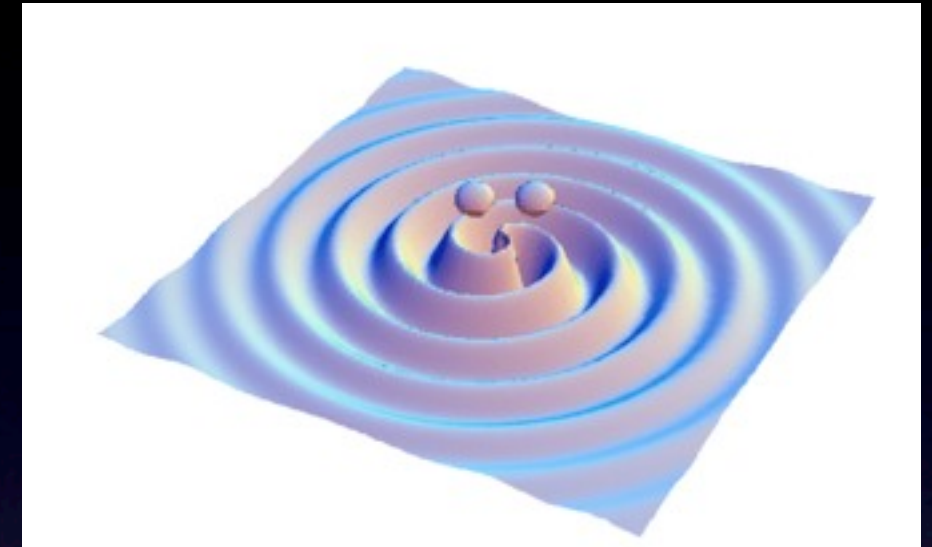


Current Status of Multi-Messenger Observations in LIGO-VIRGO Collaboration

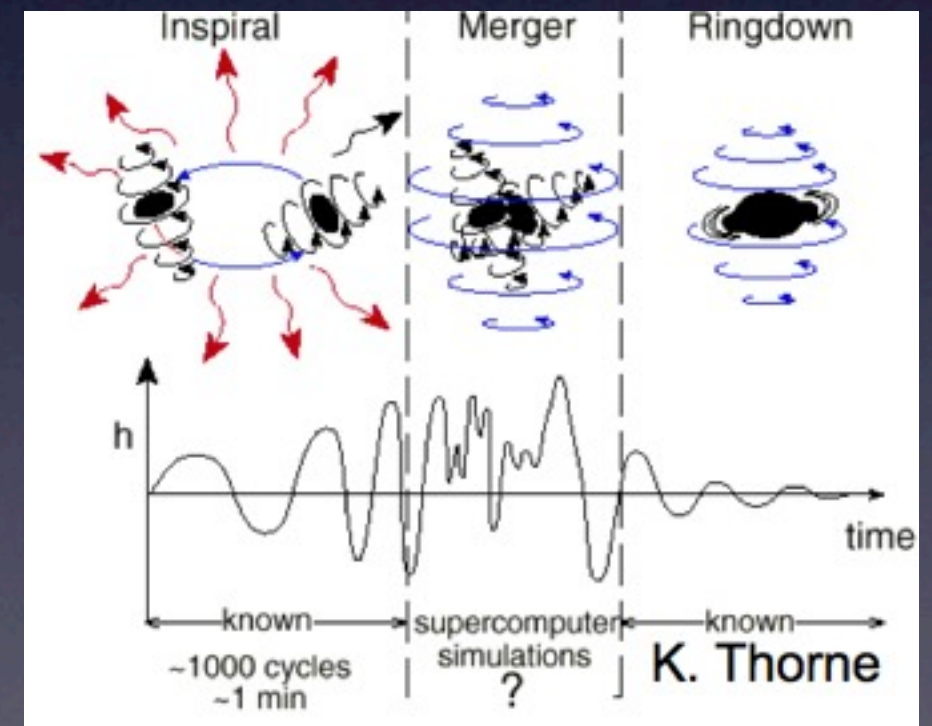
Kazuhiro Hayama (NAOJ, AEI-Hannover)

Compact binary coalescenceを例にとってみる

- 我々にはpost-Newton perturbationという武器があり、合体直前まで波形がわかる。
- データとの相関をとる最適フィルター法もある。
- 後は望遠鏡を動かして、binaryが合体するのを待つだけだ。



