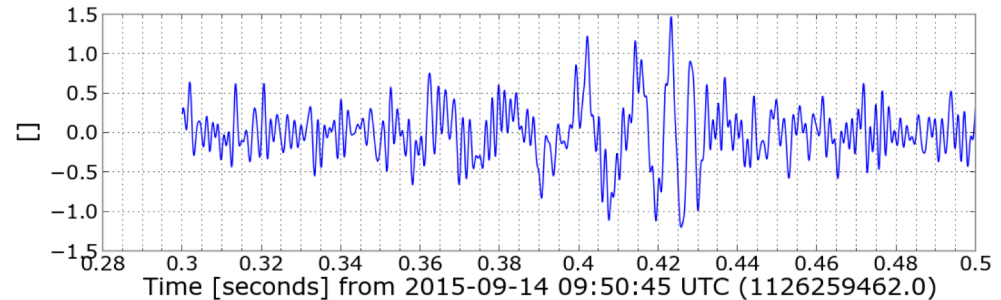
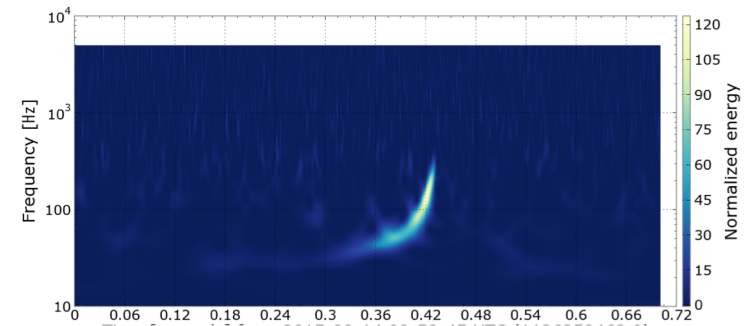
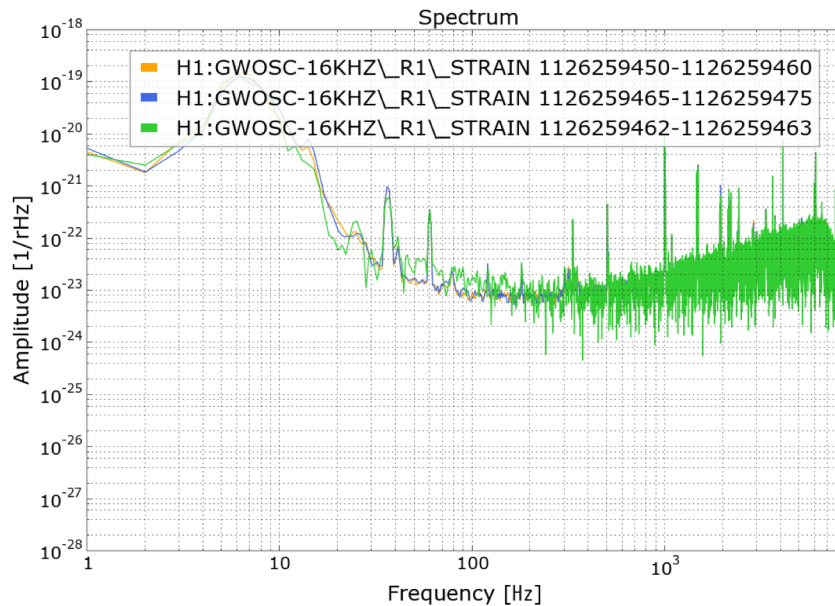
メインチャンネル

