

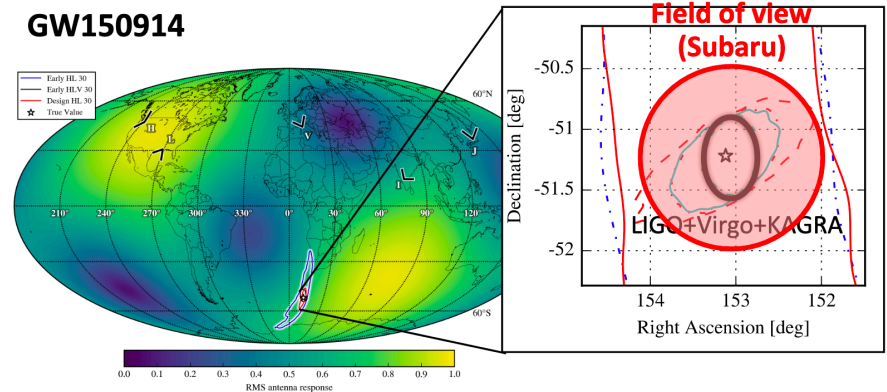
重力波観測実験 KAGRAにおける 突発的雑音解析

小坂井 千紘 (国立天文台)

2021/1/8 第7回超新星ニュートリノ研究会

KAGRA

- レーザー干渉計を使った重力波望遠鏡。
 - 神岡鉱山の地下に建設。低温の鏡を使い、熱雑音を抑える。
 - 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

バーストイベント探索

- 重力波形についての仮定をあまりおかずに短時間のイベントを探索する
 - 超新星爆発など重力波形の理論予想が難しいもの
 - 特定の天体現象にターゲットを絞らず網羅的に重力波イベントを探す
- 波形から重力波イベントと特定することができないので、検出器ノイズとの区別をつけることが重要。

重力波干渉計のノイズ

- ノイズは大きく 2 種類に分けられる。

1. 定常的なノイズ

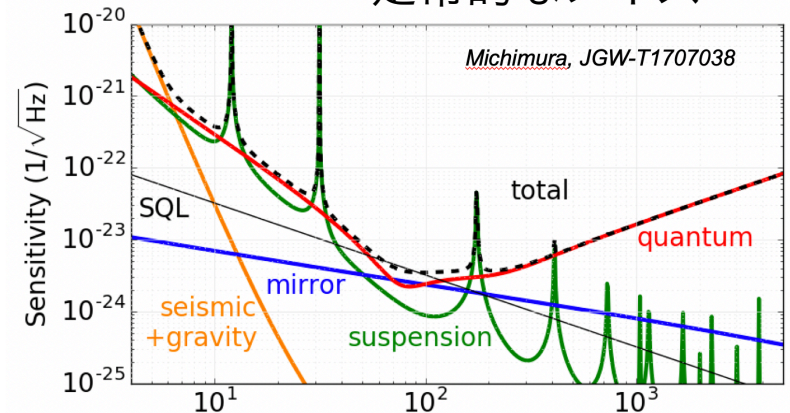
- 時間的に局在しない雑音によるもの。

2. 突発的なノイズ

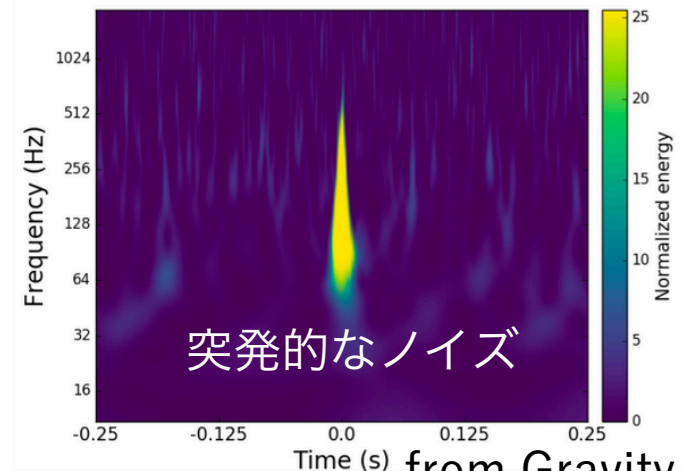
- **グリッチ(Glitch)**と呼ばれている。何らかのハードウェア側の原因で、検出器に大きな信号が現れることがある。

