

富山大学とKAGRAグループの重力波検出に関する合同ワークショップ

データ解析

神田展行 / 大阪市立大学理学研究科

2012年7月7日(土)

富山大学五福キャンパス 理学部2階 多目的ホール



KAGRAの”データ解析”

データ取得、データ質評価～転送～保管～解析～物理 といった、一連の「データ関連」です。

データ取得系

- 神岡のKAGRA干渉計本体、環境のデジタル系からのデータを取得

データ転送・貯蔵・管理

- 神岡-->柏 raw(生)データ~70GB/hour
- raw + calib. 他 ~5PB / 5年観測
- (LIGO, Virgoと共同データ ~30PB / 5年観測)

データ評価

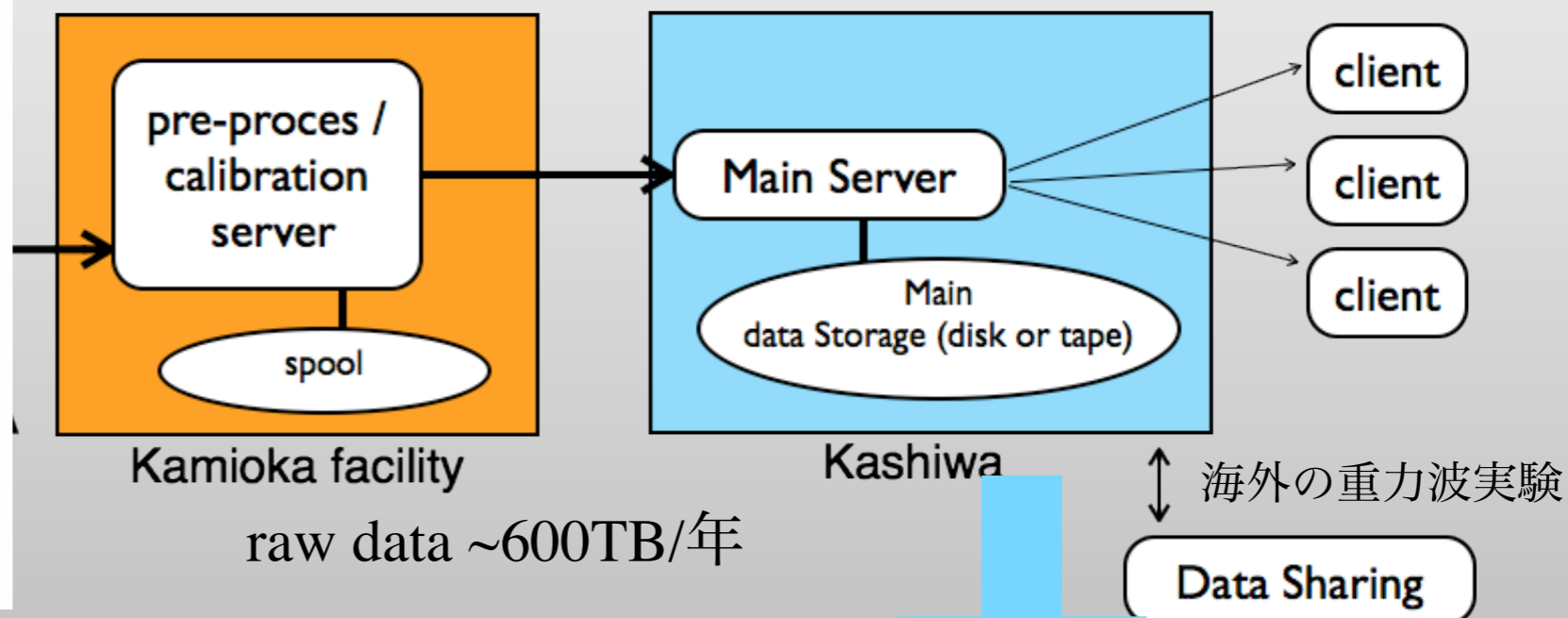
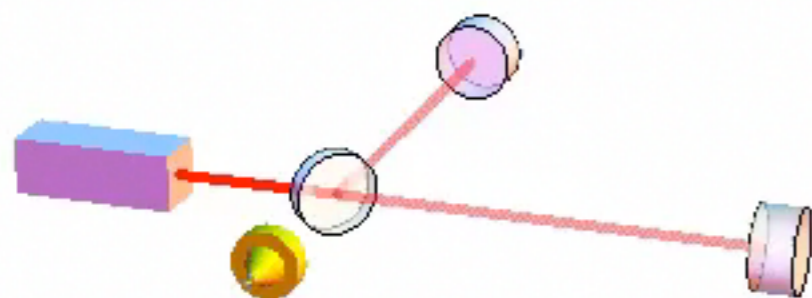
- 装置の運転状態などの評価 (Detector Characterization)
- すぐにできるイベント探索 (Quick Look, Low Latency)
- キャリブレーション

イベント解析

- 重力波イベントの探索 <— 微小信号の取り出し、雑音との弁別
- 重力波 (源) のサイエンス
- ほかの天体観測との同時性、フォローアップ観測 (マルチメッセンジャー)



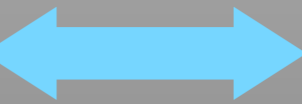
干渉計--(信号)-->データ--(解析)-->サイエンス



raw data ~600TB/年

理論とデータ解析の協力が必要

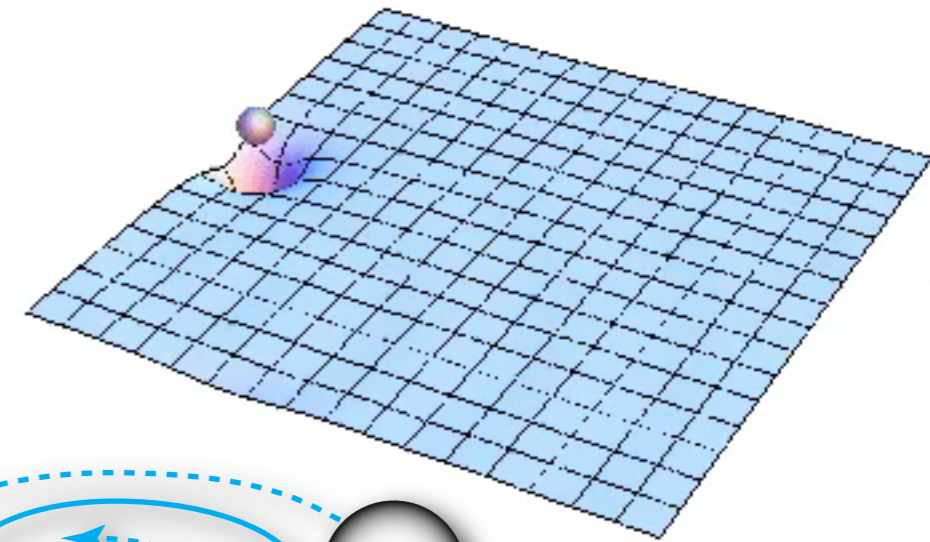
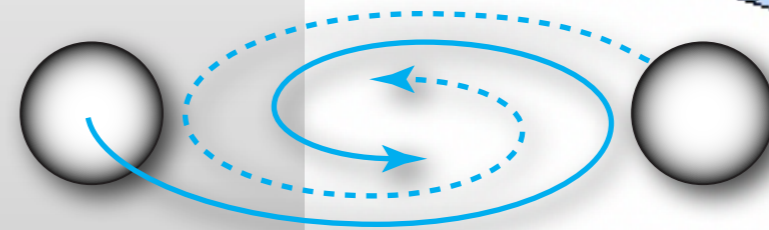
重力波以外の天体観測



重力波源

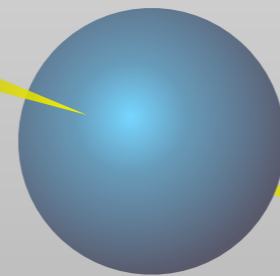
突発性のイベント的なもの:

- コンパクト連星 (NS-NS, NS-BH, BH-BH)
中性子星 (NS), ブラックホール (BH)
- 超新星爆発
- BH 準固有振動
- パルサーのグリッジ



連続波:

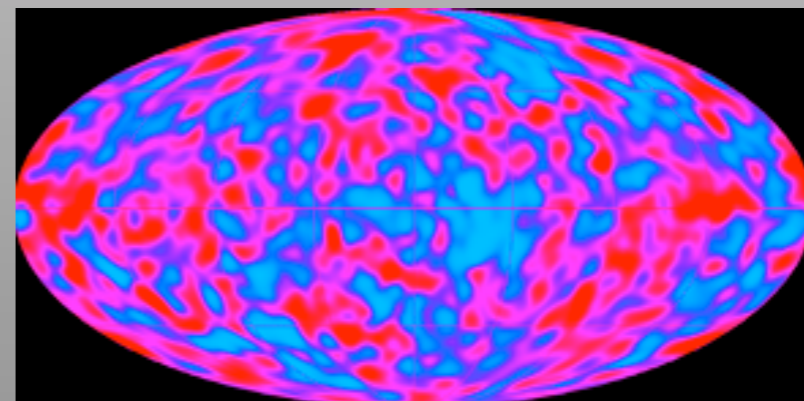
- パルサー
- 連星



背景輻射重力波

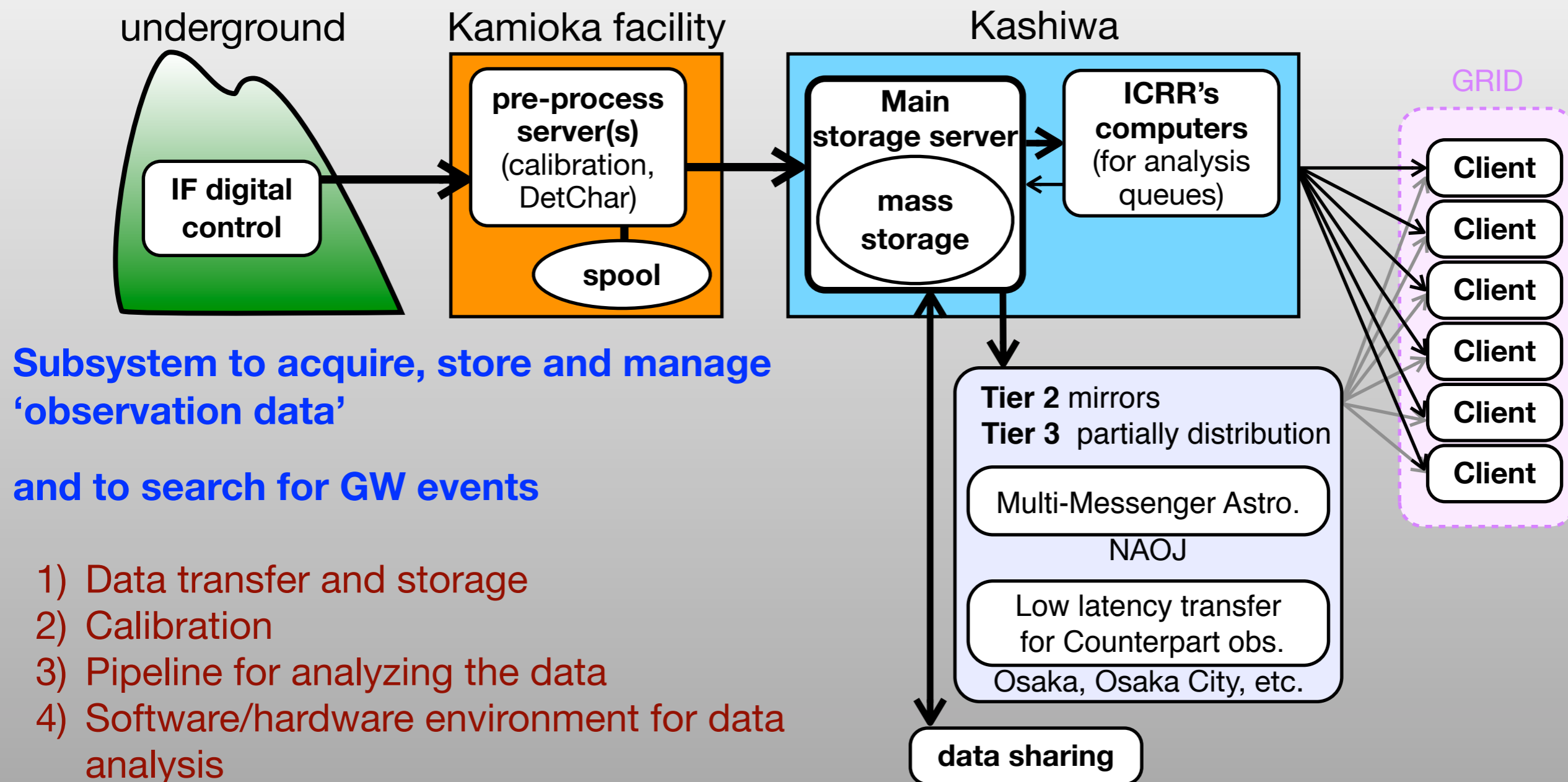
- 初期宇宙 (インフレーション起源など)
- 宇宙紐
- 天体起源の分離できないもの

(& 未知の重力波源...)