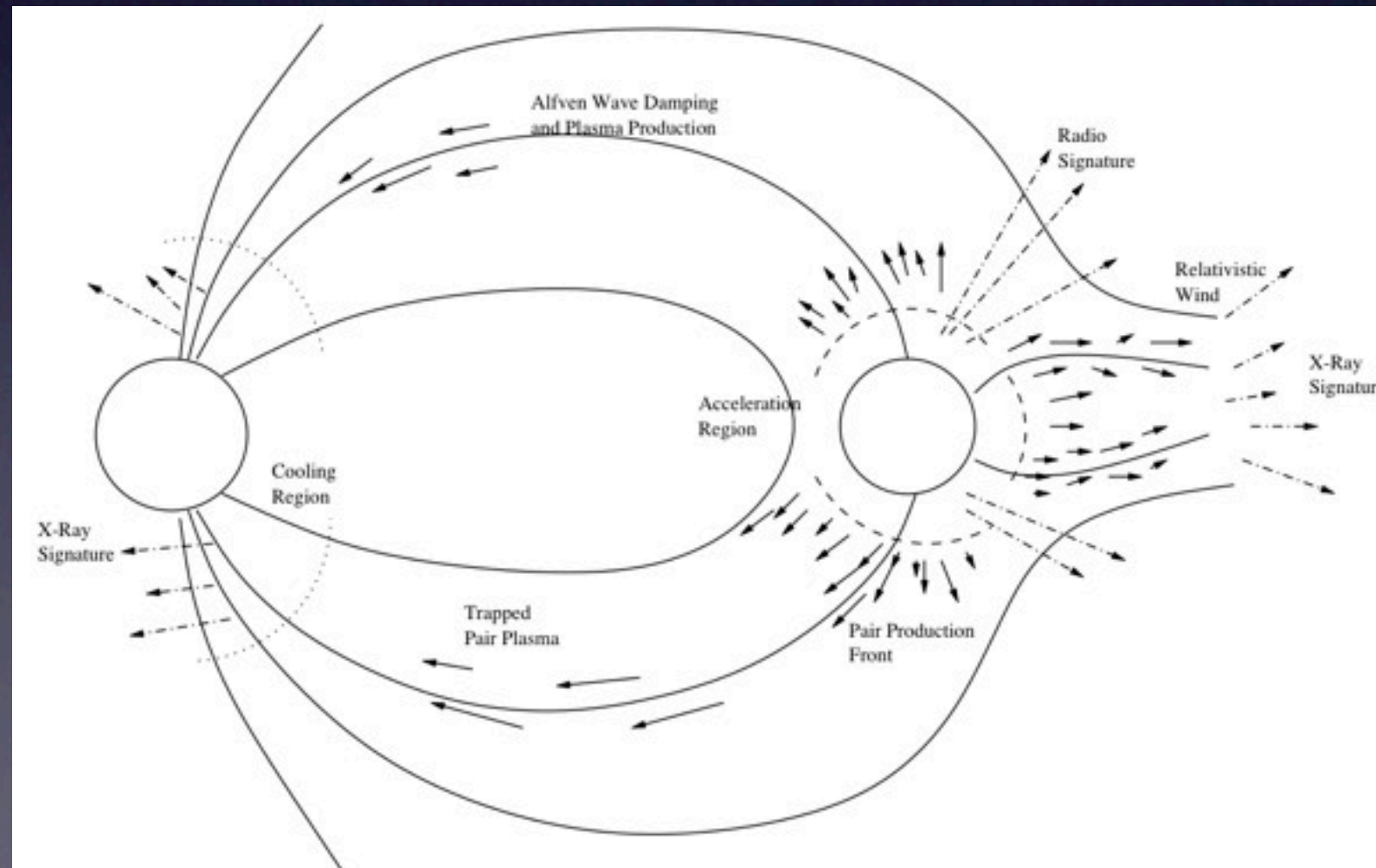
- 望遠鏡のデータには非定常成分が多いため、検出しきい値を上げざるを得ない。
- そうすると検出してしかるべきの信号さえ検出できなくなる。(LIGO S5のblind injectionなど良い例)
- 別の問題として、重力波を人類が初めて見る瞬間、付随するであろう他の天体現象が何も見なくても自信を持って検出しましたと言えるだろうか？



NS-NS BinaryまわりをEMで見ると...

X線が放射してたり、アルフヴェン波が励起してたり、プラズマがトラップされていたり、電波が出ていたり、天体現象のオンパレードであると考えられている。

これらの現象を電磁波望遠鏡で、重力波望遠鏡とリンクして観測して、信頼性の高いFirst Detectionを目指し、かつ、様々なフェーズを統合して天体現象を理解しようというのがMulti-Messenger Observationである。



Multi Messenger Observation

Astrophysics point of view

Gravitational waves

- Bulk motion dynamics
- Luminosity distance
- Progenitor mass

Electro-Magnetic waves (Light curve と Spectrum)

