

MOA望遠鏡による重力波フォローアップ

2016/10/30

名古屋大学 朝倉悠一郎

重力波

重力波とは

一般相対性理論により預言される。
物質が加速度運動をすると放射され、
空間の歪み

マイケルソン干渉計を応用した重力波検出器で検出される。
複数の重力波検出器では位置を特定できる。

重力波の

- 超新星
- 高密度
NS(中)
- NS-E
- BH-BH

本研究では重力波天体をすぐに発見できる
フォローアップシステムの開発を行った。

とされ、

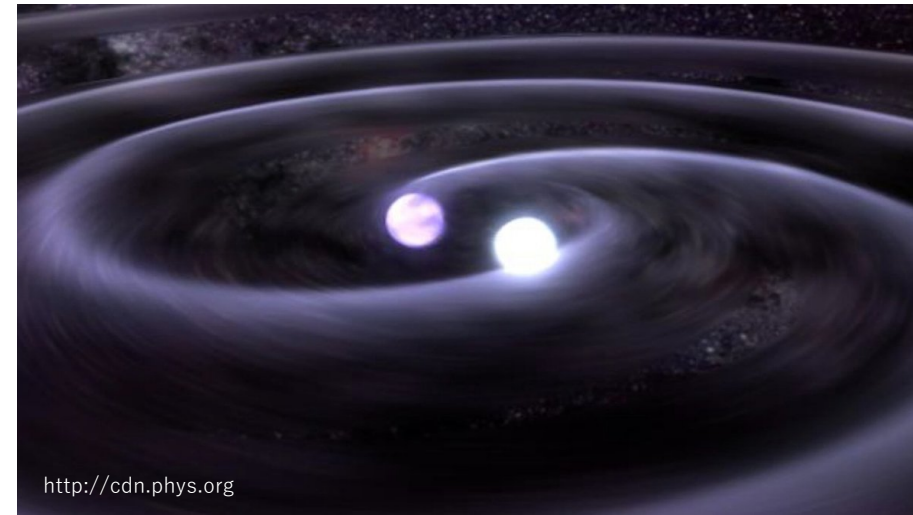
電磁波フォローアップ

重力波天体の物理に迫るためには、、、

- **重力波天体の同定**

<- 重力波検出器の位置決定精度は $\sim 10^2 \text{deg}^2$

- 分光器による詳細な観測 暗くなってからでは遅い!