- 本講演では、特に 2. 突発的なノイズについて述べる。

定常的なノイズ



Livingston



from Gravity Spy

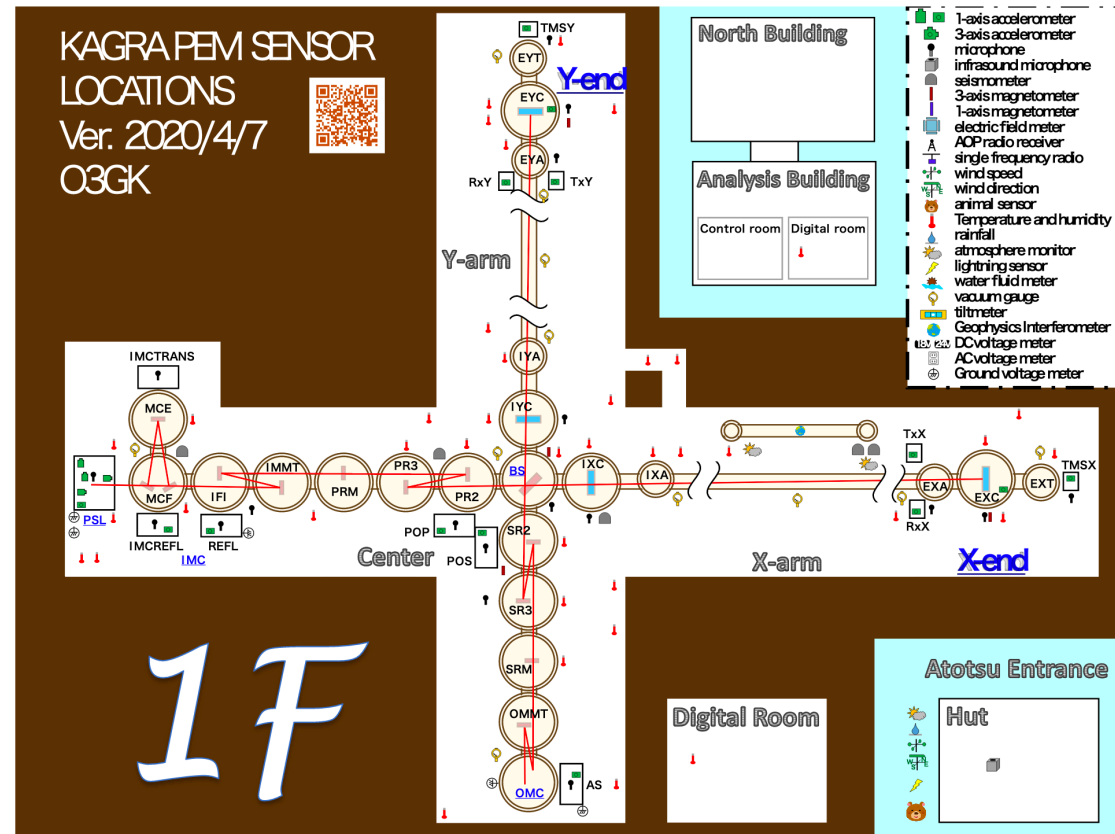
ノイズ源モニター

by T. Washimi

- 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ツール開発

- 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 (オミクロン) や、データ解析パイプラインのトリガーを利用
 2. 各トリガーについて、ハードウェアの状態や環境データのプロットを作成
 3. プロットをウェブページで一覧でき、推定した原因をフォームから投稿できるようにした。