- Host galaxy
- Gas environment
- Redshift distance

多角的な視野からの天体現象の理解

Multi Messenger Observation

First detection point of view

- 伝統的に、初検出に必要といわれるGauss雑音でいう5シグマに到達する有力な手段

FAP~P x 時間コインシデンス x 空間コインシデンス

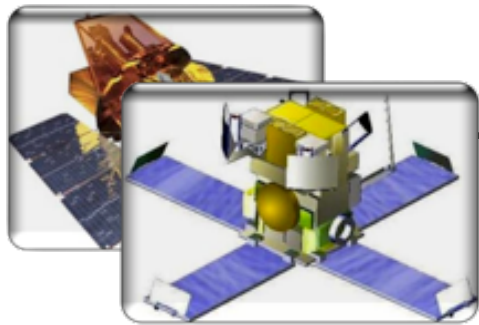
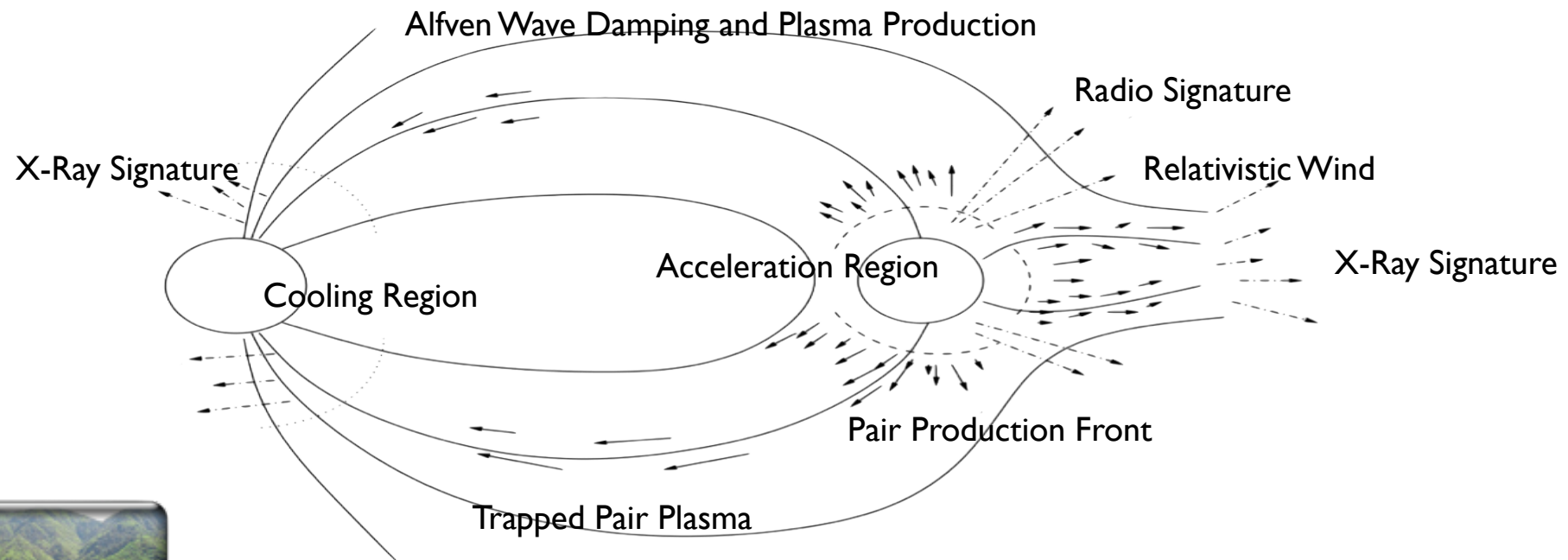
(参照：6月28日のLCGT meetingでの私の資料)

- EM follow-up型とEM triggered型があり、いわば縦糸と横糸の関係といえ、2つを合わせて重力波を捕らえる強力な網となる。

Gravitational wave sources

- Macronova (Optical)
NS-NS, NS-BH merger中にNeutron rich matterが放出、崩壊してエネルギーが放出される。
Optical rangeで magnitude@40Mpc \sim 15で約1日続く
- SGRB Afterglow(Optical)
NS-NS merger? Afterglowは既に観測されている。(optical、peak:数時間から1日)
- Orphan afterglow(Optical、HEN)
イベントレートはgamma-rayの観測レートよりも10倍以上といわれている。
- Supernova(Gamma-ray, Optical, Radio,...)
- Long and short gamma-ray burst(Gamma-ray, HEN)
- Collapsar model for long GRB(LEN, HEN)
- Low Luminosity GRB(HEN)
- Microquasar(HEN, X-ray, Radio, Infra-red)
- Pulsar Glitches(gamma-ray, X-ray, Radio)
- Wagoner stars(LMXBs etc) (X-ray)

CBC



seconds

days

weeks

2010年8月11日水曜日

2010年9月2日木曜日

LVC follow-up search

重力波イベント候補のアラート(位置、時間、..)をパートナーの望遠鏡に送り、観測を行ってもらう

Optical, UV, X, Radioなど、重力波が放射されてから～Daysの間、放射されているEMを狙う

- LOOCUP(Locating and Observing Optical Counterpart to Unmodeled Pulses)
 - Wide field optical
 - Narrow field optical
- ToO(Target-of Opportunity) imaging by Swift
- Radio

LOOC UP

Wide field telescope

- 重力波望遠鏡は天体位置決定精度が高くない(バーストの場合、LIGO,VIRGO,LIGO-Australiaネットワークで数度@SNR=10)ので、エラー領域内を走査できる望遠鏡を用いる。
- 既に高視野望遠鏡が多く存在する。(GRB afterglowの観測を目的とした望遠鏡等) QUEST、TAROT、Zadko、SkyMapper、ROTSE、Pi of the Sky

Narrow field telescope

- Wide field telescopeは広領域が見られるがfaintな天体は見られない。Narrow field telescopeは狭い領域にしぼることでそれを補う。例えばLiverpool robotic telescopeは4.6 arcmin squared, mag 24、Wide field telescopeより1/100faintな天体も見られる。
- イベント候補の位置の推定にgalaxy catalogを用いる。