データ系全体像



- 1) Data transfer and storage
- 2) Calibration
- 3) Pipeline for analyzing the data
- 4) Software/hardware environment for data analysis
- 5) Physics, astrophysics and astronomical outcomes
- 6) Cooperation with other experiments (GW and non-GW)



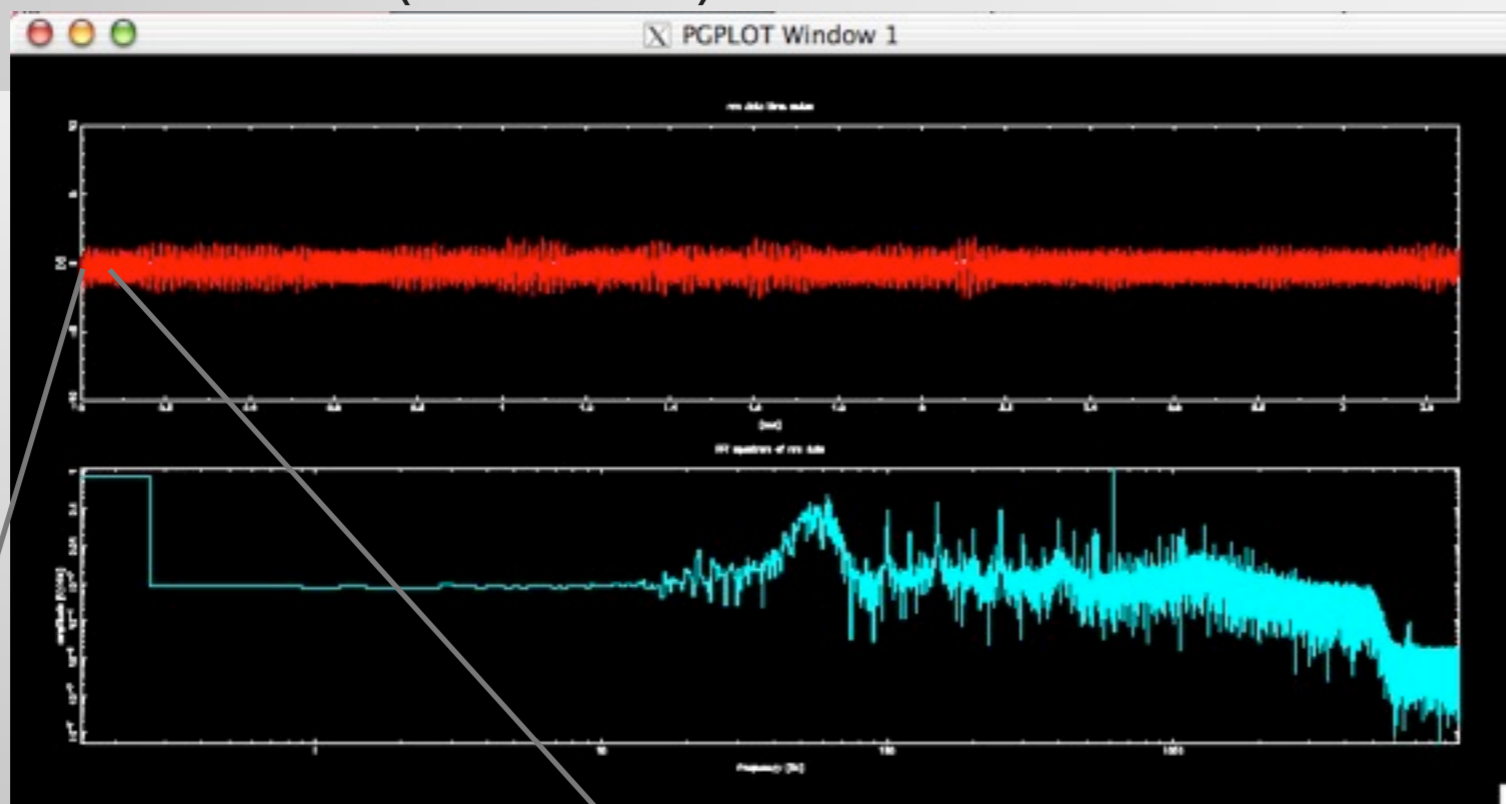
全体像：データ量と計算コスト

<i>item</i>		<i>requirements</i>
Network and Pre-process throughput		~70 GB/hour
Storage	two weeks safety spool	25 TB
	on site study	500 TB
	KAGRA own	5 PB for 5 years
	Data Sharing	30 PB for 5-sites
Calculation costs for GW searches	Compact Binary	a few ~ several Tflops
	Burst	~1 Tflops
	Continuous	~1 Tflops
	Stochastic	< 1 Tflops
Software	Search pipeline	need development, migration from LV, GRID system
	Environment	

Blue: iKAGRA, Red: bKAGRA



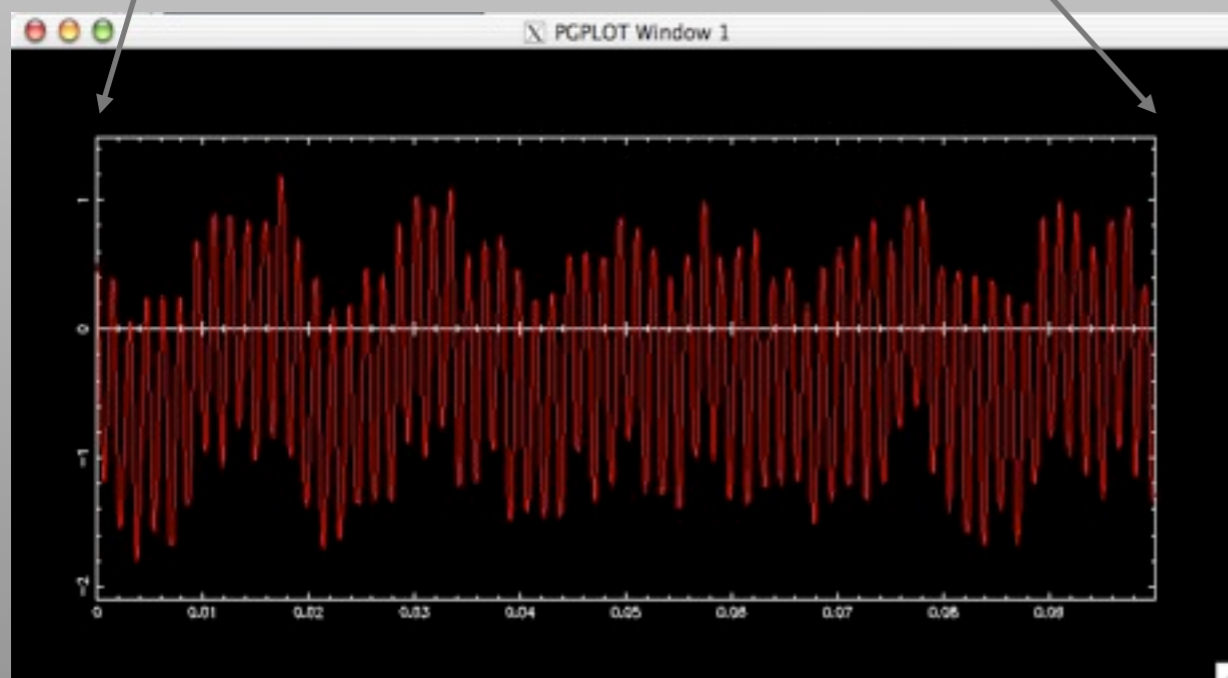
例：TAMAの信号(データ)



0ch ADC値[Volt]

0ch パワースペクトル

zoom
0 - 0.1 [sec]



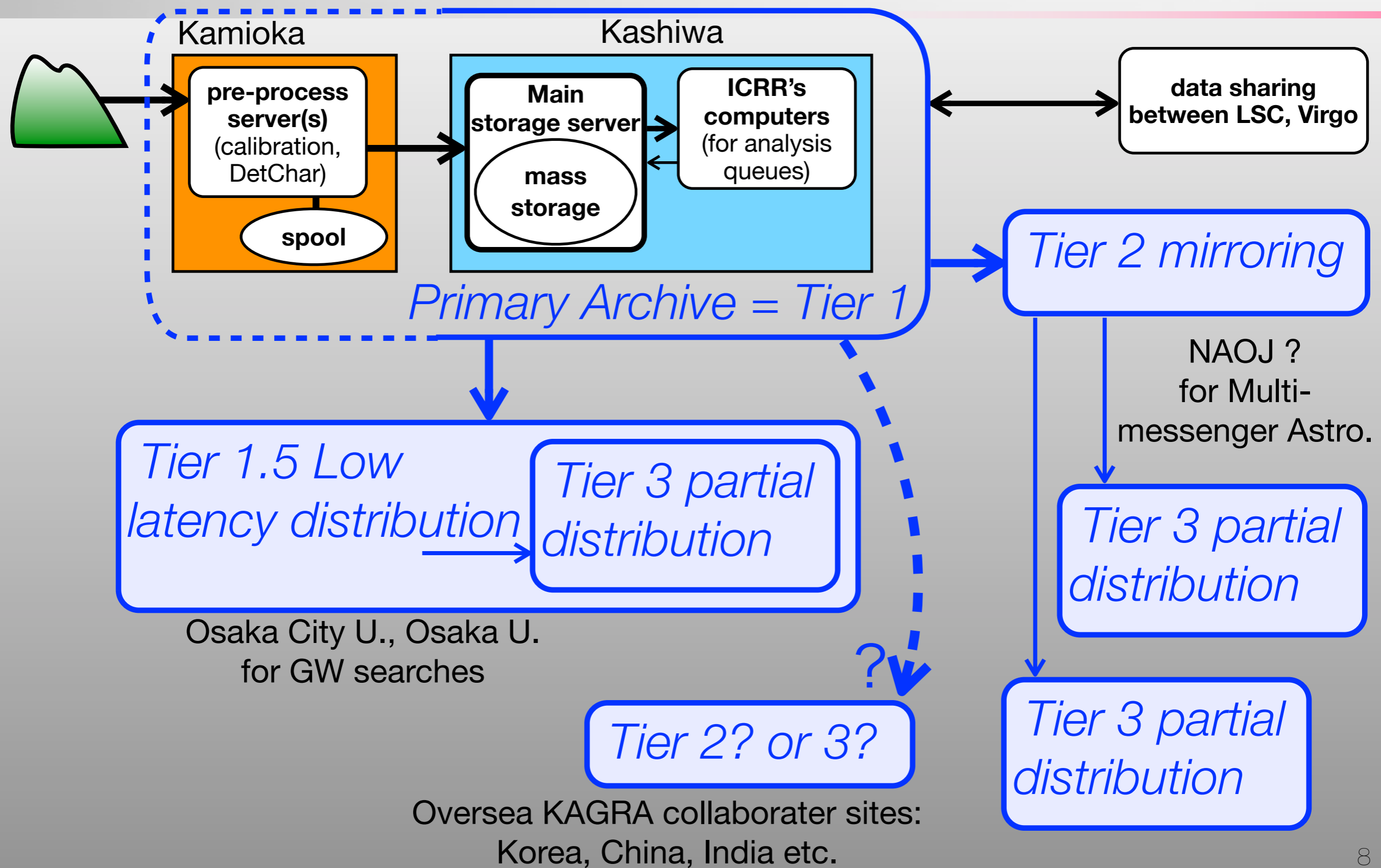
16bit ADC
20 kHz sampling
(= 50 μ sec interval)