EM(electromagnetic) counterpart

中性子連星合体

- sGRB(ジェット加速粒子)
 - γ 線

放射時間は短い！
すぐに重力波天体を見つけないといけない

- sGRB(相対論的)
 - 外部衝撃波を生む。

外部衝撃波による加速粒子がシンクロトロン放射

- X線
- 可視光
- 電波

放射時間~10days

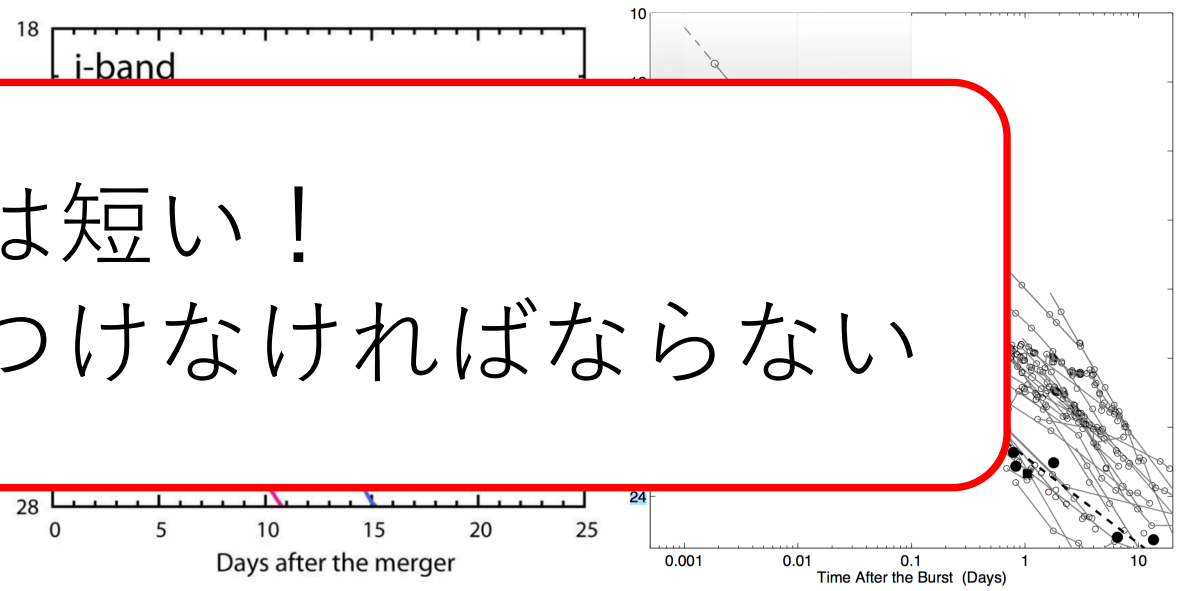
- kilonova

r-processによって作られた不安定元素が熱的放射する
等方的な放射

- 可視光
- 赤外

放射時間~10days

光度曲線



中性子連星合体・超新星爆発

sGRB after glow

超新星爆発

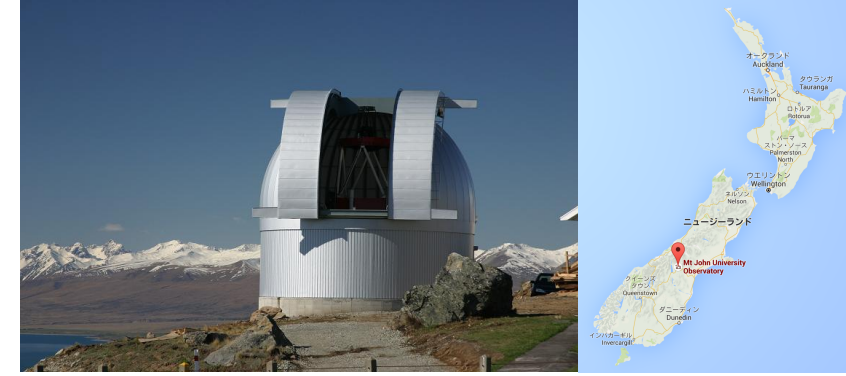
- burst
 - 等方的な放射
 - 可視光

ブラックホール連星合体

- 電磁波の放射は期待できない

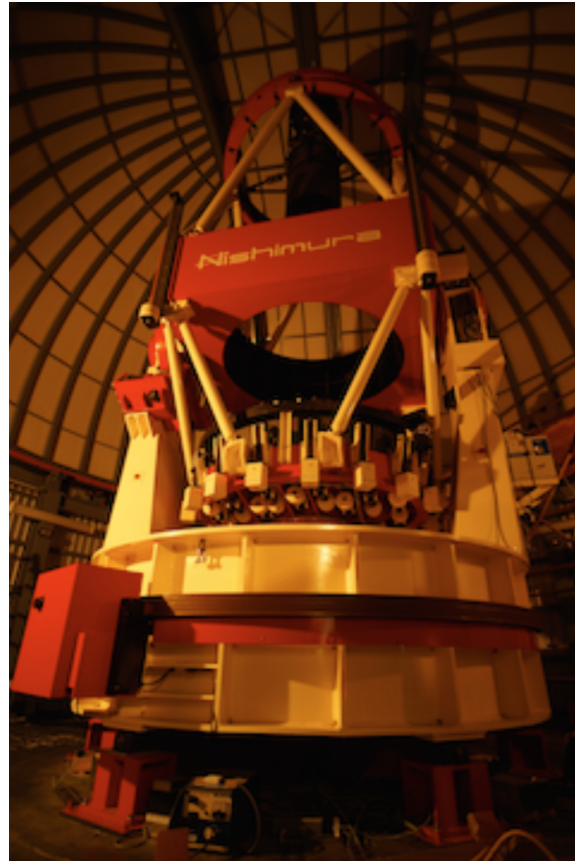
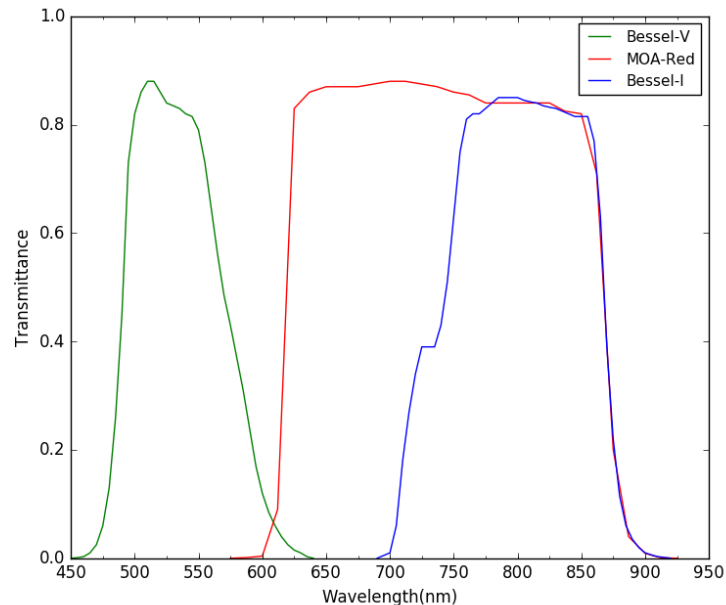
MOA(Microlensing Observations in Astrophysics)