Telescopes

TAROT



フランス、チリ

GRB follow-up、Supernovaサーベイ

視野 $1.85^{\circ} \times 1.85^{\circ}$

ROTSE



オーストラリア、US、ナミビア、トルコ

GRB follow-up、Supernovaサーベイ

視野 $1.85^{\circ} \times 1.85^{\circ}$

アラートを受け取って、1分程度でポインティングが可能。



Telescopes

SkyMapper



オーストラリア

数時間から数週間のタイムスケールの変光、トランジェントのサーベイ

視野 $2.4^{\circ} \times 2.4^{\circ}$

約25%の時間をprimary obs以外に用いることが可能

QUEST



チリ

Supernovaサーベイ etc

視野 $4.6^{\circ} \times 4.1^{\circ}$ を覆える

Telescopes

Zadko



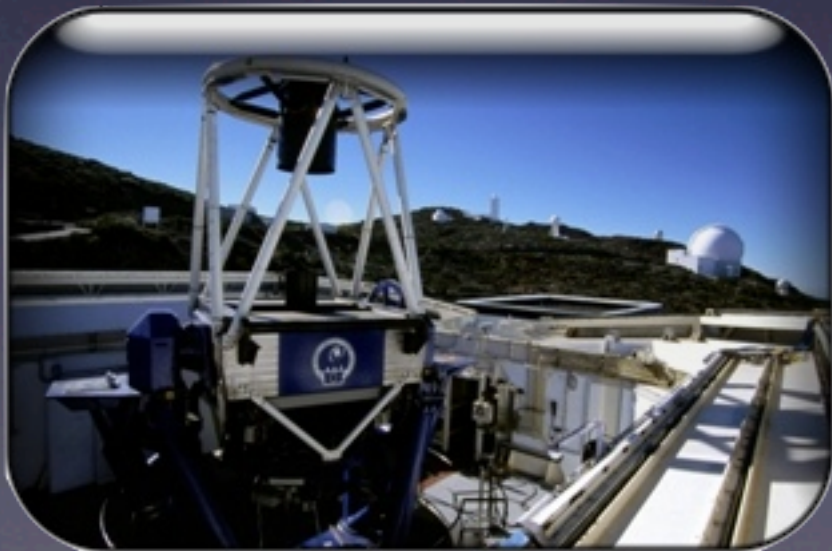
オーストラリア

Optical transientサーベイ、ASKAPが検出したradio transientのfollow-up、ANTARESのfollow-up、...

視野 $1/2^\circ \times 1/2^\circ$ 、 $1^\circ \times 1^\circ$ が計画

TAROTとタイアップ

Liverpool Telescope



スペイン カナリー島

突発現象のfollow-up、variable objectのモニター、...

視野 4.6×4.6 arcmin、1秒で 2° 動かせる

S6のために6時間の時間を獲得

Telescopes

LOFAR



ヨーロッパ広域に広がる。オランダがコミッショニング

SKAのパスファインダーだが、電波トランジェントを探すプロジェクトが含まれている。

視野全天の70%、秒単位でサーベイできる
周波数帯40-240MHz



コメント：電波望遠鏡は他にETA、LWA、NRAO Green Bank、ARECIBO、NASUが参加している/する予定。

Software

LUMIN -- for optical telescopes

- リアルタイム(~1hour)で重力波イベント候補の情報をパートナー望遠鏡に送る。
- アラートを受け取ると、世界各地にある望遠鏡が一斉に特定の位置を向く。
- 観測された天体イメージの探査をおこない、optical transientがあった場合、コインシデンス解析にまわす。