5 kHz anti-alias filter

3.2768 sec (2^{16} samples) \rightarrow 1 frame
20 frame \rightarrow 1 file



データ配信



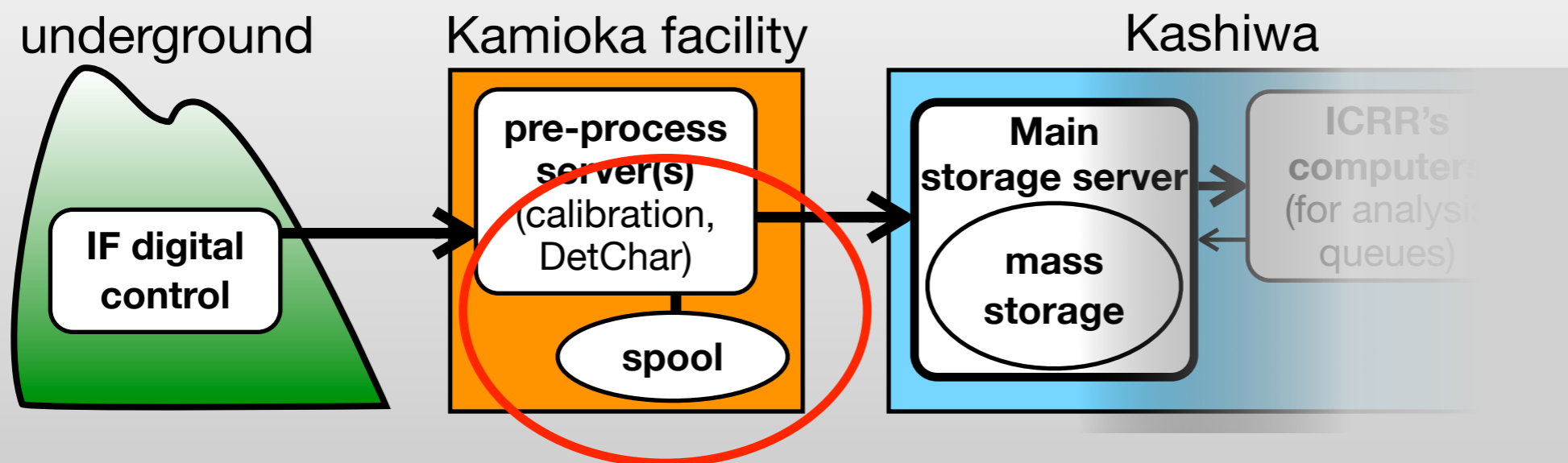


Branches (Tier #)

細部はまだ検討中。規模の目安に。

Tier	Site(s)	Purpose	Raw	Calibrated	Detector Characterization	Amount of data	event alerts
(0?)	Kamioka	DAQ	partial (spool)	partial (spool)	partial (spool)	500TB	partial
1	Kashiwa	Main Storage	○	○	○	5~30PB	(Not yet discussed)
1.5	Osaka City, Osaka	Low latency	NA or small amount	○	○	<1PB	○
2	NAOJ? Korea Site?	Mirroring	○	○	○	5~30PB	○
3	End users	Development	NA	partial	partial	(Not yet discussed)	NA

データ評価、キャリブレーション



観測中、リアルタイムでのデータ処理

- 装置の運転状態の評価 (DetChar)

「干渉計診断」

装置起因の雑音の評価、外乱の有無、

雑音のガウス性評価 (非ガウス雑音や非定常雑音の棄却)

- 感度較正 (キャリブレーション)

$v(t) \rightarrow h(t) \text{ or } h(f)$

参考：デジタル系（干渉計診断）開発@NAOJ

- **Simple standalone system** (RT PC + ADC, Client WS, router) has been **delivered to NAOJ** on 12/6/2011.
- 3days work for installation, lecture and training
- **Online analysis software** will be developed by DAS group.





重力波イベント探索

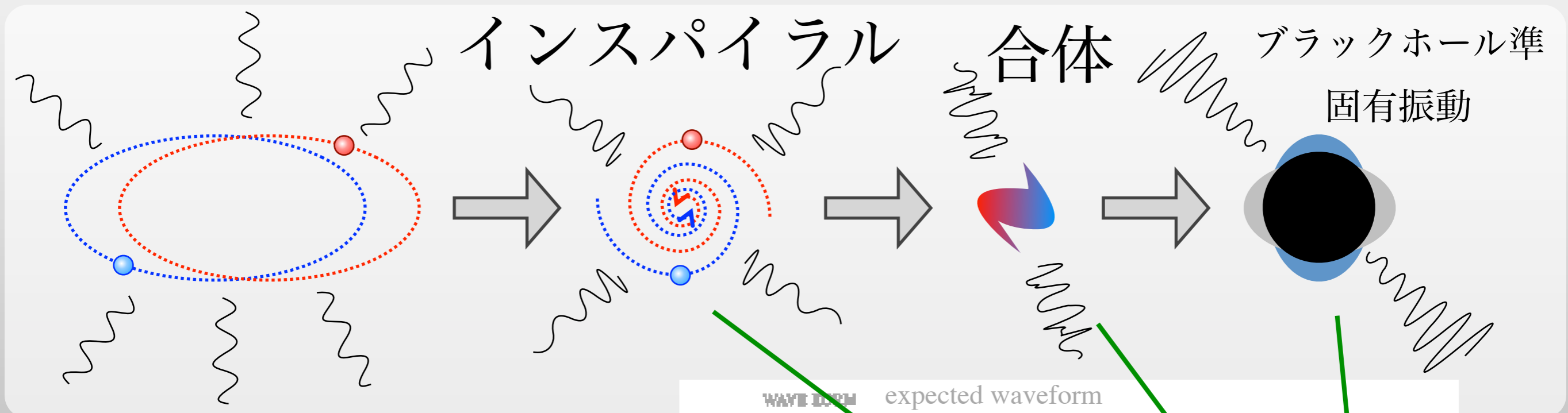
雑音の中に微小信号を探索する。

重力波源		波形予想	探索手法	コメント
コンパクト 連星合体	合体前	“チャープ” 解析的予想 (ポスト=ニュートン) あり	Matched filter (Winer optimal filter)	手法は手堅い。 波形の研究さらに。
	合体時	数値相対論		合体前の解析波形と あわせて。
	合体後	BH: 摂動論 hyper-massive NS : 数値相対論	Matched filter スペクトル	KAGRAやLIGOには やや周波数が高い
超新星		“バースト波” 数値相対論	多種多様あり	いろいろ手法あり。 開発の余地も広い。
パルサー		連続波 (正弦波+modulation)	ヘテロダイン (既知パルサー) Hough変換など (未知)	未知パルサー探索が 難しい。
背景重力波		ある周波数スペクトルをもった不定波形	検出器の相関、 ラジオメトリ解析 (異方性、点源)	要複数台検出器



コンパクト連星合体

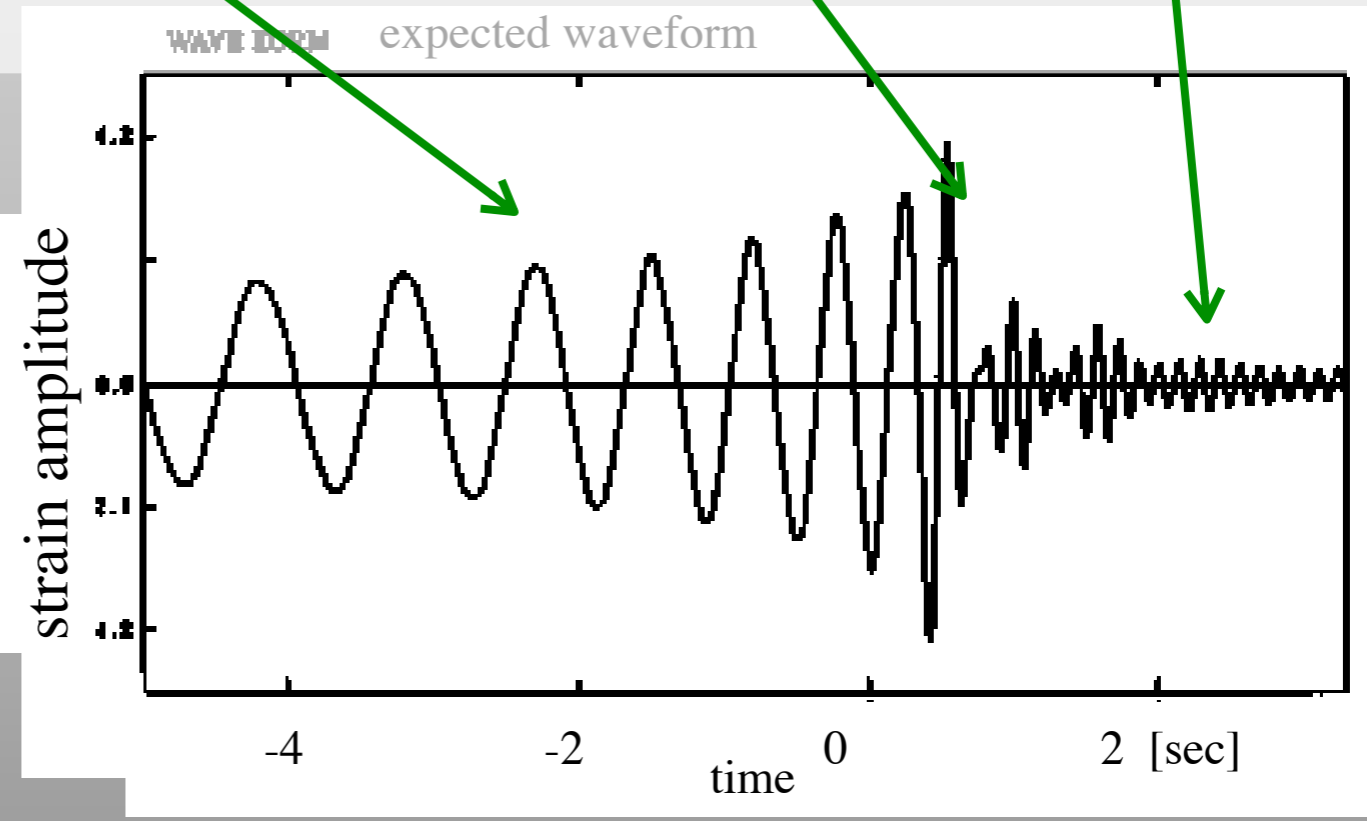
NS-NS ==>合体==>BH



$h \sim 10^{-24}$ for NS-NS at 200Mpc away!

波形から絶対等級（重力波源における振幅の絶対値）を推定可能.

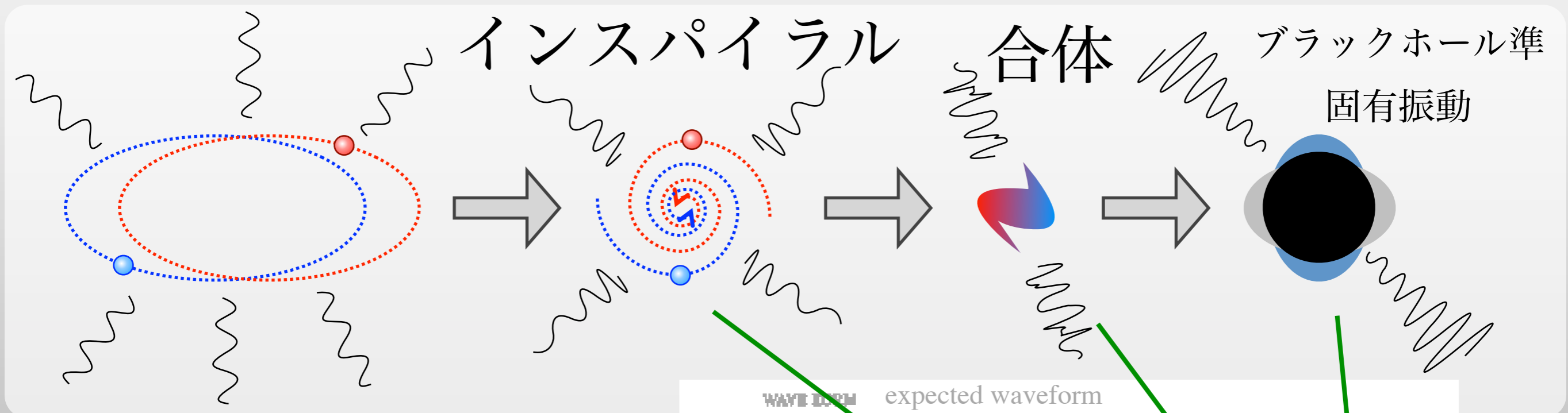
‘standard candle’