特にリアルタイムでの探索で検出器の状態を確認するためのツールとして開発。他、グリッチノイズやロックロスの調査に利用。

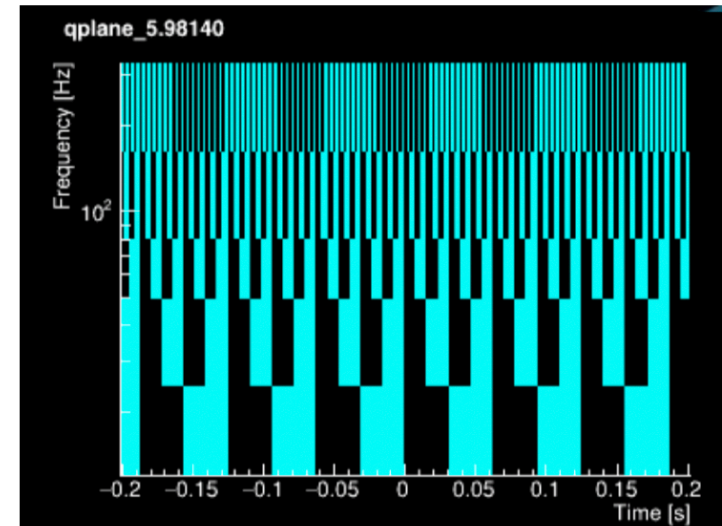
突発的なイベントの探索

- F. Robinet 氏開発のソフトウェアライブラリ：Omicron を利用。
 - Q変換 を使って、**SNR の大きい時間-周波数領域を探索**
 - Q変換：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、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。



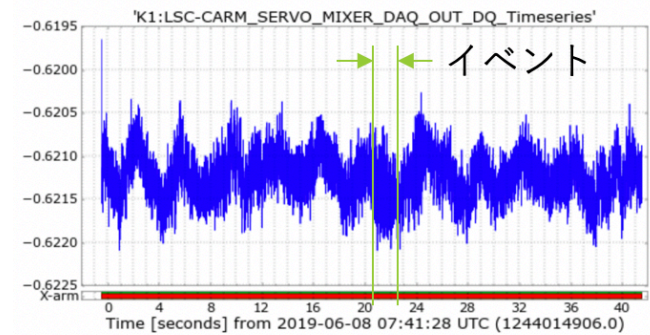
プロット作成

- 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変換
 - コヒーレンスグラム
 - メイン(トリガー)チャンネル
 - 入射レーザー関連のチャンネル
 - 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

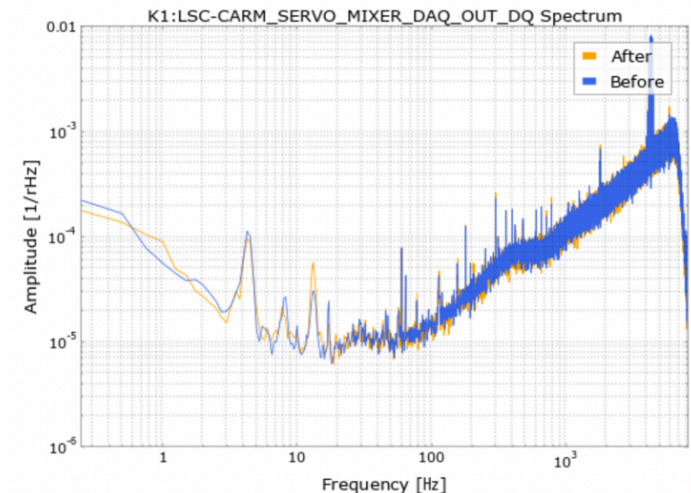
● 時系列プロット

- 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。
 - ✓ イベントがプロットの中心の見やすい位置になる
- 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