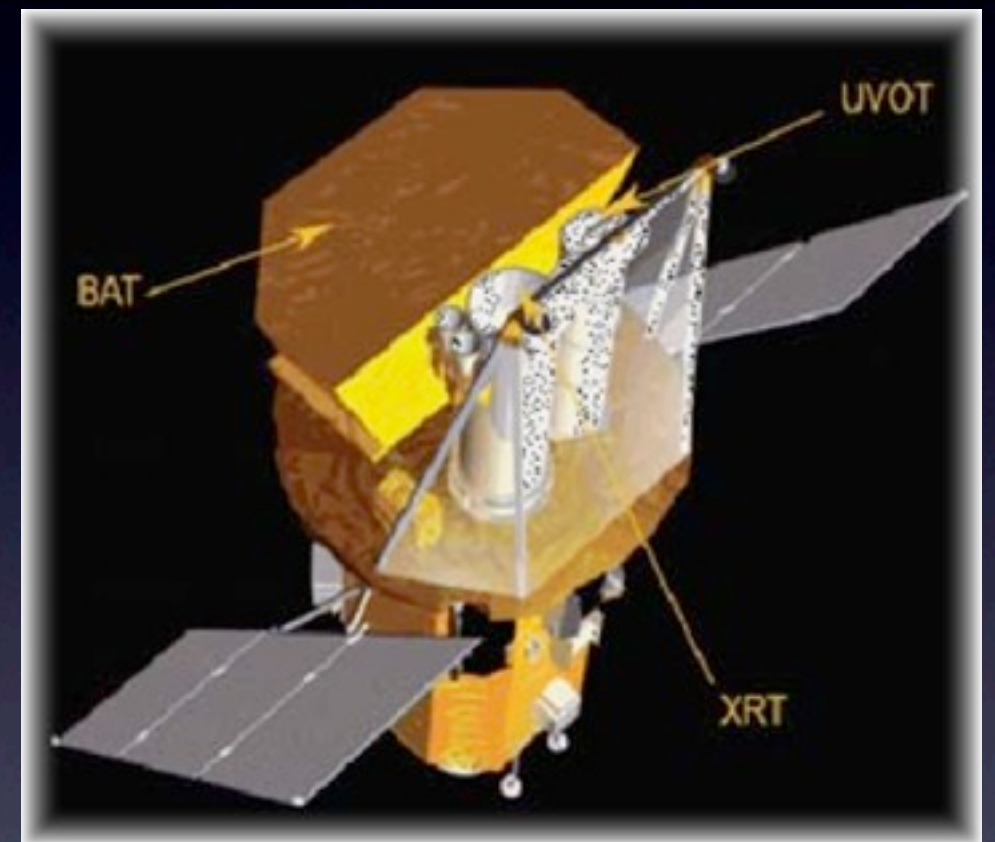
Realtime procedure

5--10 min	Calibrate and transfer data from 3 detector sites Identify significant 3 site events Evaluate background Apply data quality criteria Reconstruct the sky position Send alert to human monitors
30--45 min	Evaluate information and send observing request

ToO

Swiftに搭載されているXRT、UVOTを用いてfollow-up観測を行う。

- 重力波データを取得してから10分以内の解析
- バックグラウンド解析の結果から、1トリガー/月についてfollow-up観測をリクエスト。
- 解析ソフトウェアSwift processorを開発。



Position reconstruction

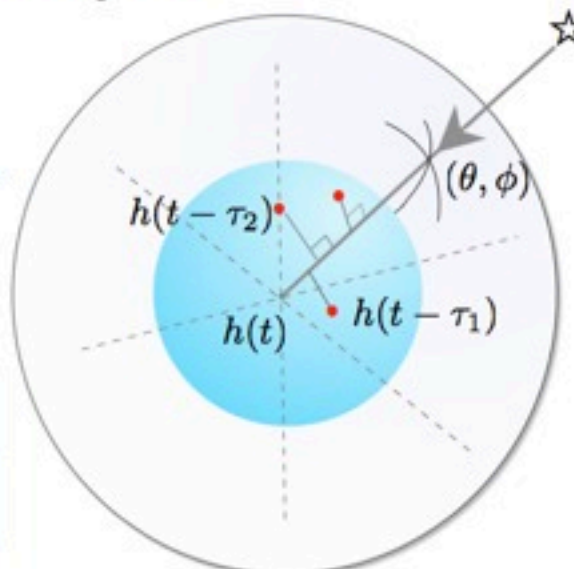
Coherent network analysis

複数の望遠鏡の時系列データを、各望遠鏡への重力波の到達時間差を考慮して補正し、偏極成分を求める逆問題をMaximum likelihood methodで解く。Detection statisticsとともに、天球位置、重力波形が推定される。

Coherent network analysis

Natural way to handle networks of detectors

- Use arbitrary # of detectors
- Statistics combines all data streams coherently
- Recovery of polarization waveforms and sky position


$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ \vdots \\ x_d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1+}(\theta, \phi) & F_{1\times}(\theta, \phi) \\ \vdots & \vdots \\ F_{d+}(\theta, \phi) & F_{d\times}(\theta, \phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_+(t) \\ h_\times(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1(t) \\ \vdots \\ n_d(t) \end{bmatrix}$$

data = response X G.W. + noise

G.W. $\xi_i(t) = F_{i+}(\theta, \phi)h_+(t) + F_{i\times}(\theta, \phi)h_\times(t)$