マイクロレンズ法によるMachosや系外惑星の探索を行っている



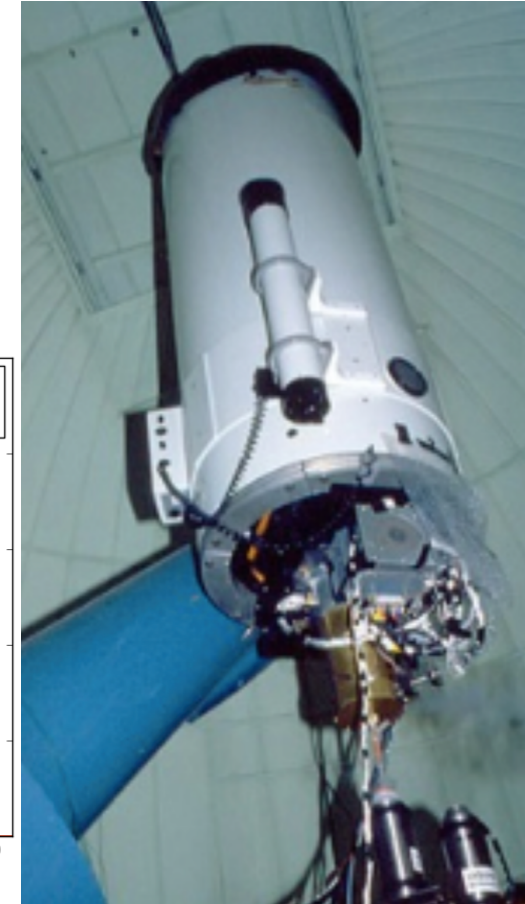
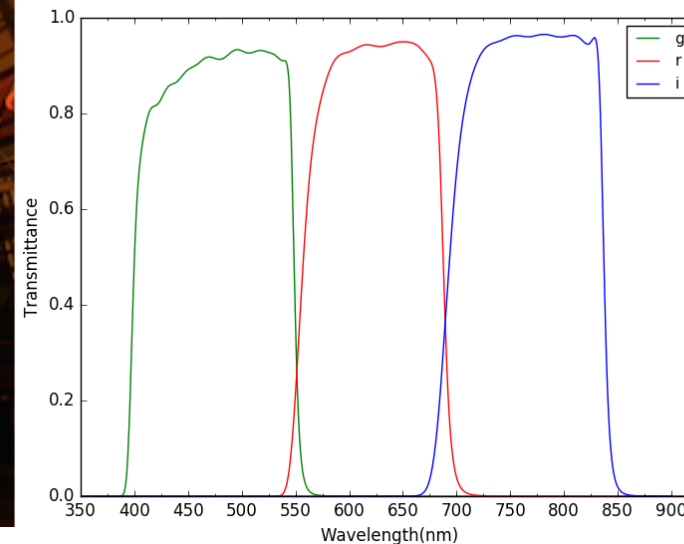
MOA-II telescope

- 口径1.8m
- 主焦点式
- 2048k[pixel] × 4096k[pixel]
10枚
- 視野 2.18deg²
- filter MOA-Red, I, V



B&C telescope

- 口径61cm
- カセグレン焦点式
- 3色同時撮影
- 736[pixel] × 1092[pixel]
各色1枚
- 視野 22min²
- filter i,r,g



LIGO 01

2台の重力波検出器LIGOによる初のサイエンスラン
人類初の重力波直接検出を目指す

期間：2015/09/18~2016/01/12

検出を知らせるアラートが出る

ターゲットは100Mpcの中性子連星の合体(0.1イベント)

当時ブラックホール連星の合体の検出は期待されていなかった

3つの重力波を検出し、そのうちアラートが出たのは2つ

MOAでは重力波検出後にリアルタイムの観測を行った。

しかし、解析パイプラインは制作中だったため完成後に解析を行った

観測・解析の流れ

1 重力波アラート

- 重力波検出後5~10分でskymap(位置情報)を送信

2 観測領域の決定(アラート通知システム)