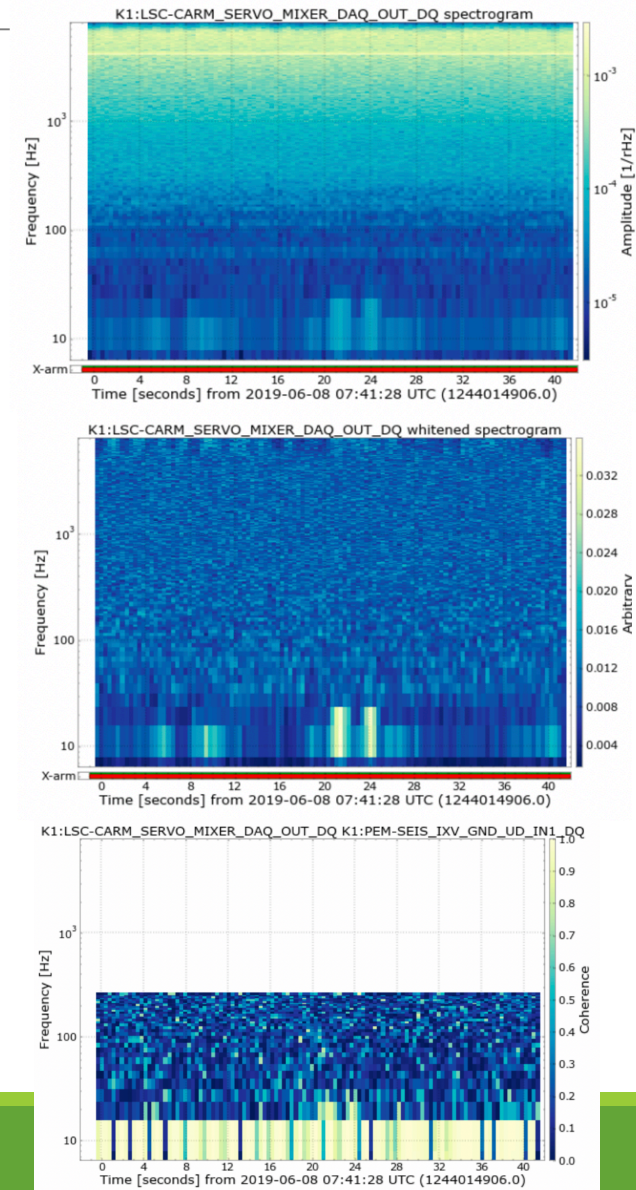
- スペクトログラム :