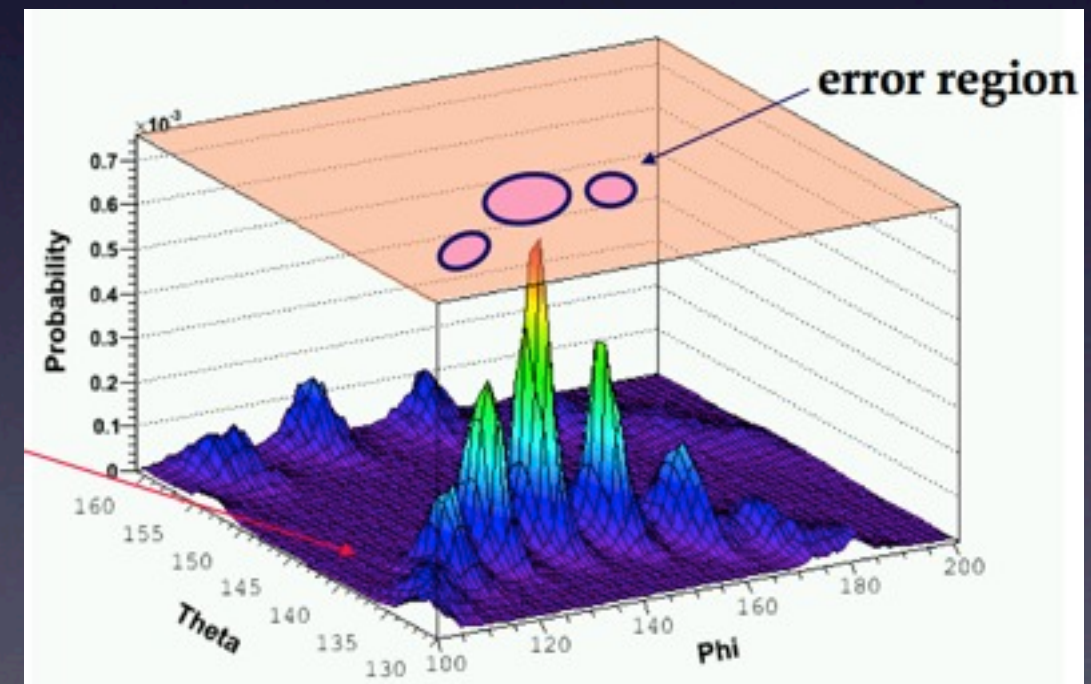
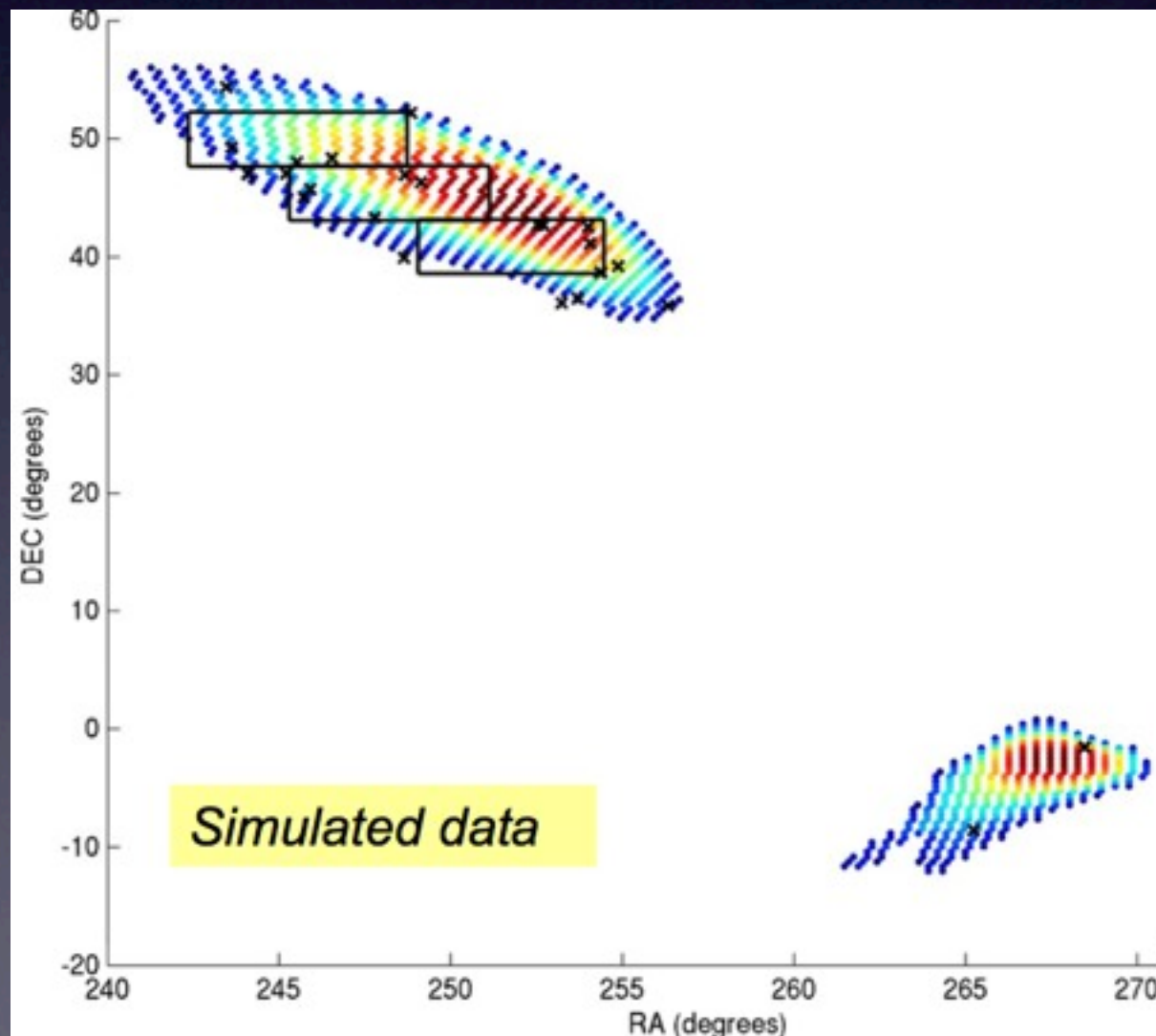
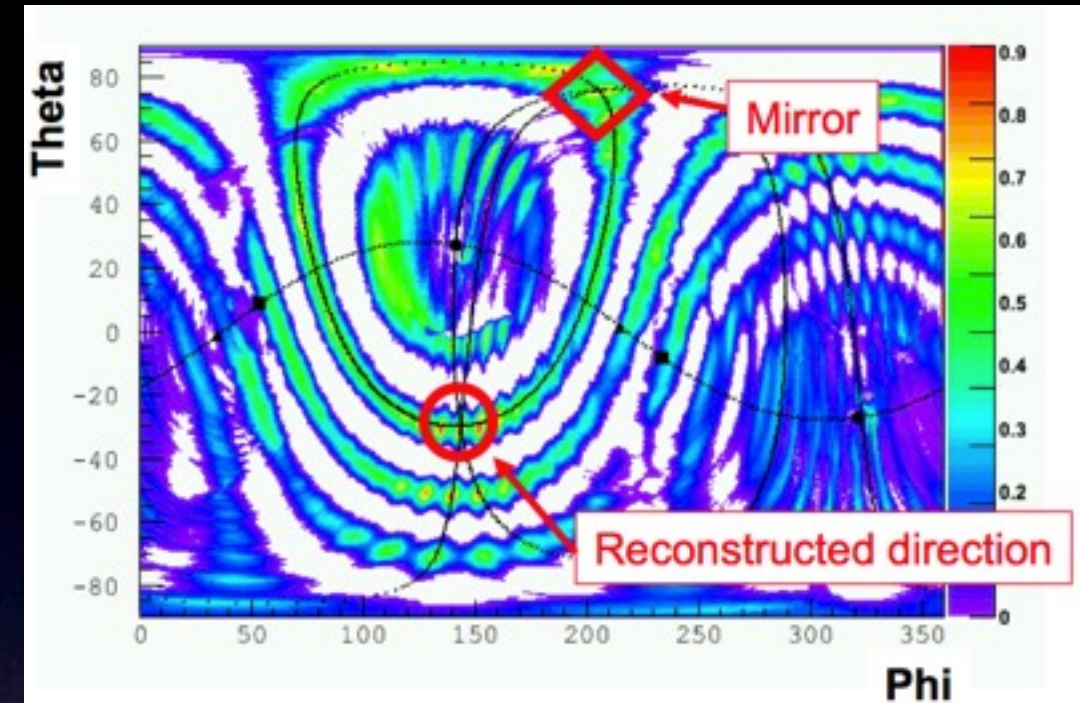
Changing (θ, ϕ) , look for