- アラートを受信し自動で観測領域を決定
- 即時に観測依頼のメールを送信する

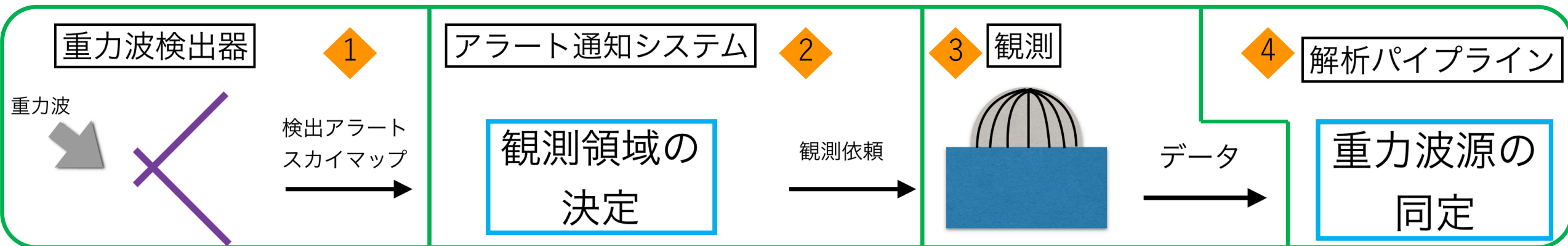
O1ではプログラムエラーでアラートを受信できず、
手動で観測者に観測依頼のメールを出した。