- このイベントでは、メインチャンネルでグリッチが見えている周波数・時間帯に地震計でも目立った信号が見えており、コヒーレンスグラムからも相関があることがわかる。



連星合体イベント用パラメータ設定

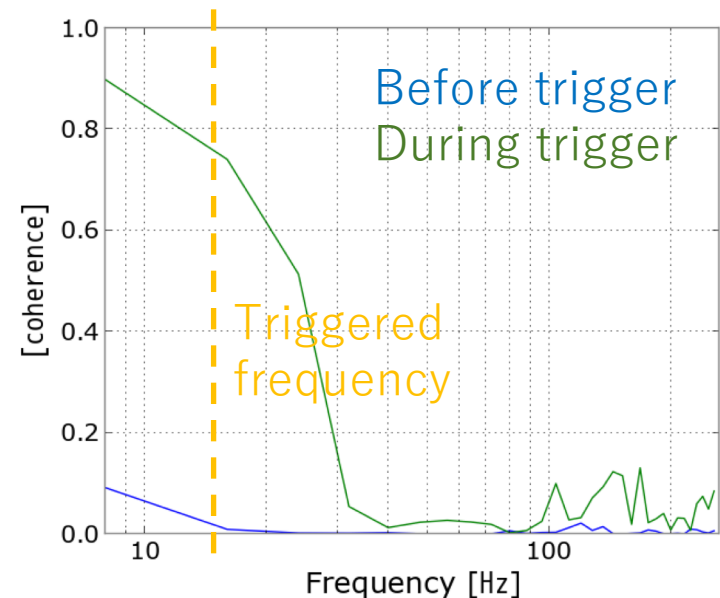
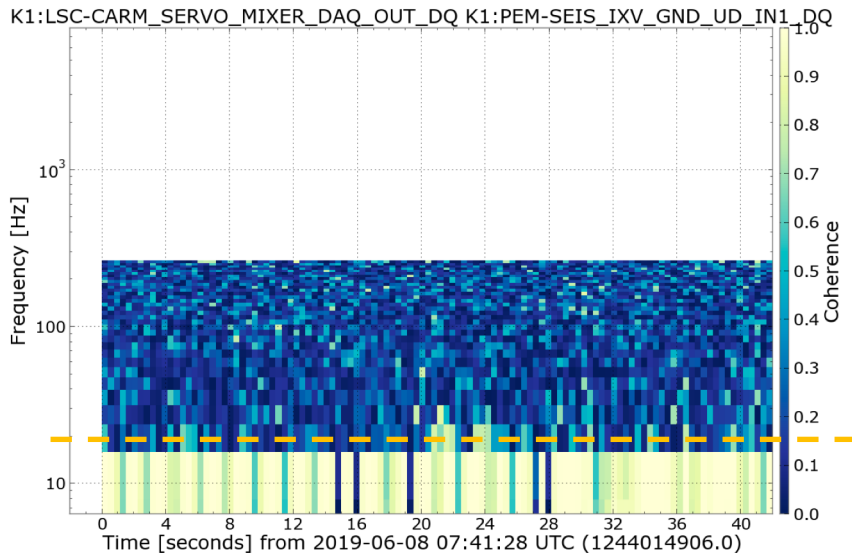
- LIGO の観測データ (GW150914, GW170817) を基に、波形の特徴が見えるようなパラメータ設定を決定。