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

- 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。



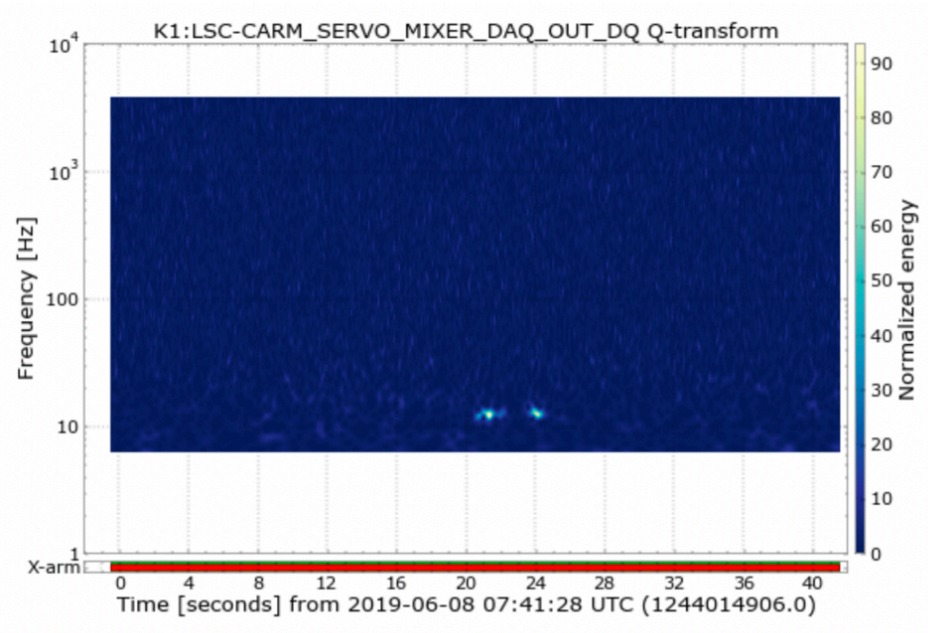
プロットパラメータ設定

● Q変換

- パラメータ Q を、探索で使った値に設定。

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

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

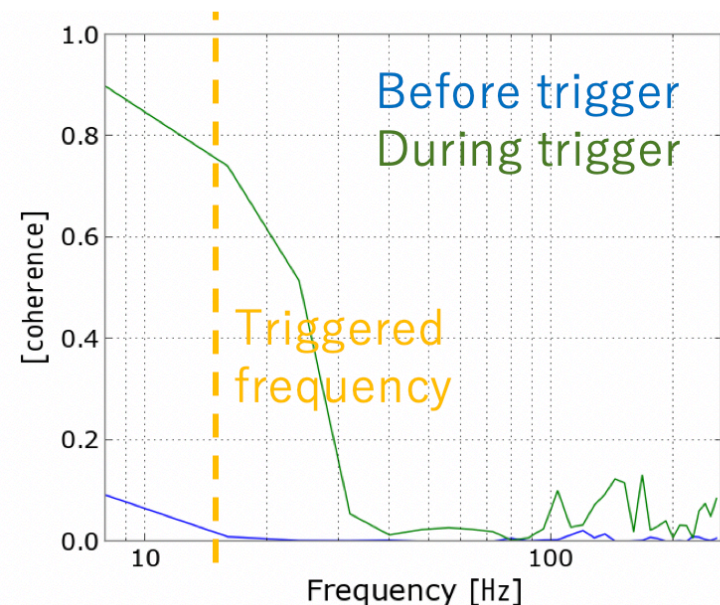
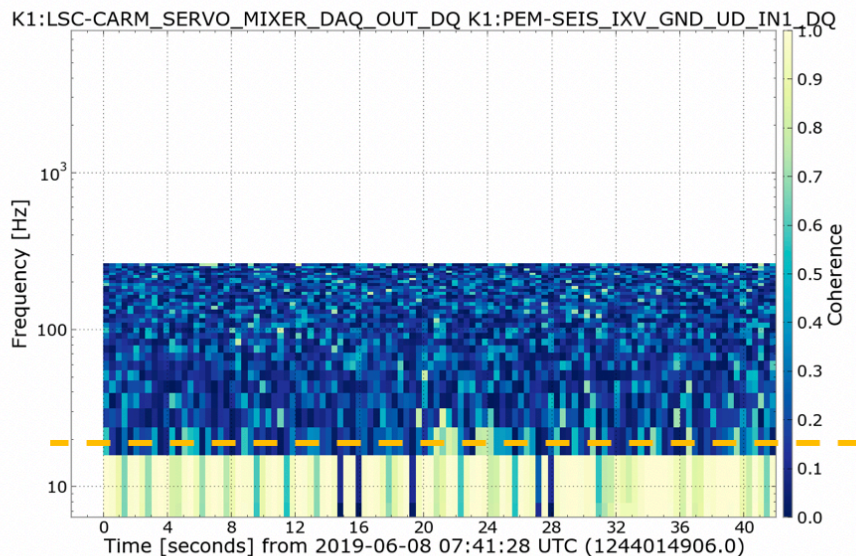