コンパクト連星合体

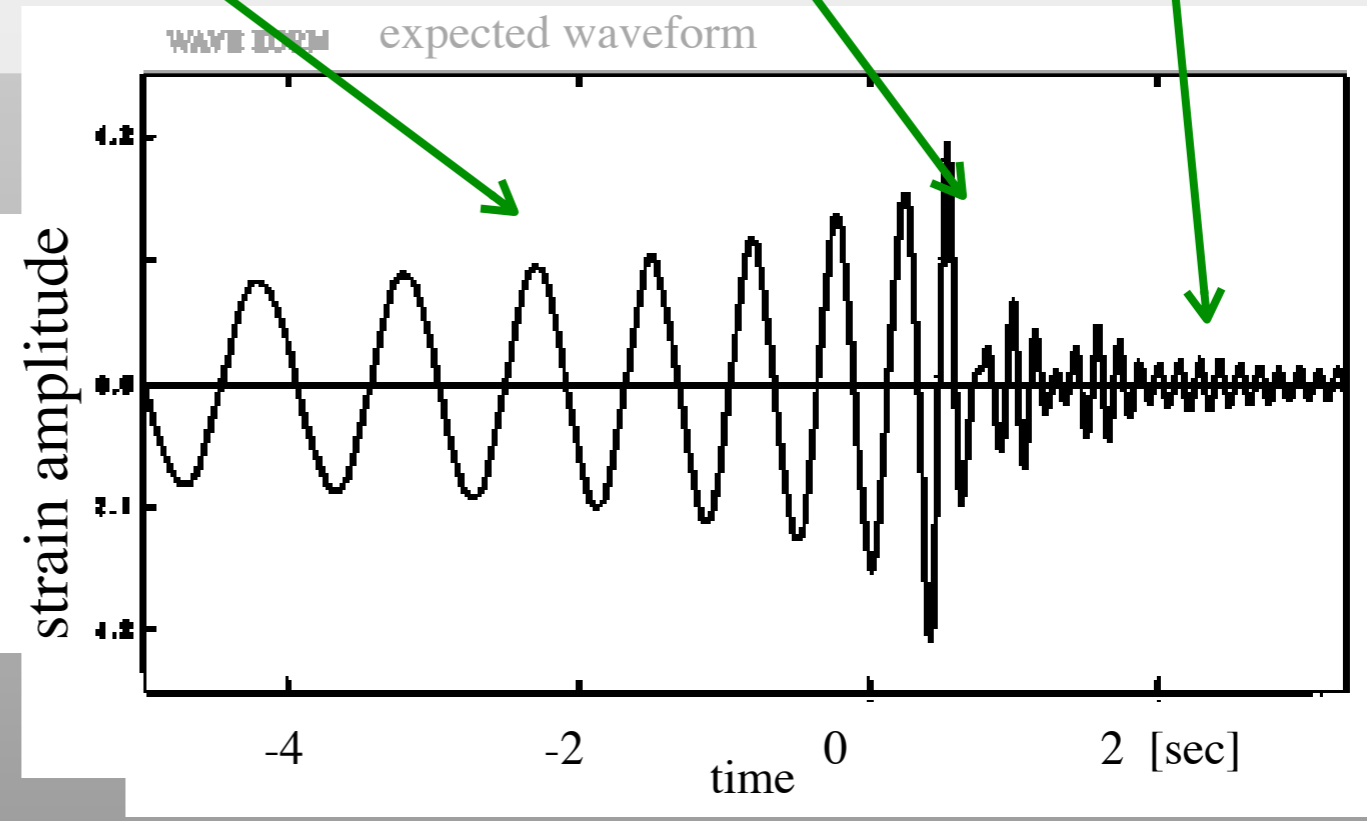
NS-NS ==>合体==>BH



$h \sim 10^{-24}$ for NS-NS at 200Mpc away!

波形から絶対等級（重力波源における振幅の絶対値）を推定可能.

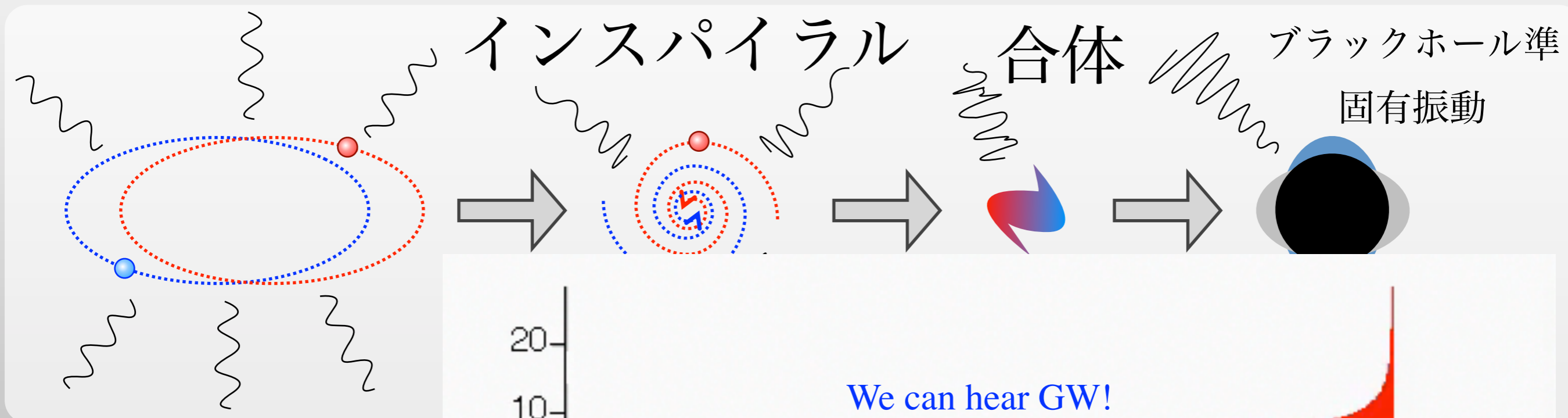
'standard siren'





コンパクト連星合体

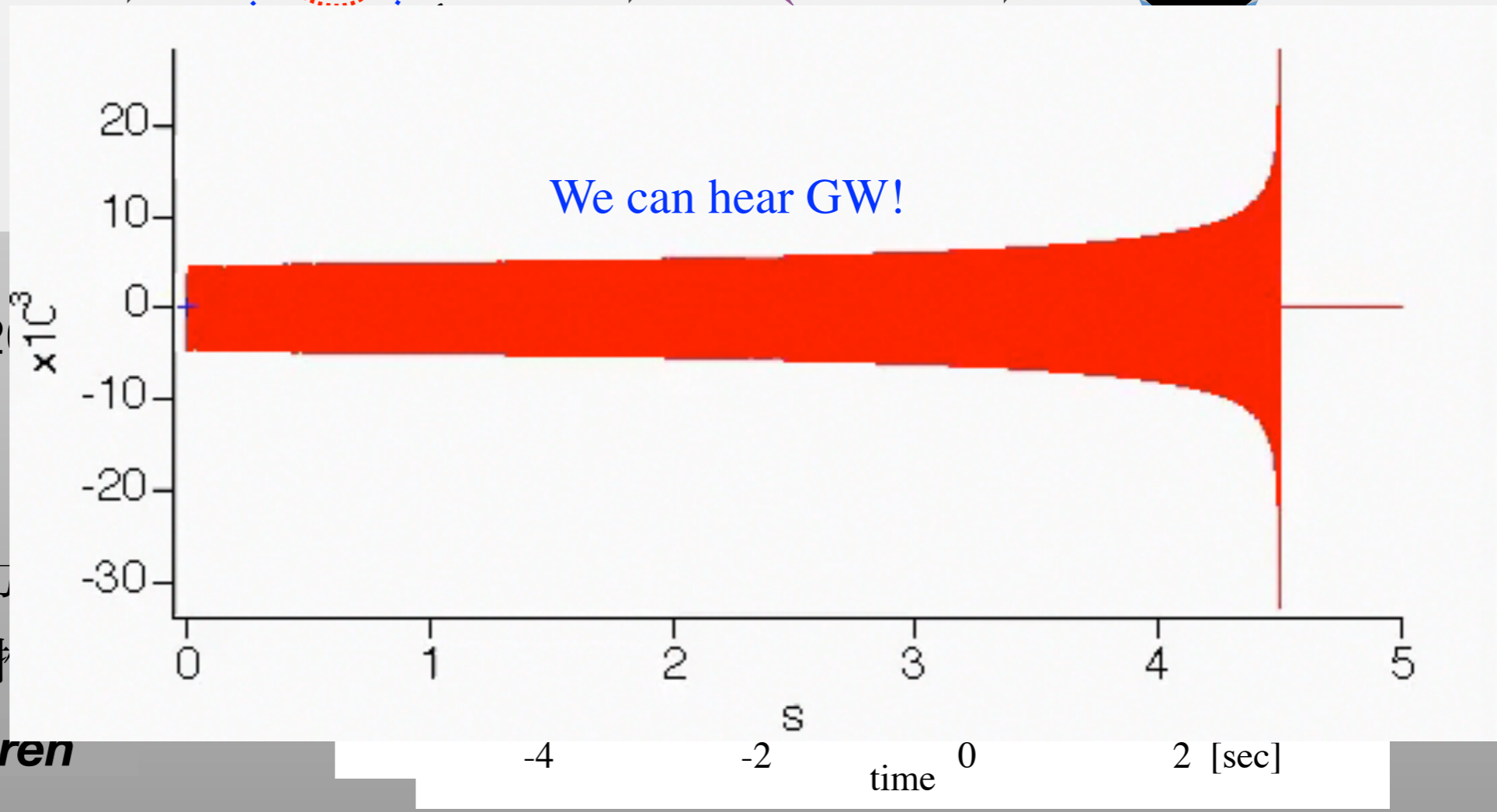
NS-NS ==>合体==>BH



$h \sim 10^{-24}$ for NS-NS at 2

波形から絶対等級（重力波の振幅の絶対値）を推定

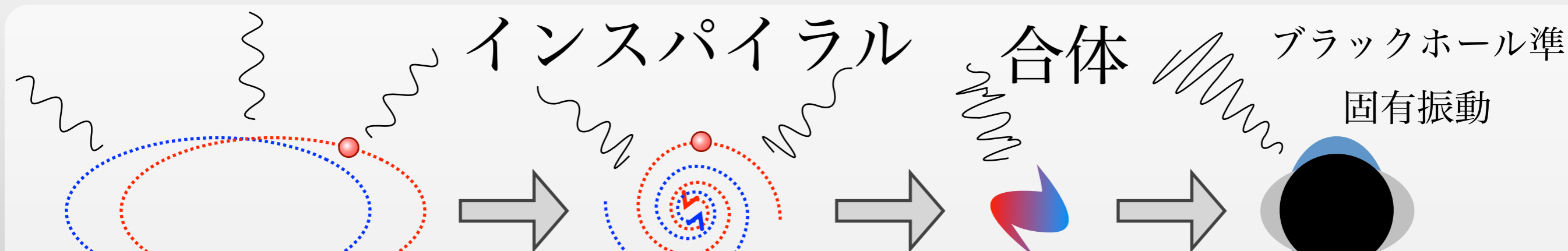
‘standard siren’