グリッチ原因と関連するチャンネルの選別

1. コヒーレンスを使った原因候補の探索

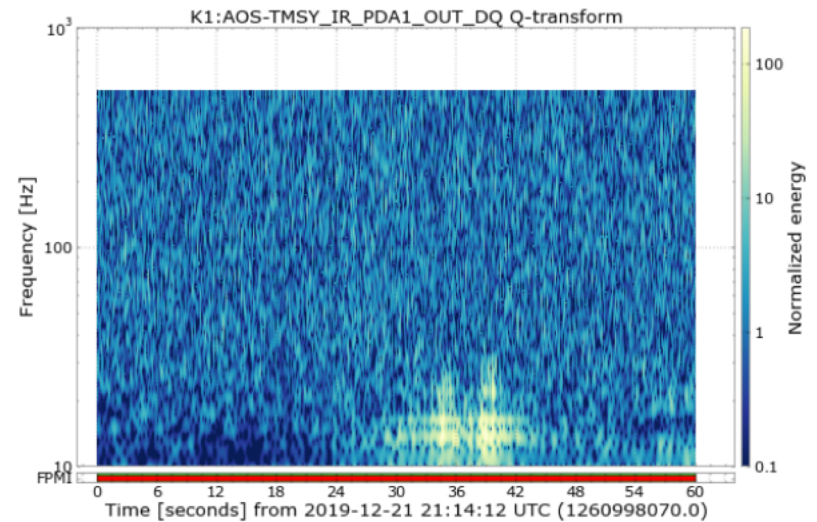
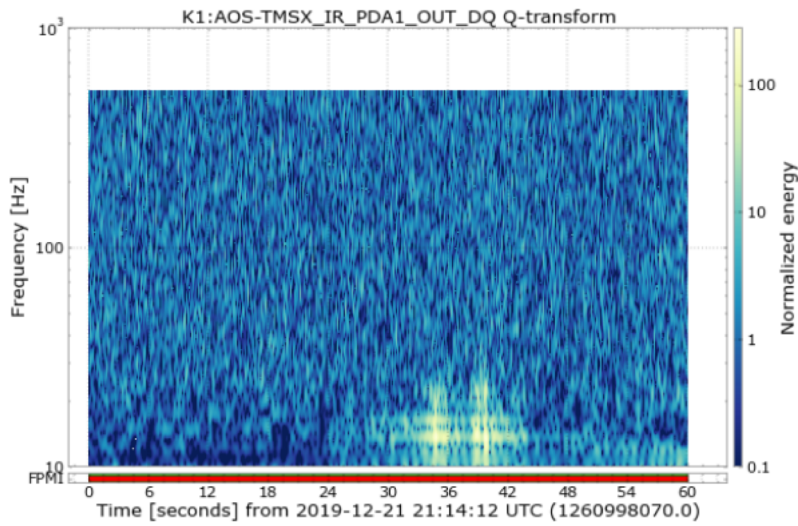
- 普段メインチャンネルとコヒーレンスがなくて、グリッチのタイミングだけ大きな値が出ているようなチャンネルを探す。



グリッチ原因と関連するチャンネルの選別

2. Q変換を使った原因候補の探索

- トリガーのあった時間または1秒前までにグリッチが見られるチャンネルを探す。
- 非線形な関係の場合などはコヒーレンスで見ることができないので、こちらで見つけられるように緩めの条件でリストを作る。



情報の集計

- Google spread sheet を利用して、各イベントの調査結果を送信してもらい、集計を行います。
- この結果を基に、ハードウェアの改善や、veto フラグの開発を行います。

KAGRA summary

GlitchPlot channel **General** PSL IMC VIS PEM GlitchPlot JST : 20190608

[Back to trigger list](#) [List of Date\(all\)](#)

Yuzu summary needs your help to classify the glitch origin.

1. Fill your name
Your name:
2. Are you familiar with the latest KAGRA?
 Yes (On-site researcher) No (Off-site researcher)
- 3-1. Suspect the glitch origin.
No idea:
- 3-2. If you want, you can specify the sensor and location where the glitch was found.
Sensor: Location:
4. Add any suspects about the origin, comment, request, or fan letter to developers.
comment or fan letter:

Thank you in advance, we really appreciate your help.
You can see the result in [GlitchPlot Catalog](#).