3 観測後データを日本にダウンロード

4 重力波天体の同定

- 観測データに候補天体があるか解析を行う
- 候補天体がある場合は他の観測チームへ報告、
追観測も行う
- ない場合は明るさの上限(限界等級)を求める

O1では解析パイプラインが完成しておらず、
リアルタイムの解析はできなかった。



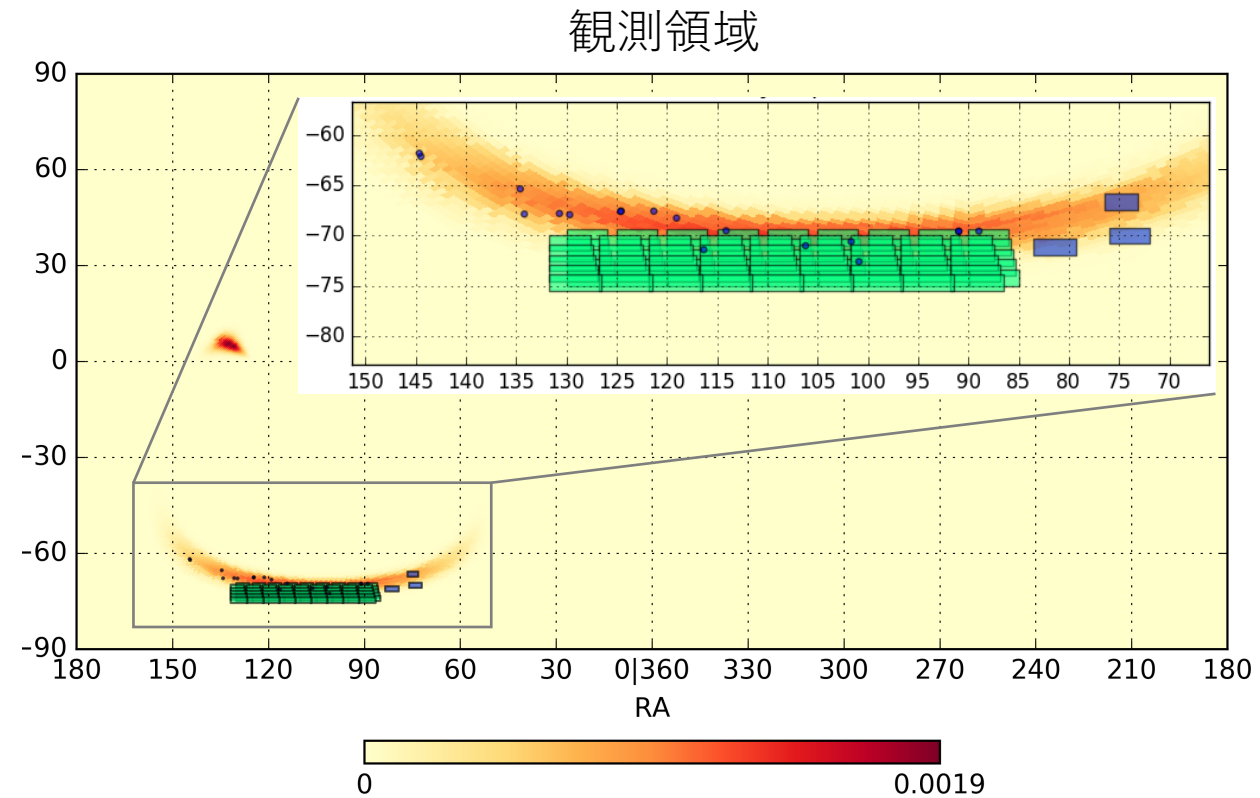
GW150914 2016/09/14 09:53:51

ブラックホール連星の合体
質量: $36_{-4}^{+5}M_{\odot}, 29_{-4}^{+4}M_{\odot} \Rightarrow 62_{-4}^{+4}M_{\odot}$
距離: $410_{-180}^{+160}M_{pc}$

位置誤差: 600deg^2

※アラートに合体天体の質量及び距離の情報は無し
100Mpc以内の中性子連星合体を想定
リアルタイムでは100Mpc以内の銀河を観測

- 銀河サーベイ 2015/9/20~
各銀河1日 2~4回、3~4日間観測
B&C望遠鏡, filter : i, r, g, exposure :120s
- LMCサーベイ
MACHOs探索のために毎日観測
9/16, 17, 18のデータを解析
MOA-II望遠鏡, filter : R, exposure : 300s



点：銀河サーベイ 緑：fermi 青：LMC

北半球のエラー領域は太陽が近かったため
南半球の観測が重要となった。

- fermiによる誤差領域の観測 2016/2/12~
各field 2回 64deg^2 を観測
MOA-II望遠鏡, filter : R, exposure : 120s&300s

GW151226 2016/12/26 03:40:00

ブラックホール連星の合体

質量: $14.2_{-3.7}^{+8.3}M_{\odot}, 7.5_{-2.3}^{+2.3}M_{\odot} \Rightarrow 20.8_{-1.7}^{+6.1}M_{\odot}$