グリッチ原因と関連するチャンネルの選別

- チャンネルが多数あるので、特に関連がありそうなチャンネルを自動で選別。

1. コヒーレンスを使った原因候補の探索

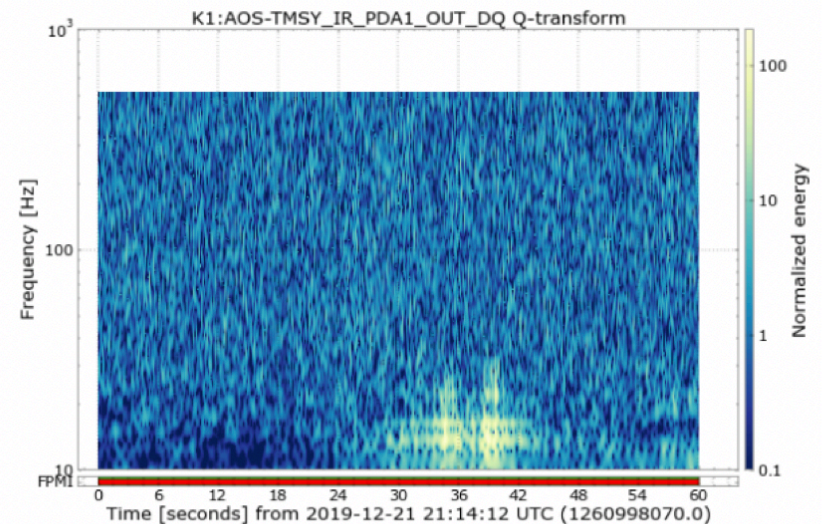
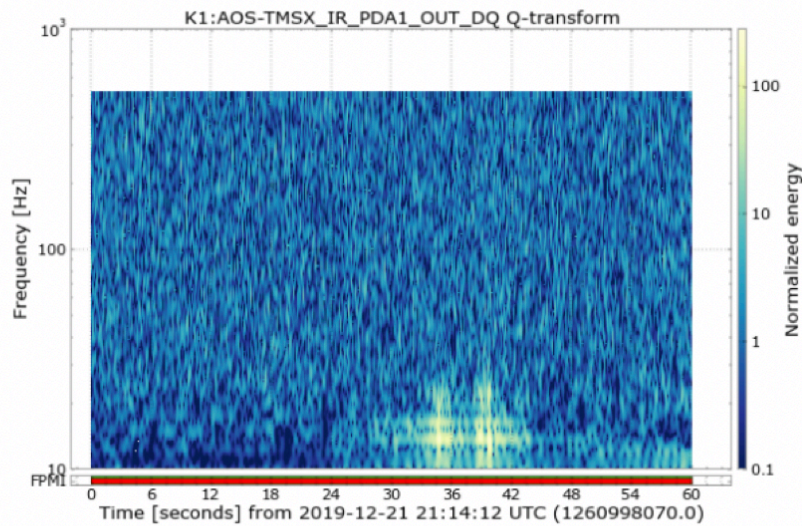
- 普段メインチャンネルとコヒーレンスがなくて、グリッチのタイミングだけ大きな値が出ているようなチャンネルを探す。



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
2. Are you familiar with the latest KAGRA?
 Yes (On-site researcher) No (Off-site researcher)
- 3-1. Suspect the glitch origin.
- 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.

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

100% 閲覧のみ

https://www.icrt.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 offline	trigger channel name	# glitch class	# sensor	# location	# comment	# GPS
14	2019/11/06 10:46:55	Chihiro Kozakai	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: DXV, EXV Affected optics ETMX Y, ETMY Y, ITMX PY, SR2 P, SR3 L, SRM P	1256
15	2019/11/06 11:41:44	Chihiro Kozakai	Onsite	K1:CAL-CS_PROC_C00_STRAIN_DBL_DQ	Seismic activity	Seismometer	Center	PEM with glitch ACC PSL PORTABLE1, ACC TMSY, MAG EYC, SEIS EXY, SEIS IXV Optics with glitch ETMY Y, ITMY LY, PR2 P, PR3 PY, SR2 P, SRM P	1256
16								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	