コンパクト連星合体

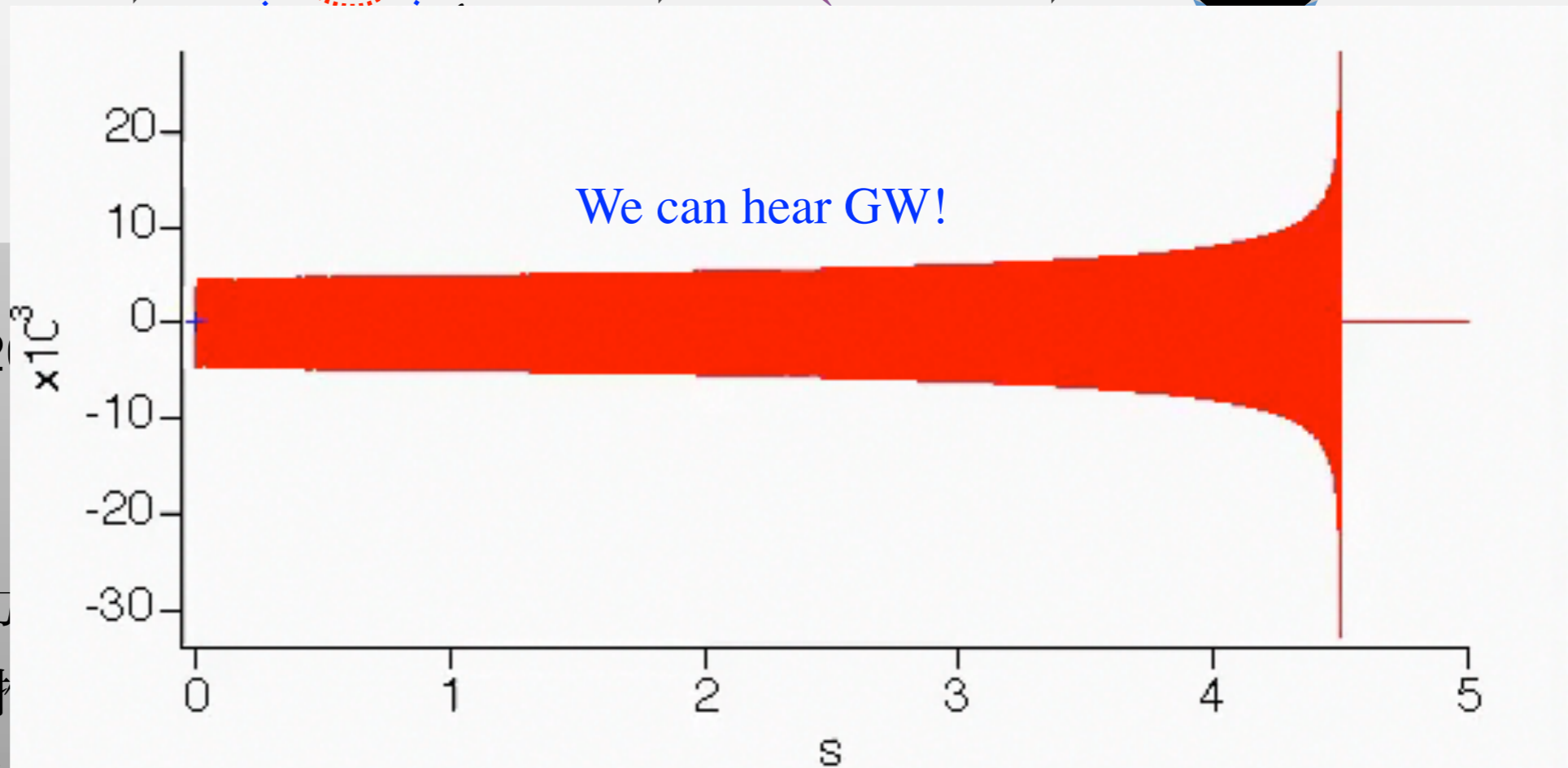
NS-NS ==>合体==>BH



$h \sim 10^{-24}$ for NS-NS at 2

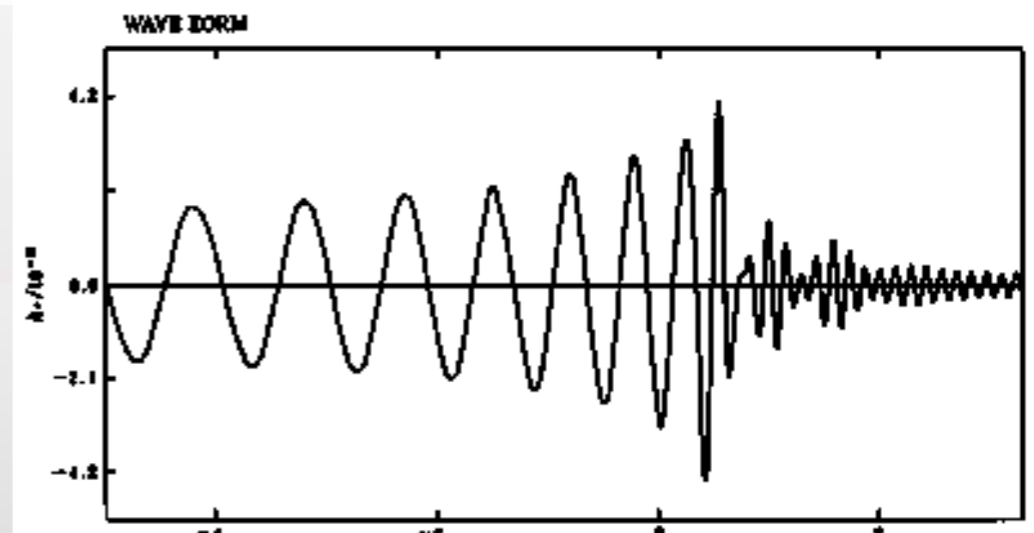
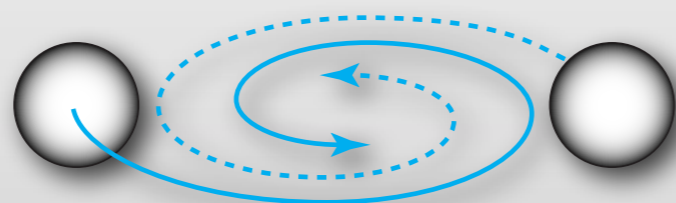
波形から絶対等級 (重力波の振幅の絶対値) を推定

'standard siren'



検出の最有力候補

コンパクト連星合体

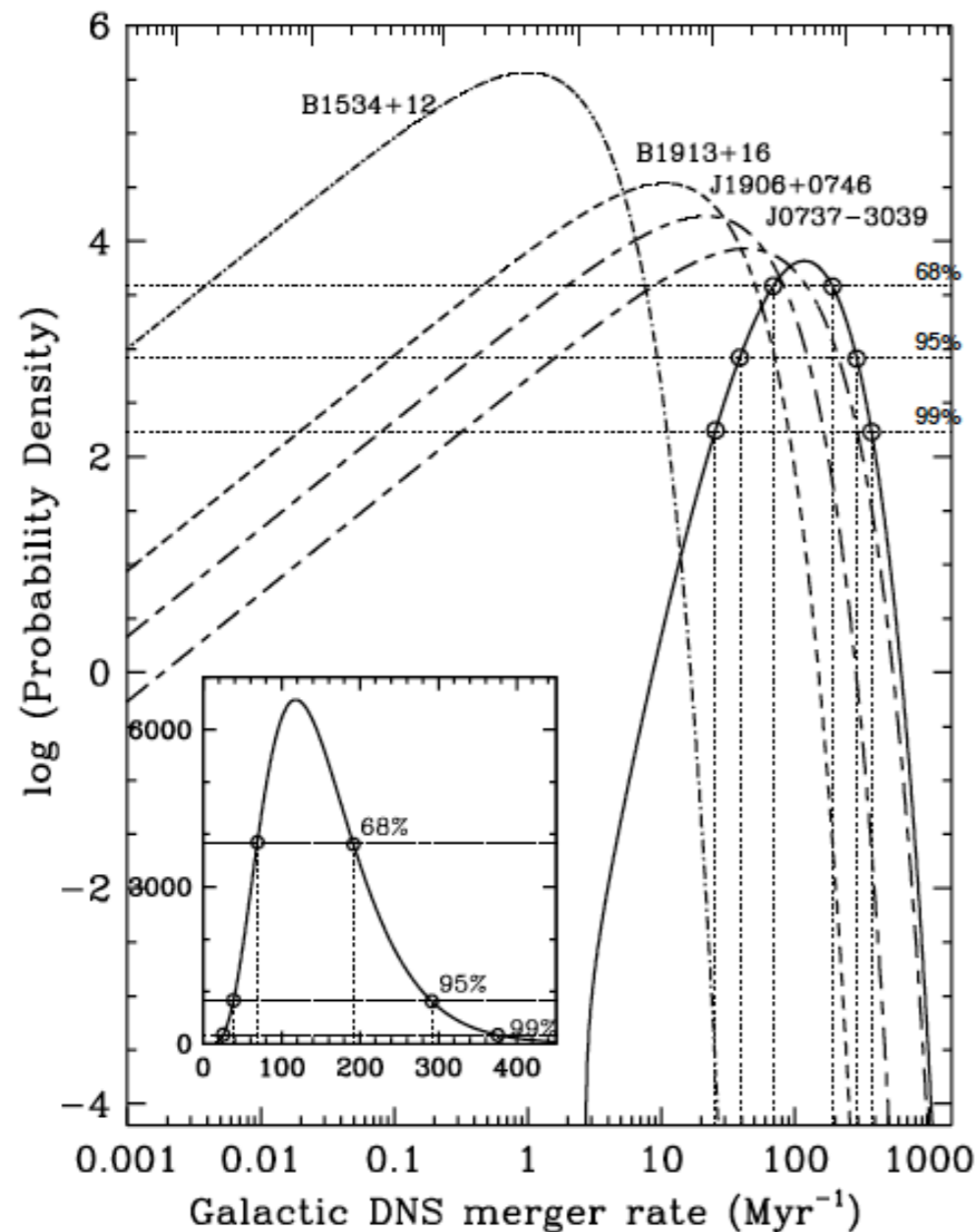
NS-NS, NS-BH, BH-BH

インスパイラル 合体 BH準固有振動

既知の連星パルサー

PSR name	P_s (ms)	P_b (hr)	e	τ_{life} (Gyr)
B1913+16 ^a	59.03	7.75	0.617	0.37
B1534+12 ^a	37.90	10.10	0.274	2.93
J0737-3039A ^a	22.70	2.45	0.088	0.23
J1756-2251 ^a	28.46	7.67	0.181	2.03
J1906+0746 ^b	144.14	3.98	0.085	0.082
J2127+11C ^{bcd}	32.76	8.047	0.681	0.32

連星中性子星合体率



(Kim ('08), Lorimer ('08))

銀河系合体率: $118_{-79}^{+174} \text{ Myr}^{-1}$

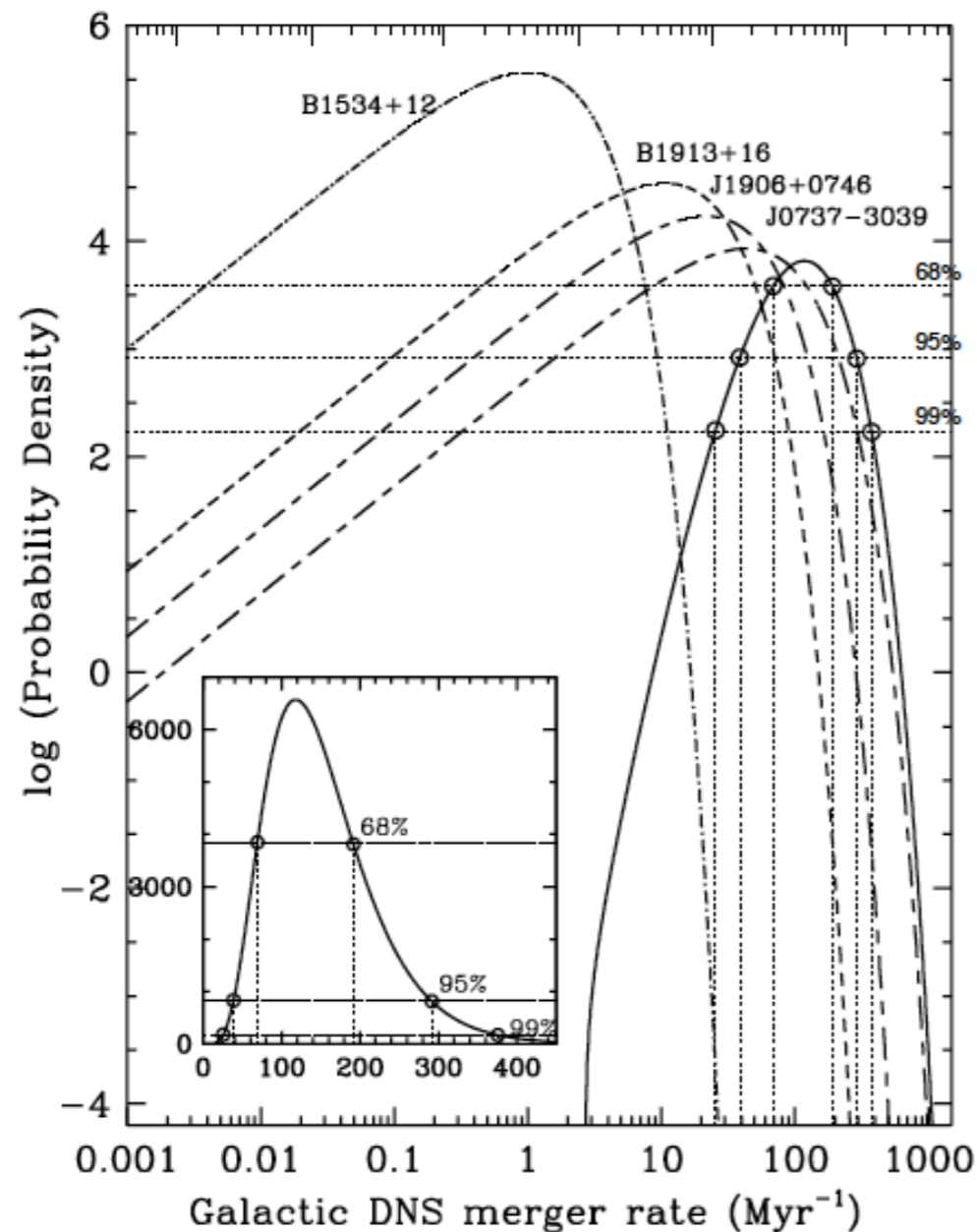
LCGT (VRSE-D) での観測可能最大距離 (@S/N=8)
 $\sim 280 \text{ Mpc}$ ($z=0.065$)

LCGTのイベントレート: $9.8_{-6.6}^{+14} \text{ yr}^{-1}$

これに含まれない系統誤差は大きい
 が、1年に1イベント以上はあるであろう。

参考: Abadie et al. CQG27, 173001(2010)

連星中性子星合体率



(Kim ('08), Lorimer ('08))

銀河系合体率: $118_{-79}^{+174} \text{ Myr}^{-1}$

LCGT (VRSE-D) での観測可能最大距離 (@S/N=8)
 $\sim 280 \text{ Mpc}$ ($z=0.065$)