距離: $440_{-190}^{+180}M_{pc}$

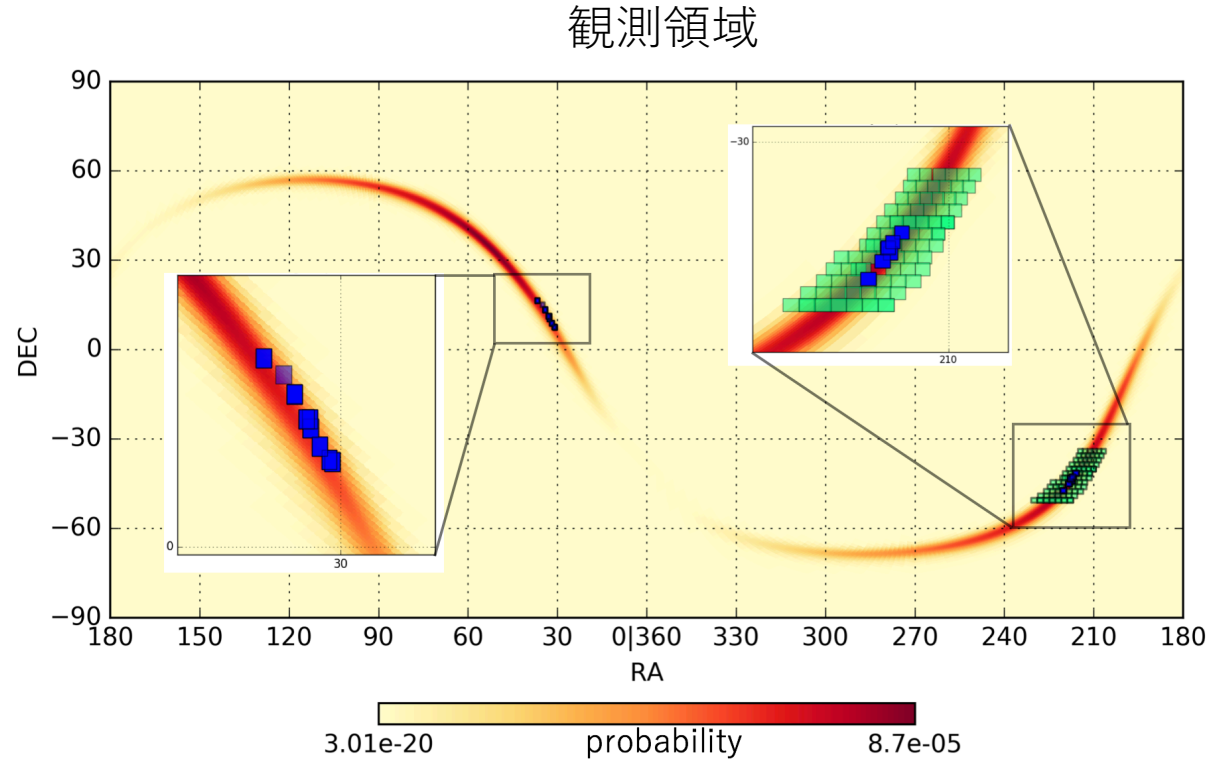
位置誤差: $850deg^2$

※アラートに合体天体の質量及び距離の情報は無し
100Mpc以内の中性子連星合体を想定
リアルタイムでは100Mpc以内の銀河を観測

- 銀河サーベイ 2015/12/29~
17銀河、各銀河1日2回、3日間観測
- 広視野サーベイ 2016/3/8~
確立の高い $145deg^2$ を観測
1exposure



共にMOA-II望遠鏡使用, filter : MOA-Red, exposure :120s



青：銀河サーベイ 緑：広視野サーベイ

GW150914の結果から、100Mpcより遠いBH-BH合体の可能性。
100Mpc以内の銀河観測では不十分
解析手法の確立

重力波天体の同定(広視野サーベイ)

1. 撮影データに写っている星を検出
skyより5 σ 明るいもの

5,955,235 objects

2. 可視光天体カタログUSNO-B1.0と比較
5秒角以内にあるか

2,691,924 objects

3. 星ではないものを除外(spike, 宇宙線, ゴミ)
PSF fitより形の悪いものを除外

92,636 objects

4. DSS imageに写っているかチェック
DSS imageで星を検出。5秒角以内にあるか

2,953 objects

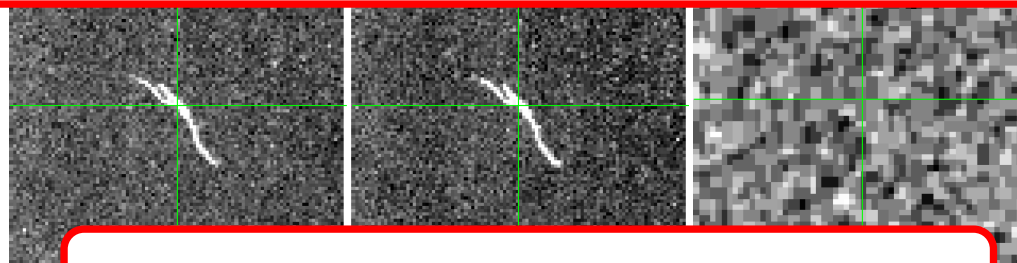
additional check

- ・ 銀河(250~620Mpc)周辺のobjectは目視チェックへ
上記のクライテリアでは銀河周辺の天体は除外される。
1.の検出された星と銀河カタログを比較し、5秒以内にあるobjectを無条件で目視チェックする。

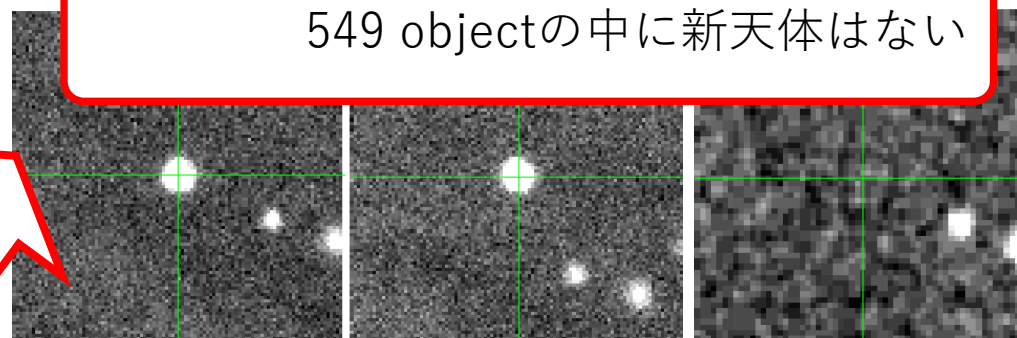
549 objects

目視チェックの結果

- ・ 星であるか(point like?)
722/2,953 objectが星でない
- ・ DSSに存在するか
2,192/2,953 objectがDSSに存在
- ・ 移動天体であるか
1 exposureのために判断できず
- ・ 39 objectsが目視チェックを通過 -> candidate