GlitchPlot Catalog ☆

ファイル 編集 表示 挿入 表示形式 データ ツール アドオン ヘルプ

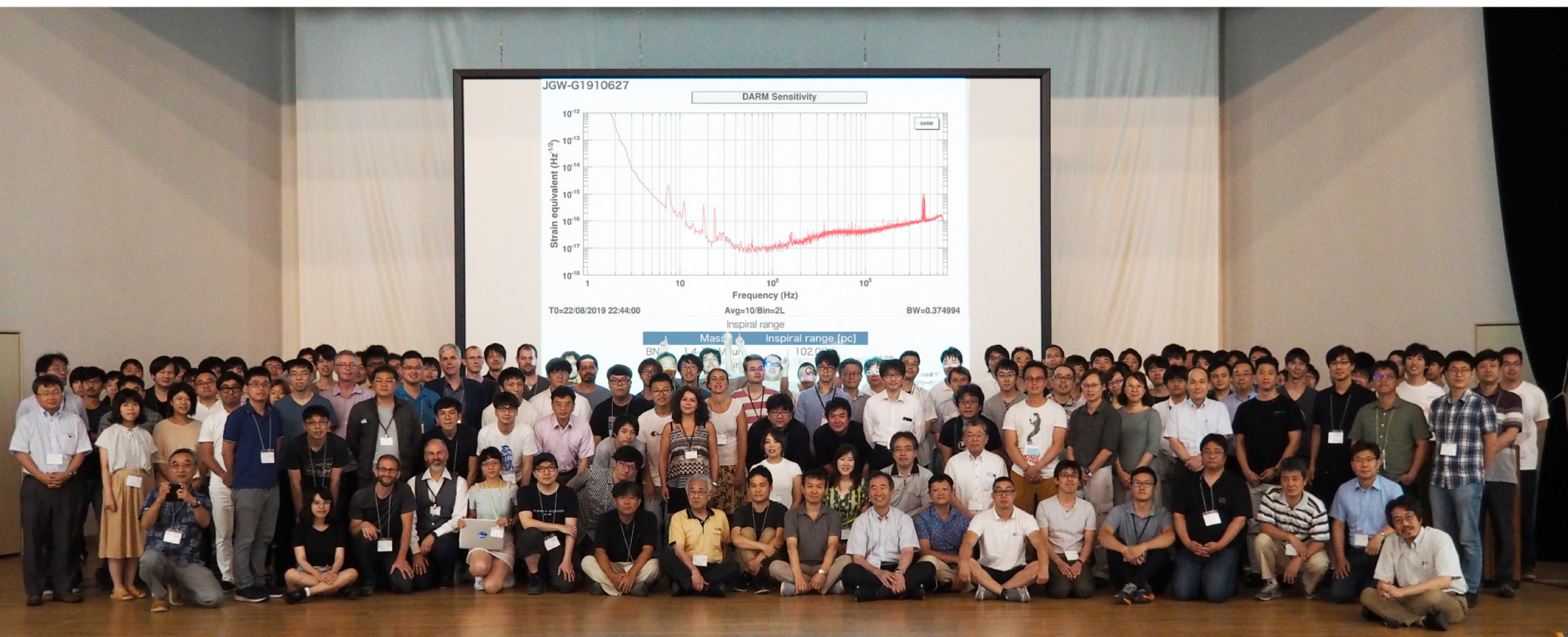
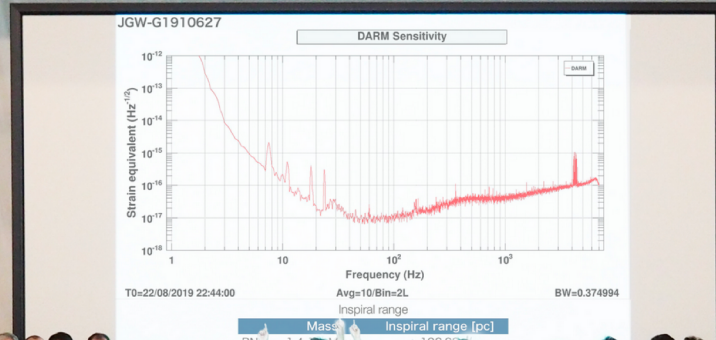
https://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~yuzu/bkAGRA_summary/html/GlitchPlot/20191217/1260592876.25_K1-CAL-CS_PROC_DARM_DISPLACEMENT_DQ.html