LCGTのイベントレート: $9.8_{-6.6}^{+14} \text{ yr}^{-1}$

年間10イベント弱

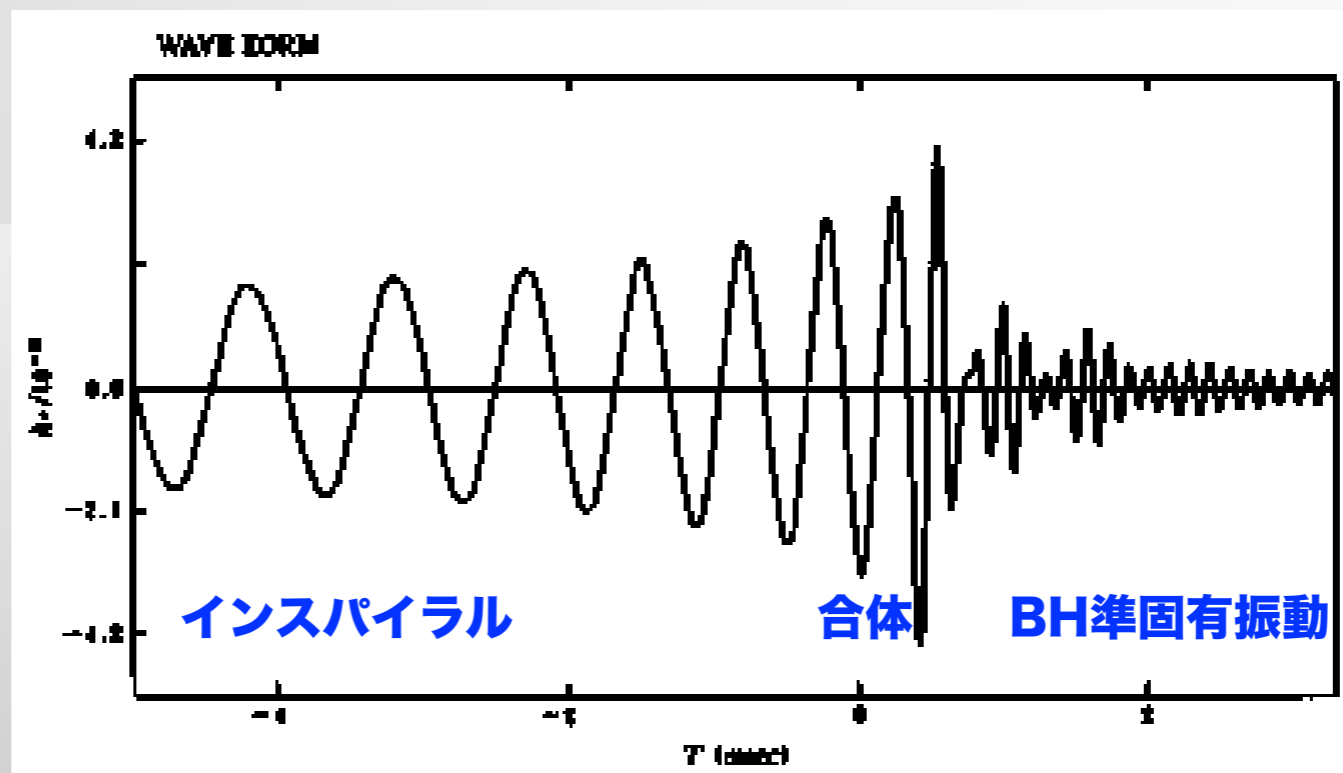
これに含まれない系統誤差は大きい
 が、1年に1イベント以上はあるであろう。

参考: Abadie et al. CQG27, 173001(2010)