- ・ 銀河の周辺の新天体
549 objectの中に新天体はない



観測データ

DSS

candidate

目視チェックを通った39天体について追調査を行った

34 objects -> 既存の天体(in 2MASS image, WISE image)

3 objects -> 小惑星(in MPChecker)

1 object -> Supernova(PSN J14102342-4318437)
重力波検出前(2015/12/15)に発見されている

1 object -> unknown

2MASS, WISE
赤外のサーベイ
全天を観測している

MPChecker: Minor Planet Checker
小惑星の探索ツール
任意の時間・位置にある小惑星
を検索できる

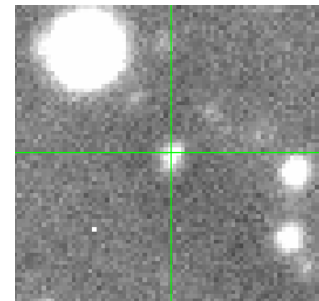
unknown star

RA=221.171061, Dec=-44.077346

2枚のimageに写っているが、動いていない。
撮影の間隔が短いため移動天体との判断ができない。

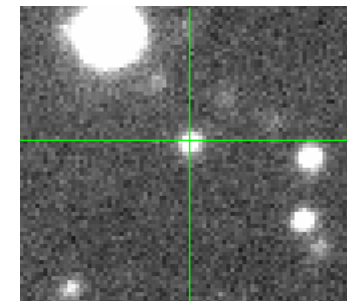
8月下旬に再観測を行ったが存在せず
近くに銀河が無いことから未知の移動天体と考えられる

限界等級 (5σ) 18.2

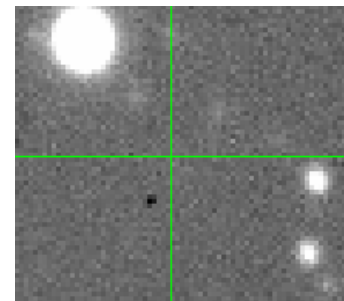


3/10 観測
18.0 mag

2分後



3/10 観測
18.3mag



8/29 観測

解析結果

重力波天体は検出されなかった。
BH-BH mergerなので電磁波を放射
は期待できない。

GW150914

	銀河サーベイ	LMCサーベイ	fermi 誤差領域
telescope	B&C(120s exposure)	MOA-II(300s exposure)	MOA-II(120s&300s exposure)
candidate	no candidate	no candidate	no candidate
limiting magnitude(5σ)	g: 18.9, r: 18.7, i: 18.3	MOA-Red: 18.3	MOA-Red 120exp:18.8, 300exp:19.4

GW151226

	銀河サーベイ	広視野サーベイ
telescope	MOA-II(120s exposure)	MOA-II(120s exposure)
candidate	no candidate	1 (no relation to GW)
limiting magnitude(5σ)	MOA-Red: 18.0	MOA-Red: 18.2

大量の天体の中から重力波を同定する解析手法を確立することができた！

次期LIGO稼働ラン02(2016年12月~)での観測体制

01での反省点

- アラート通知システムのエラー
- 観測後すぐに解析できなかった(6ヶ月)
- 1露光のフィールドの移動天体が判定できない

02での重力波検出器

- LIGOの感度が向上
~200Mpcの中性子連星合体が観測可能
遠方でのBH-BH合体もたくさん検出可能
- Virgoの参入
位置誤差範囲が減少する

02での観測体制

- エラーを修復。即時、自動の観測依頼が可能
- 解析パイプラインは完成。3日程度で解析可
- 複数のイメージを撮る

- 遠くの電磁波放射は暗いので、より深い観測を行う
100Mpcより遠い銀河も観測
- 位置誤差範囲の減少によりサーベイ時間の短縮
集中的な観測が可能

02ではリアルタイムでの観測・解析が可能
重力波天体が明るい10日以内に同定を行い、
分光などの追観測が可能

まとめ

- 重力波フォローアップのため観測及び解析システムを開発した
- 重力波イベントGW150914・GW151226に際してフォローアップ観測を行った
- 解析の結果どちらも重力波と関係した天体は見つからなかった
- 重力波の解析手法を確立
- 次のLIGOの稼働ラン02では万全の体制でフォローアップ観測を行う