$$L = \sum_{i=1}^d \left(\sum_{t=0}^T \| x_i(t) - \xi_i(t + \tau_i, \theta, \phi) \|^2 \right) \rightarrow \text{minimum}$$

G070616-00-Z

Position reconstruction

- データのSineGaussianを埋め込んだデータを、コヒレントネットワーク解析
- 右上図：Probability sky map
- 右下図：推定位置のエラー領域
- パートナー望遠鏡に送る推定位置の決定 (下図)



LVC triggered search

パートナーの望遠鏡が検出したトランジェントイベント情報を送ってもらい、重力波のアーカイブデータを解析する。

位置、時間等の情報が用いることができるので検出効率が格段に上がる。

- GRB
- SGR
- GWHEN (gravitational waves and high energy neutrino)
- LMXBs (Low mass X-ray Binaries, Wagoner stars)
- Radio
- Pulsar Glitches

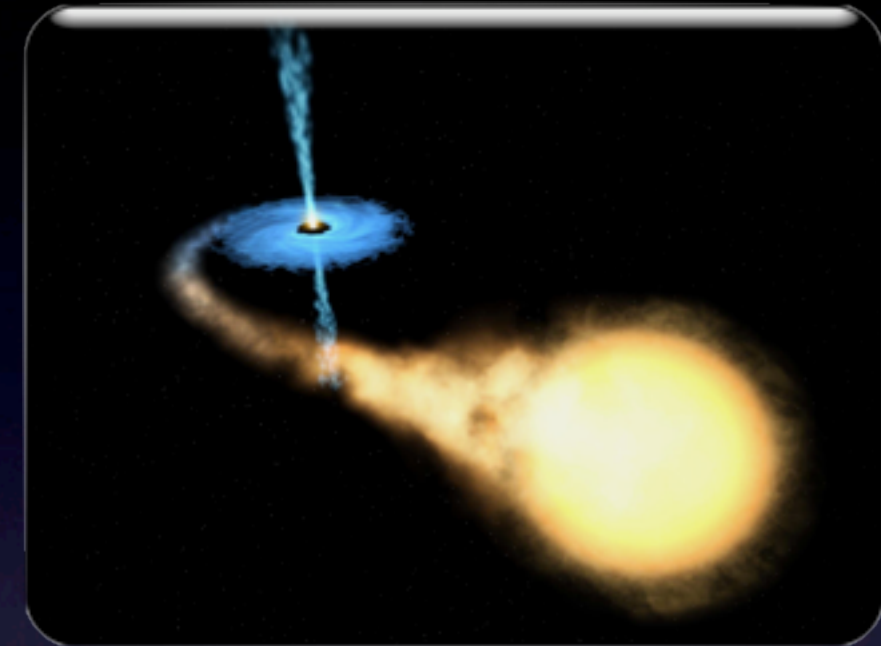
注：ICECube、ANTARES、RXTEとのjoint searchはfollow-up型とtriggered型の両方の側面を持つ。