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I
#	submit date	submitter name	# onsite or offsite	trigger channel name	glitch class	sensor	location	comment	# GPS
14	2019/11/06 10:46:55	Chiro Kozakal	Onsite	K1-CAL-CS_PROC_C00_STRAIN_DBL_DQ	Seismic activity	Accelerometer	PSL	The noise source is not clear. It maybe upconversion event. PEM with glitch accelerometer: MCF, PSL(per1, per2, table2, portable2), TMSX microphone: EYC, OMC seismometer: IXV, EXV Affected oplev ETMX Y, ETMY Y, ITMX PY, SR2 P, SR3 L, SRM P	1256
15	2019/11/06 11:41:44	Chiro Kozakal	Onsite	K1-CAL-CS_PROC_C00_STRAIN_DBL_DQ	Seismic activity	Seismometer	Center	PEM with glitch ACC PSL PORTABLE1, ACC TMSY, MAG EYC, SEIS EXV, SEIS IXV Oplev with glitch ETMY Y, ITMY LY, PR2 P, PR3 PY, SR2 P, SRM P	1256
18								The noise source is not clear. Upconversion event or noise propagation was strange at that time ? Magnetometer in BS and EXC show coherence increase with triggered glitch but spectrograms seems stable. PEM with glitch	

まとめ

- 重力波干渉計では、グリッチノイズと呼ばれる突発的なノイズが問題になる。
- ノイズ源特定のために、制御信号などだけでなく各部分の光学的な情報や、鏡の防振系の情報、環境モニターの情報などのデータを取得している。
- グリッチノイズの調査のために、GlitchPlotを開発し、調査に必要なプロットが自動で生成できるようにした。
- GlitchPlotを使って、重力波イベント候補がノイズかどうかの判別をしたり、問題になるノイズ源の特定を行っていく予定である。

Thank you for listening !



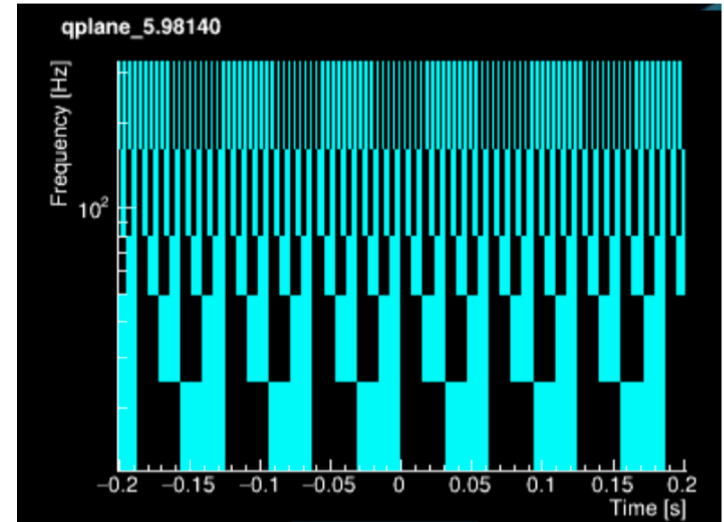
突発的なイベントの探索

- F. Robinet 氏開発のソフトウェアライブラリ：Omicron を利用。
 - Q-transform を使って、**SNR の大きい時間-周波数領域を探索**
 - Q-transform : 時間幅を周波数に応じて調整したスペクトログラム。

$$X(\tau, \phi, Q) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)w(t - \tau, \phi, Q)e^{-2i\pi\phi t} dt.$$

$$w(t - \tau, \phi, Q) = \frac{W_g}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2\sigma_t^2} (t - \tau)^2 \right], \quad \sigma_t^2 = \frac{Q^2}{8\pi^2 \phi^2}$$

- 複数のQ値に対して行い、それぞれでSNR の大きい領域のリストを出力する
- Omicron から時刻、周波数、バンド幅、長さ、SNR などの情報が得られる。



- Omicron では1つのイベントに対して、複数のQ値での結果や複数の周波数・時刻での結果が出ることが多い。今回は連続あるいは重なった時刻の出力を合わせて1イベントとみなす。