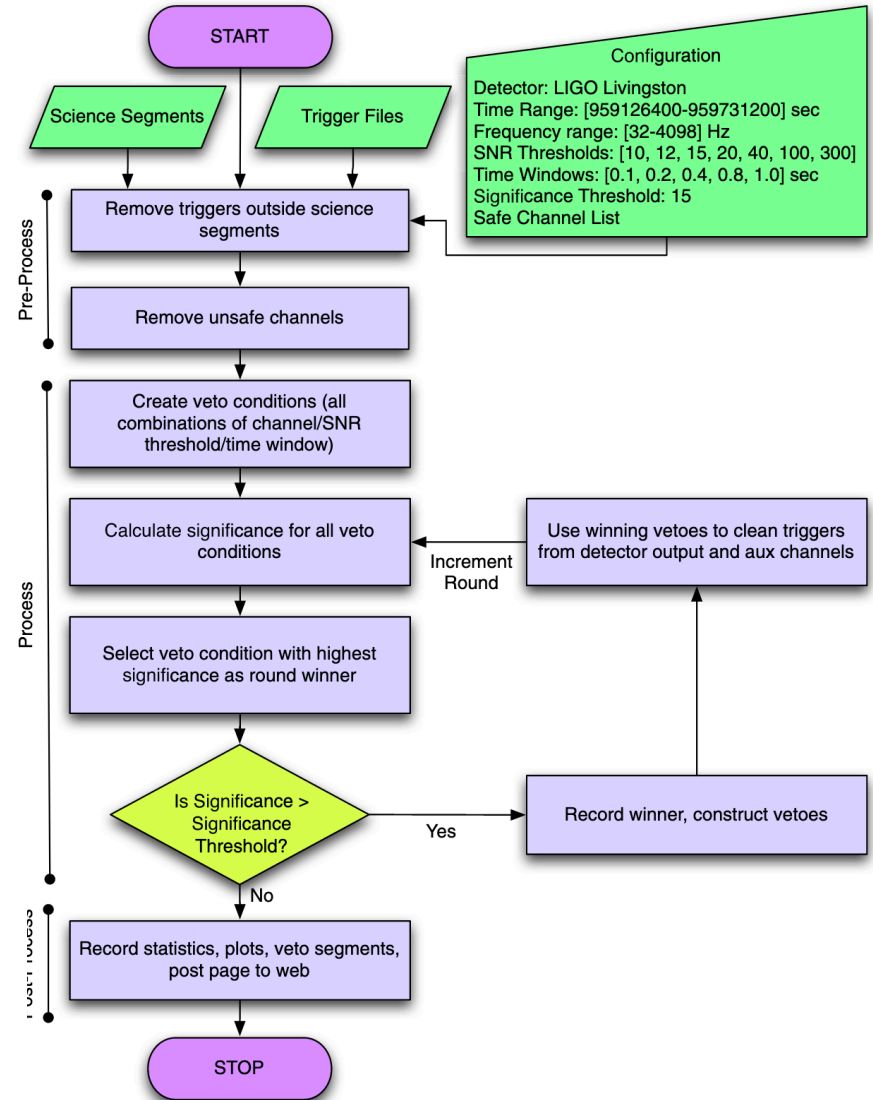
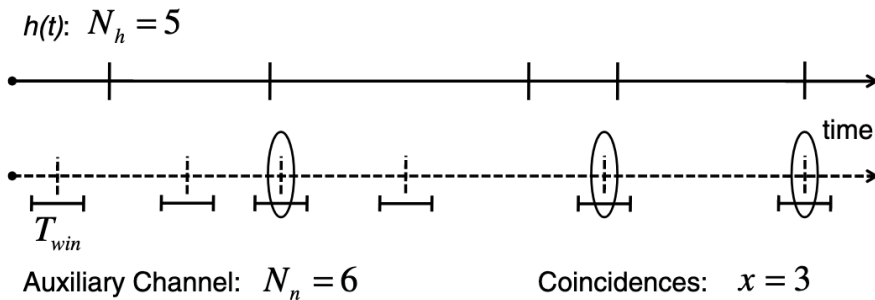
オフラインノイズ解析

- 統計的にノイズ源を特定し、検出器由来のグリッチノイズの時刻を特定する。
- LIGO で開発された Hveto (Hierarchical veto) というソフトウェアを利用。

Hveto

- オミクロンの結果を各チャンネルのトリガーとして使う。
- Significance は、ランダム分布の場合にタイミングが一致する確率から計算される。

$$S = -\log_{10} \left(\sum_{k=n}^{\infty} P(\mu, k) \right)$$



まとめ

- KAGRA において超新星爆発を探索するには、重力波イベントと検出器の突発的なノイズを区別することが重要である。
- 特にリアルタイム探索向けに、GlitchPlot というイベント候補の時刻の各データを一覧できるツールを開発した。
- イベントごとにパラメータを自動調整したり、コヒーレンスやQ変換を元にグリッチ源の可能性が高いチャンネルをピックアップしたりしている。
- オフラインでは、グリッチノイズのタイミングが一致する回数を使って統計的に検出器ノイズの特定をする。