RXTE joint search

科研費のサポートを受けている。

Sco X-1からの重力波

- Sco X-1は最も明るいX線を出しているLMXB(Low mass X-ray binary)
 - 観測されるspin速度がMass accretionによるspinの増加で期待されるよりも小さい \Rightarrow 重力波による角運動量の放出モデル
 - Sco X-1のaccretion rateはEddington limit付近。それを超えるエネルギーは重力波にも変化されうる。
 - Bursts induced by r-mode
 - accreting massによる外殻の崩壊で励起されるBursts
-
- Sco X-1からの重力波を、重力波望遠鏡とX線衛星RXTEで追いかける
 - データ解析で他のサーチと異なる点は、RXTEのPCAデータのサンプリングレートが4096Hzであり、Sco X-1からのphoton時系列データが使えること。
 - 重力波、X線の時系列データを解析して、相関のある信号を見つける。
 - 今まで短いタイムスケールでは、X線のデータは解析されていなかったこともあり、X線データの中にも新しい発見が期待できる。

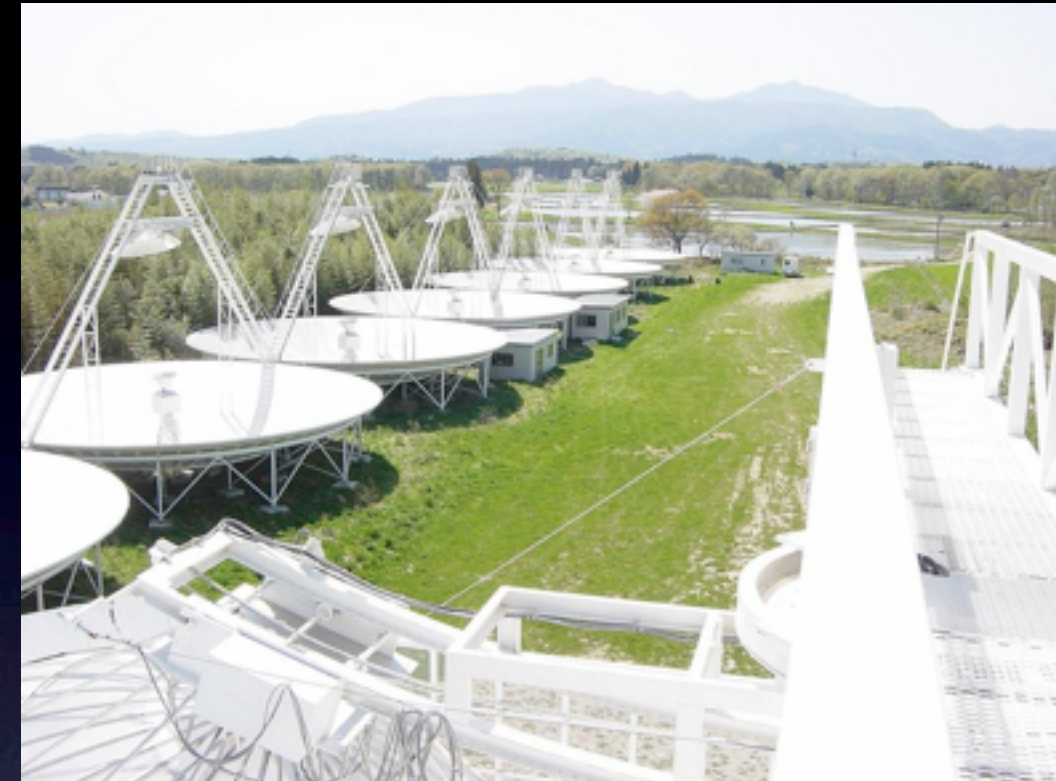


NASU joint search

早稲田那須パルサー観測所

in collaboration with L. Niinuma, T. Oyama, T. Daishido

- 位置 那須塩原
- 8台の直径20mDishと20mDish
- 観測周波数 1.42GHz
- Bandwidth 20MHz
- ターゲット Radio transients, counterpartサーチ
- 感度 数100mJy@1秒積分（現かにパルサー電波の天体を数Mpcまで見られる。）
- 起源は不明（いくつかモデルはあるが）



- 2005年から2007年のLIGOS5観測時期に、複数の電波トランジェントを観測している。
- LIGOがScience modeの時に検出しているトランジェントが複数あることを突き止めている。
- LVCではLOFARなどを用いた電波トランジェントとのtriggered searchプロジェクトがあるが、まだ検出されていない→那須のケースが初めてとなる。
- LVCとのMOUを作成中

まとめ

- 今日は、multi-messenger観測について、LIGO-VIRGOコラボレーションで行われているプロジェクトについて概観した。これから加わるLCGTにとって必須の知識と思われる。