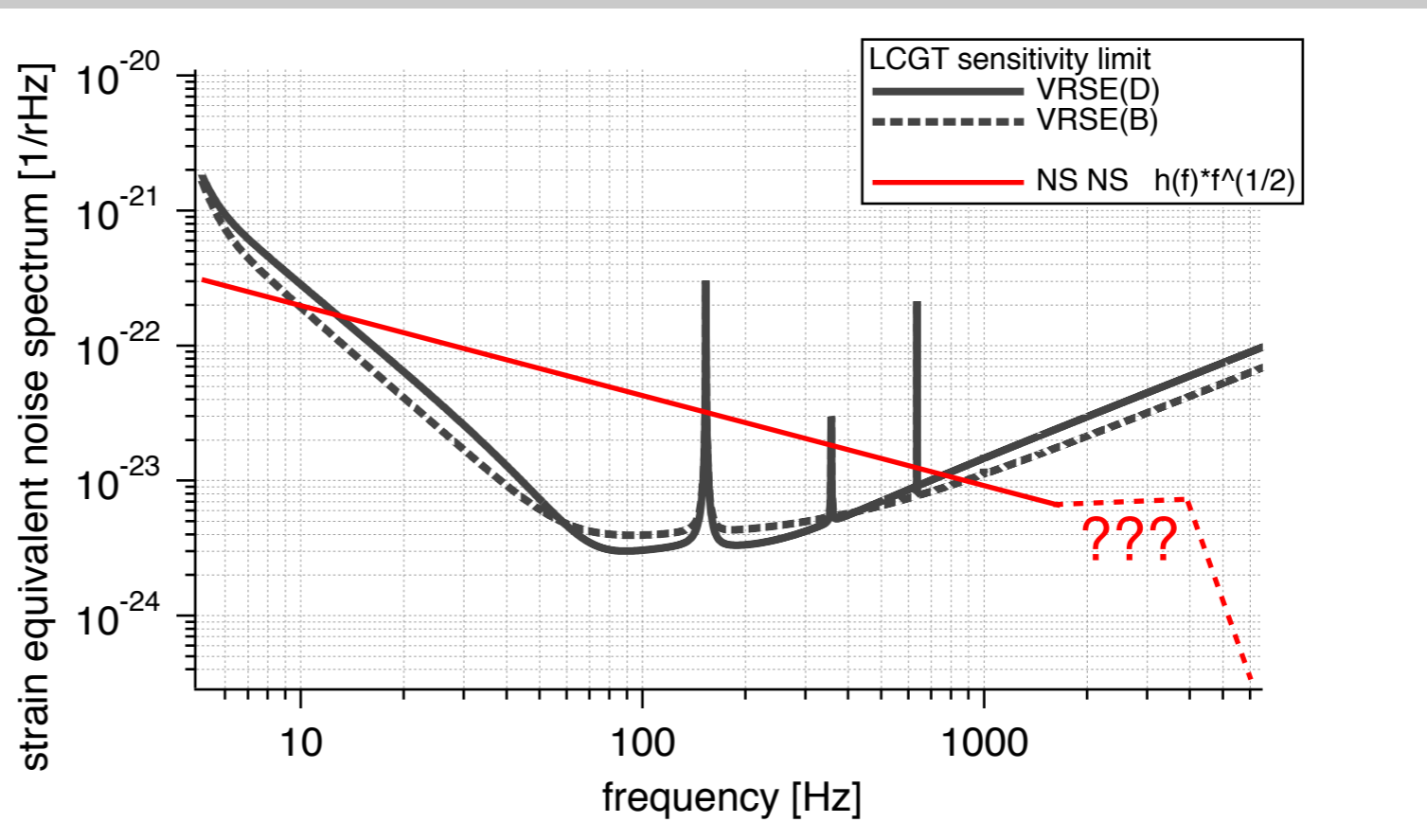


連星合体の波形

時系列



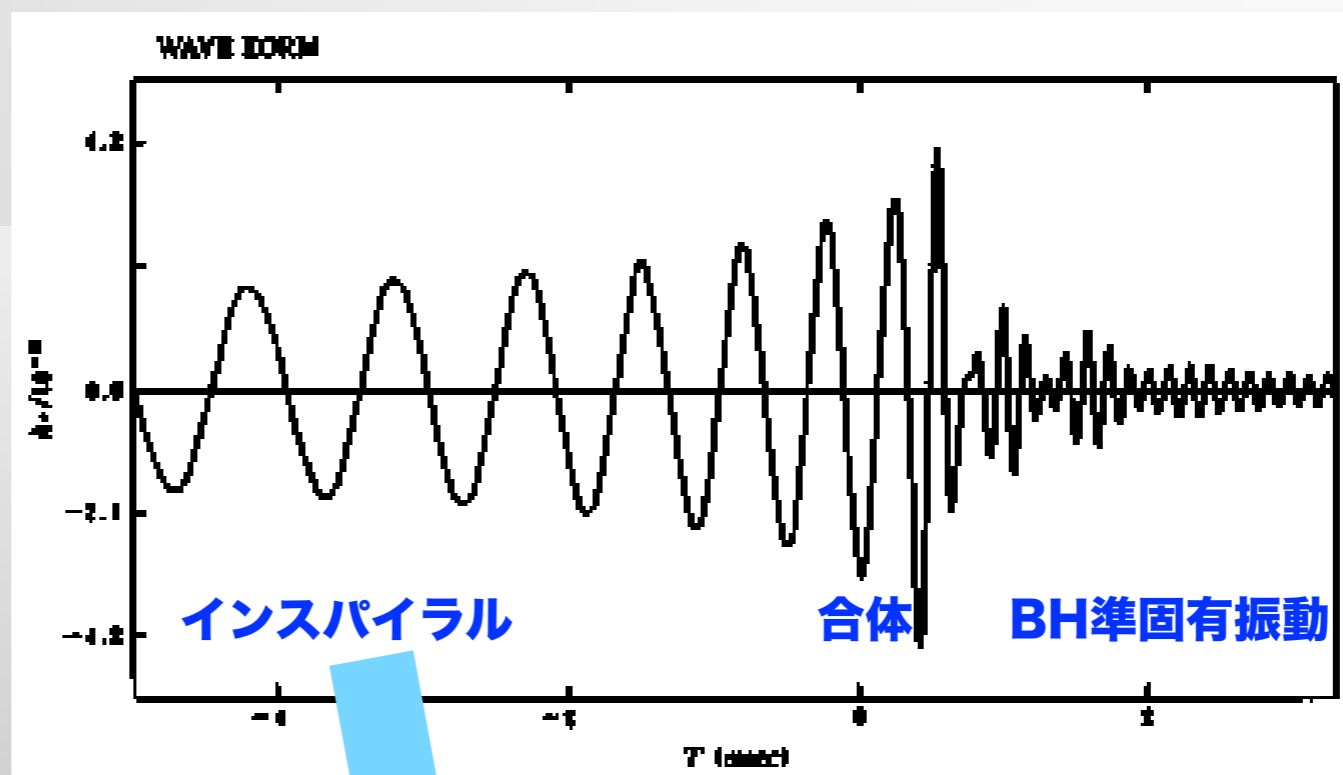
周波数領域



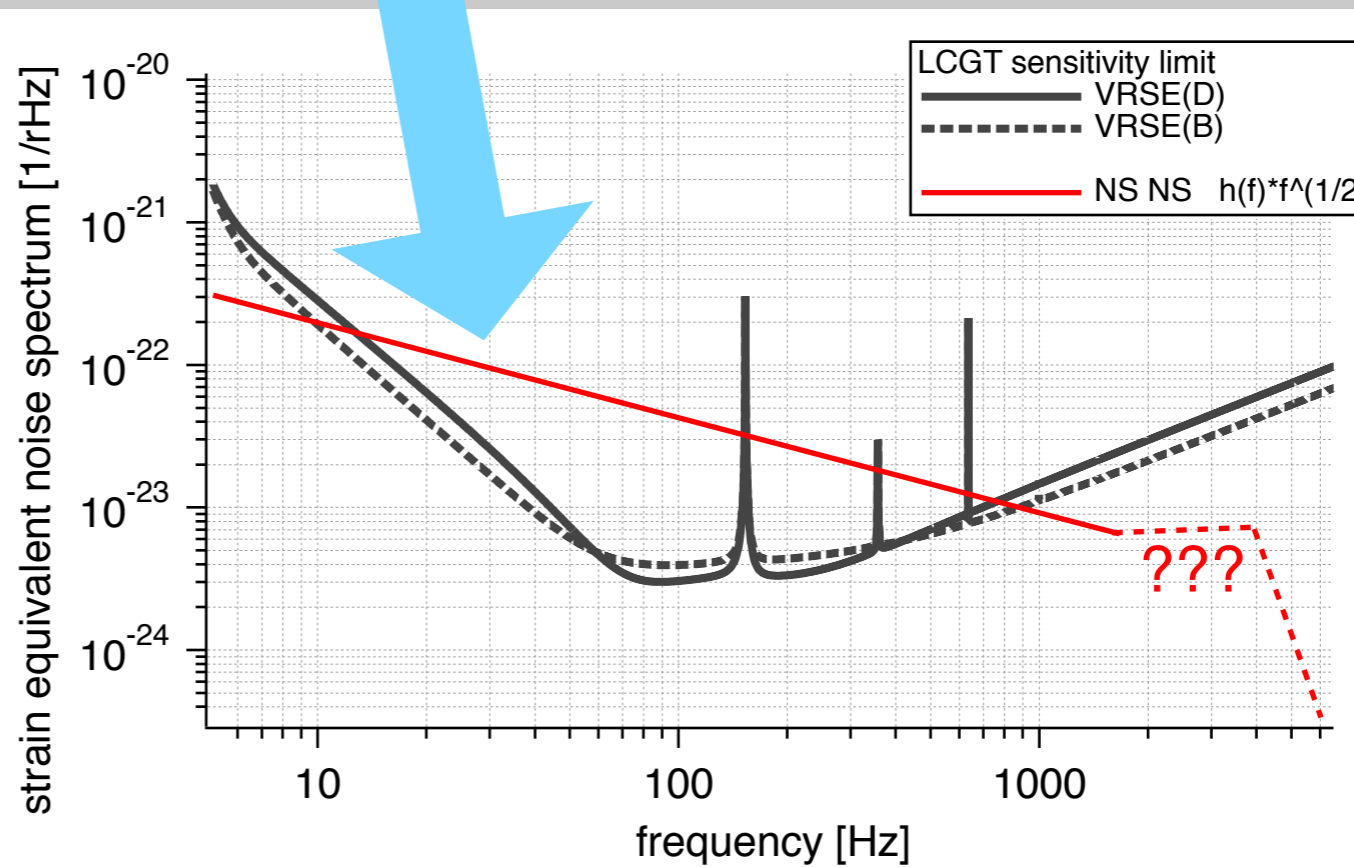


連星合体の波形

時系列



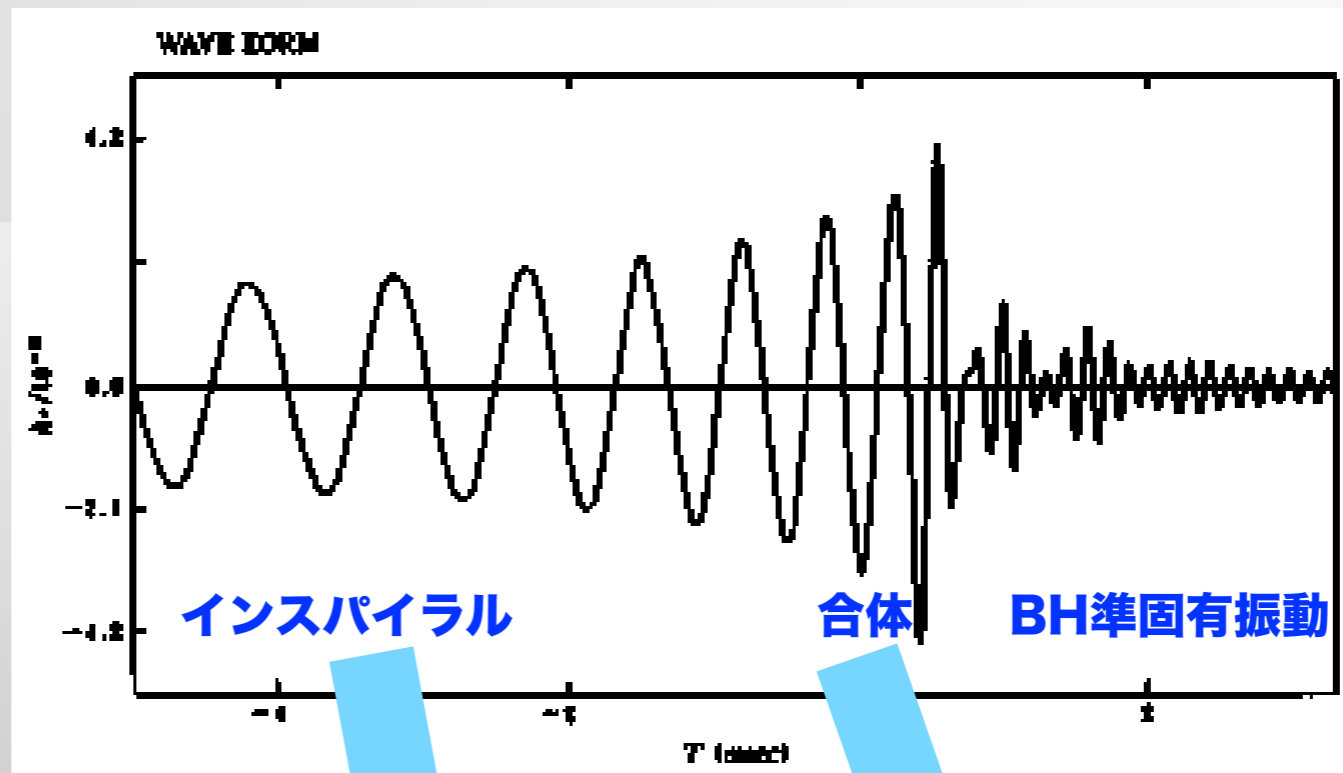
周波数領域



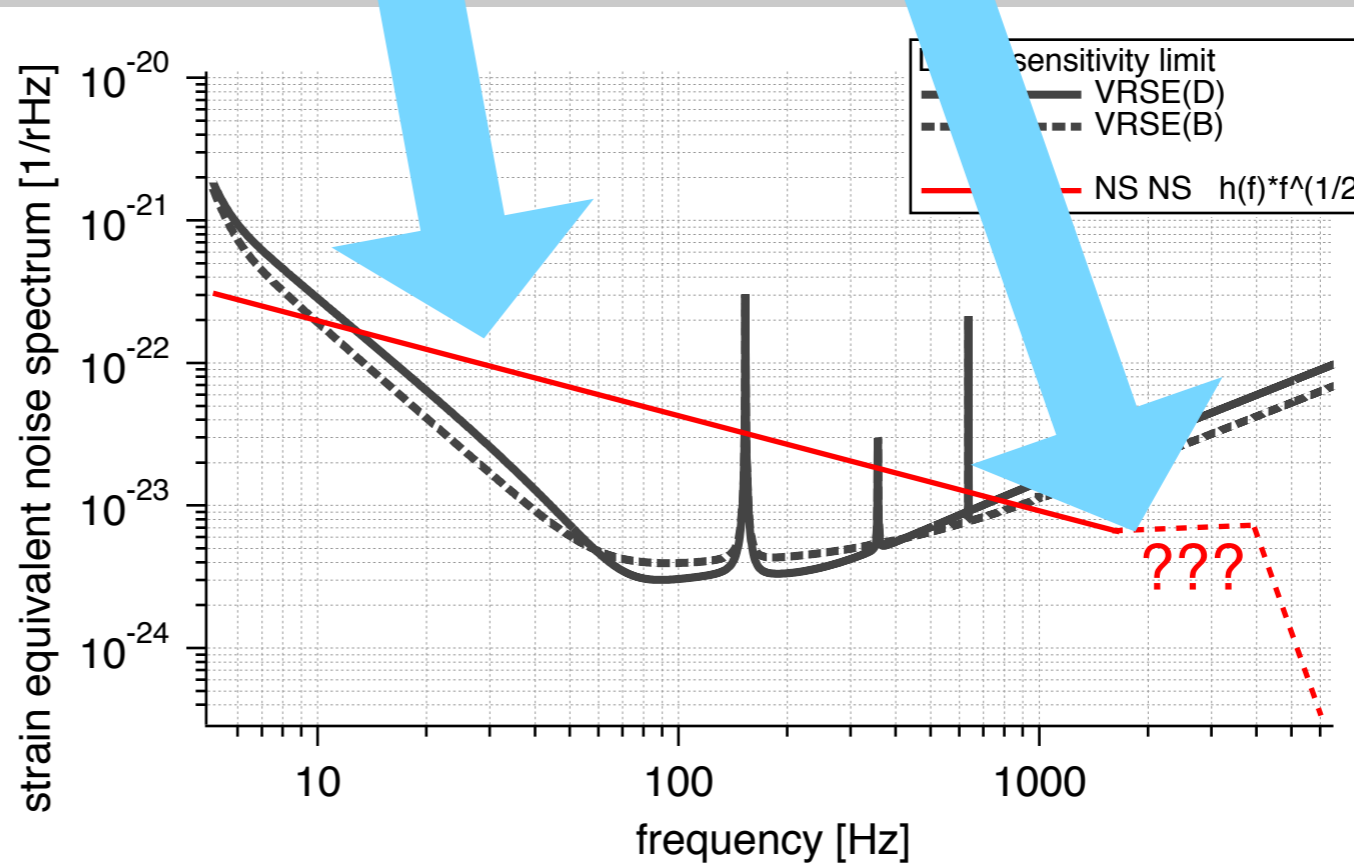


連星合体の波形

時系列



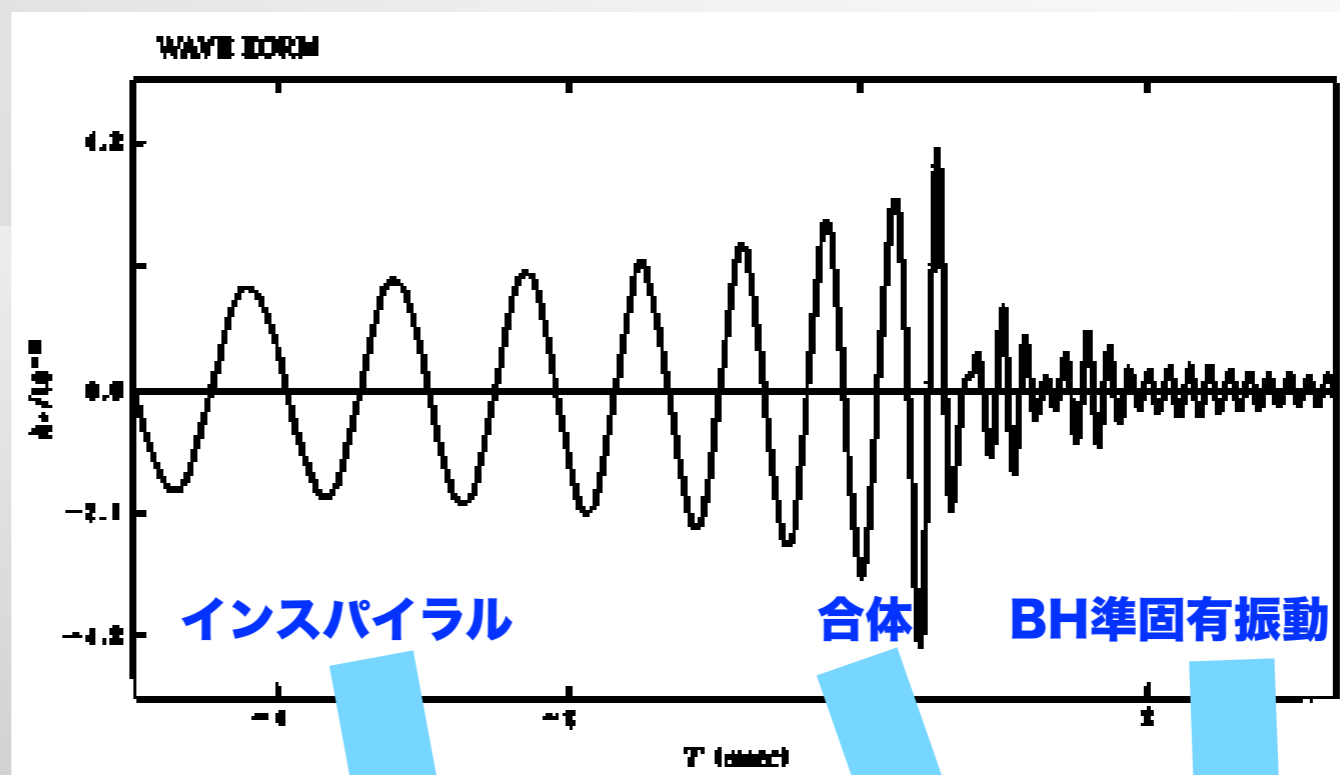
周波数領域



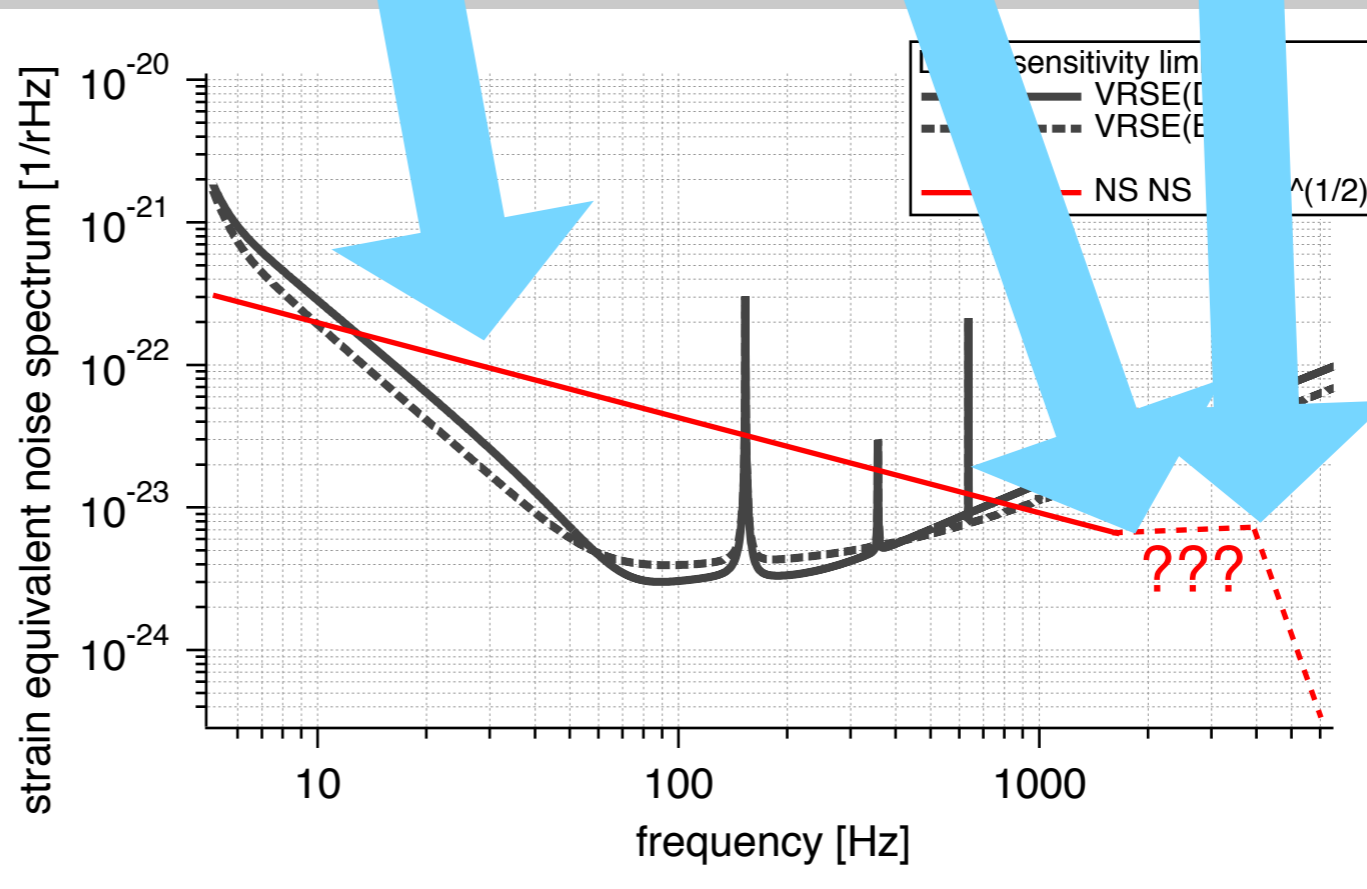


連星合体の波形

時系列



周波数領域



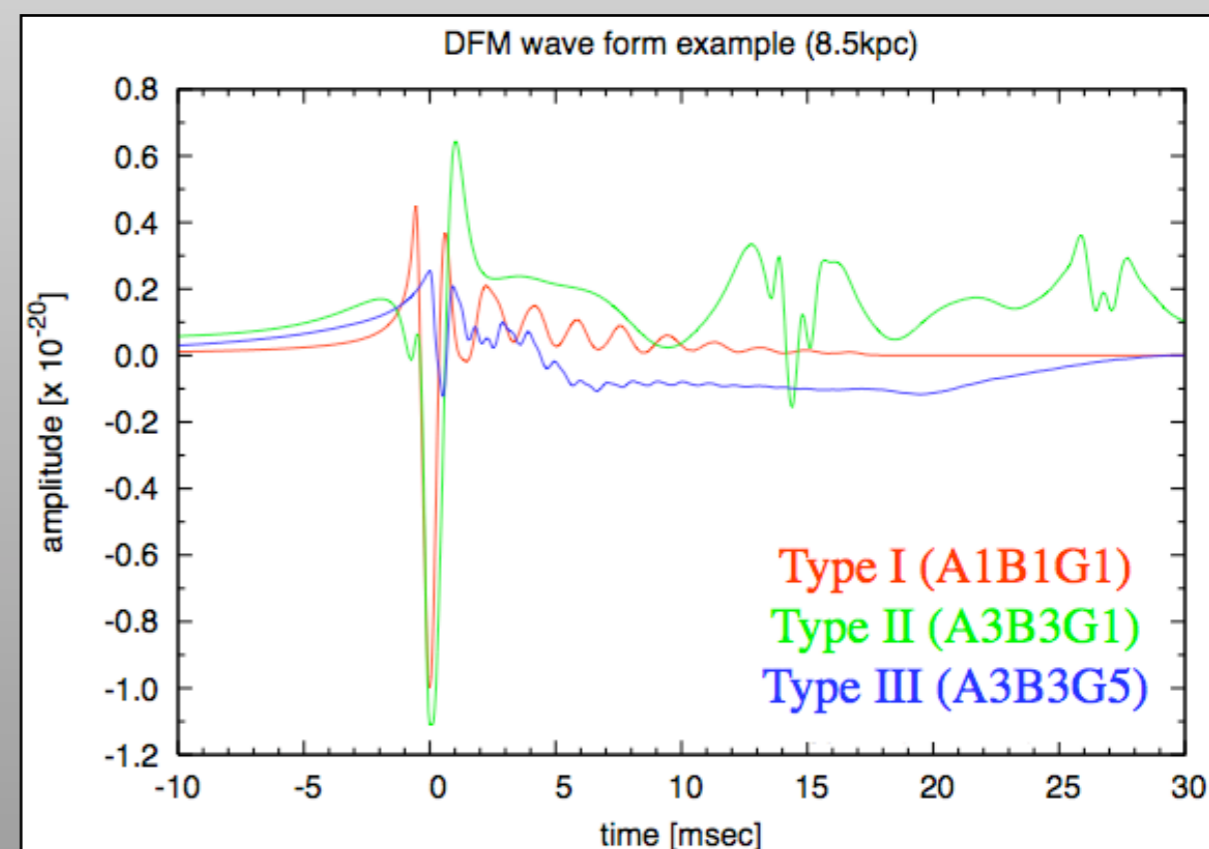
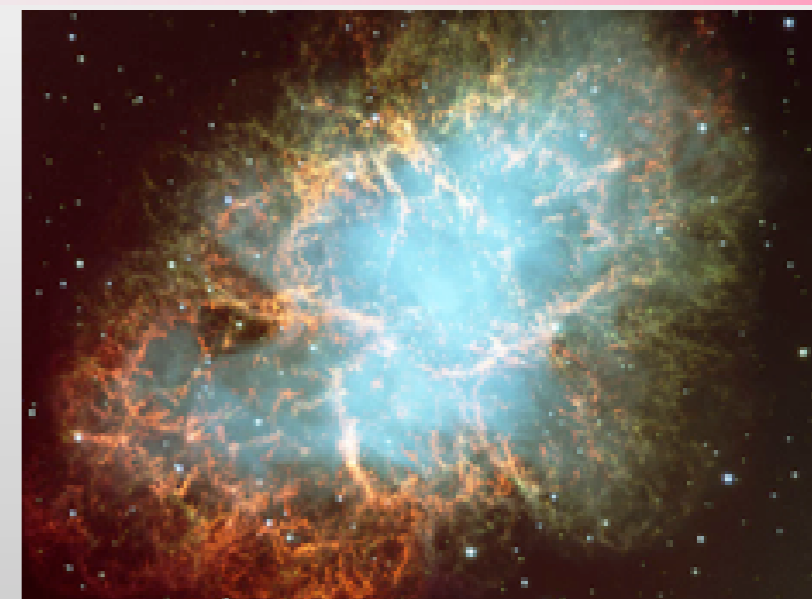


超新星爆発

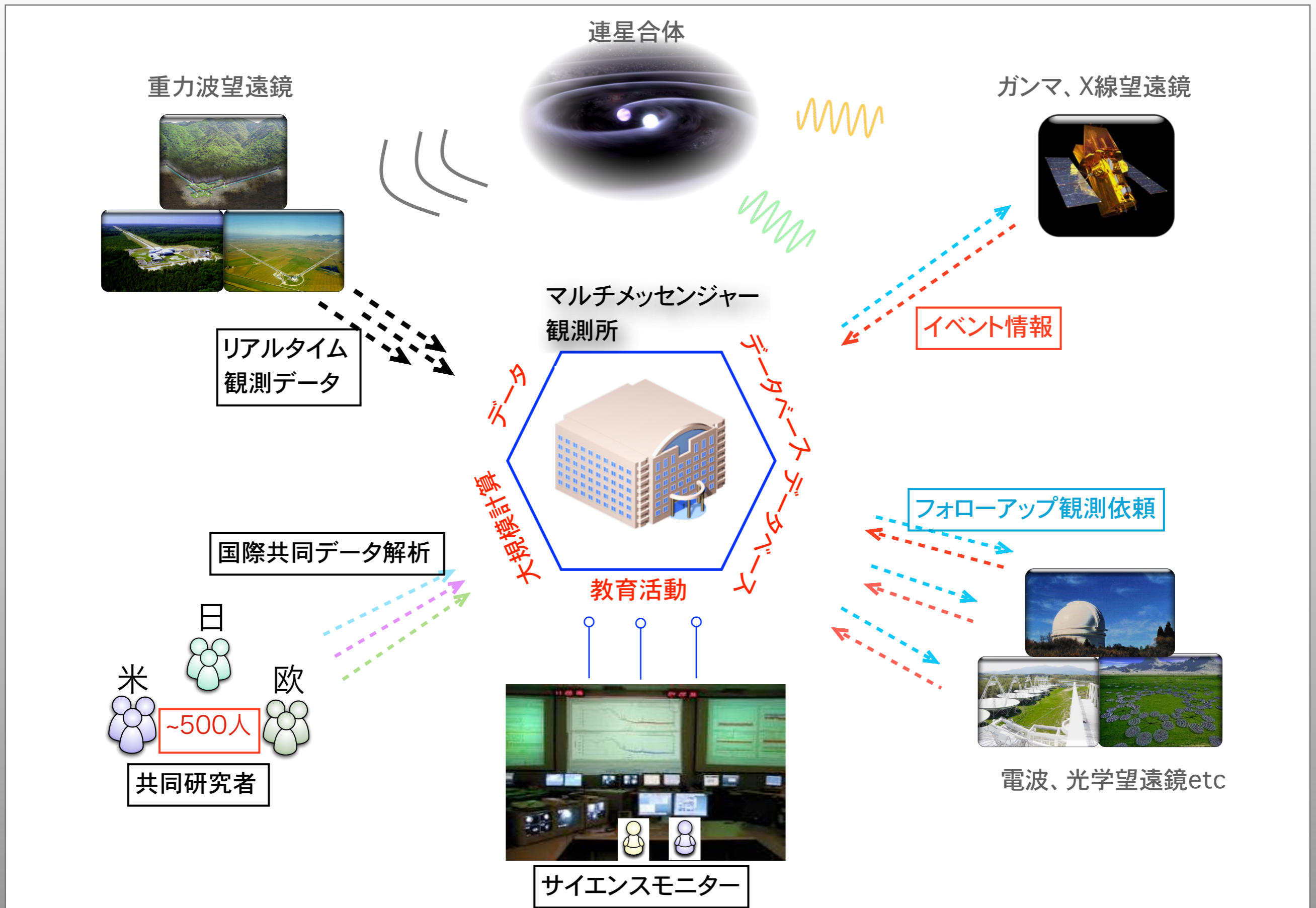
超新星爆発のさまざまな局面で、
重力波放射が期待される。

- コア崩壊 (バウンス)
- 対流
- 原始中性子の形成とg-mode不安定性
- ニュートリノ放出
- 降着と衝撃不安定性

(SASI (standing-accretion-shock instability))



Dimmermeier et al.





スケジュール

	2012	2013	2014	2015 iKAGRA	2016	2017 bKAGRA	2018
Target	Prepare Data Analysis <u>for 4th year</u>			<u>System Test</u>	Build up <u>full data system</u>	<u>Analyze Continuously</u> <u>Followup with Other</u> <u>Obs.</u>	
Hardware	small cluster mini-system		<u>partial system</u>		<u>full system</u>	+ cpu, storage, peripherals	
Software	Construct common environment Implement GW search			<u>whole data pipeline test</u>			



KAGRA”データ解析”への参加の可能性

どの部分も人手が不足。また、アイデアや関係分野の経験を活かしたい部分がい
くつもある。

データ取得系

データ転送・貯蔵・管理

- 計算機ハードウェアの導入、転送系システムの構築が必要。

データ評価

- かならずしも「重力波物理」ではない知識やスキルが活かせる。（雑音一
般についての知見、統計や情報理論）

イベント解析

- 第一義的には「重力波」のサイエンス
- 技術的には、「微小信号」取り扱い。情報や数学の人も活躍の余地あり。
- ソフトウェアの仕事が多い。