BACK UP

Fermi error region

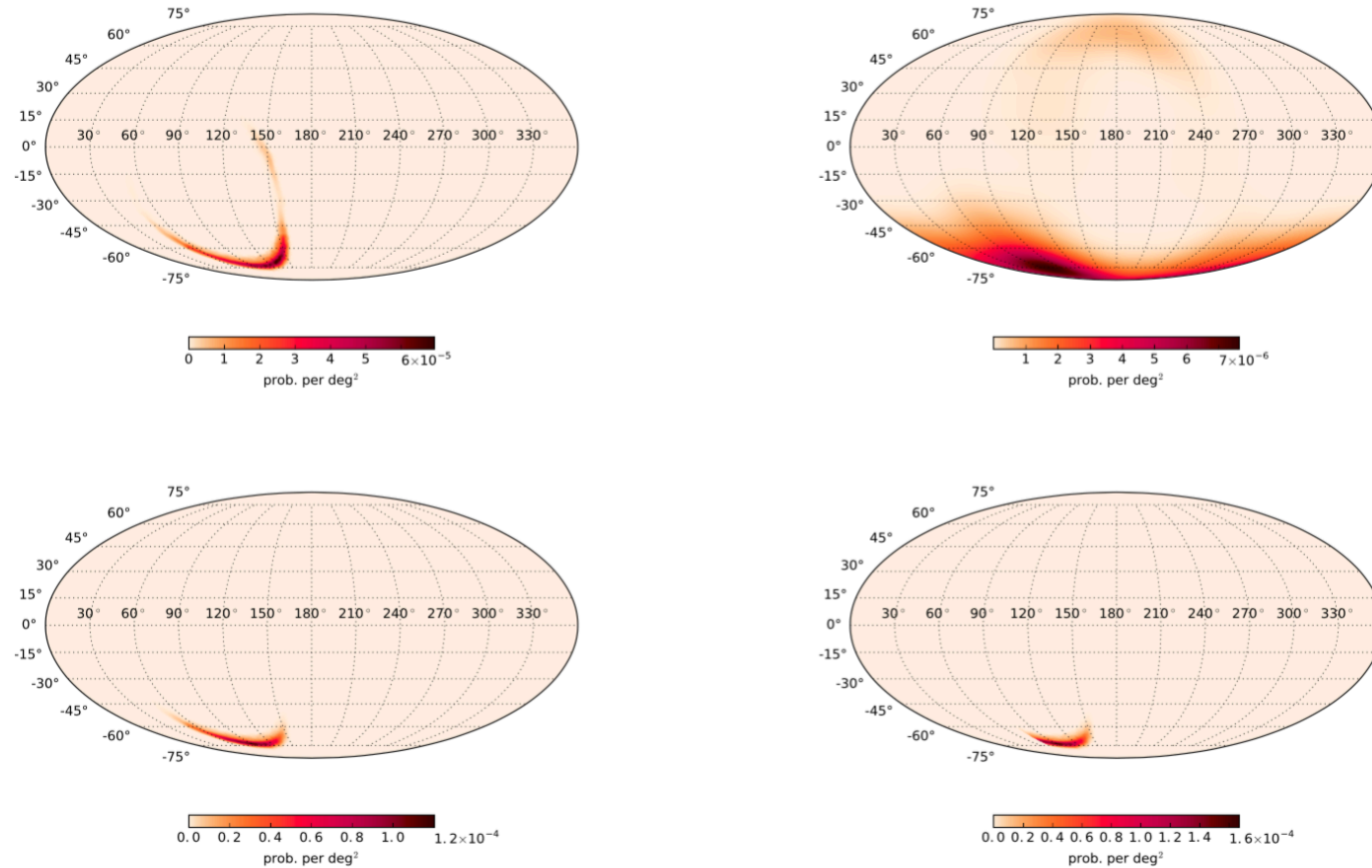


Fig. 8.— The LIGO localization map (top left) can be combined with the GBM localization map for GW150914-GBM (top right) assuming GW150914-GBM is associated with GW event GW150914. The combined map is shown (bottom left) with the sky region that is occulted to *Fermi* removed in the bottom right plot. The constraint from *Fermi* shrinks the 90% confidence region for the LIGO localization from 601 to 199 square degrees.

DSS: Digitized Sky Survey
全天のimageを提供
限界等級 ~22

GWGC: Gravitational Wave Galaxy Catalog
重力波フォローアップのために作られた
全天100Mpc以内の銀河を収録
(LIGOの中性子連星合体への感度を考慮)

USNO-B1.0: 可視光全天カタログ
10億の銀河を含む天体(V=21まで)を収録
filter B, R, I

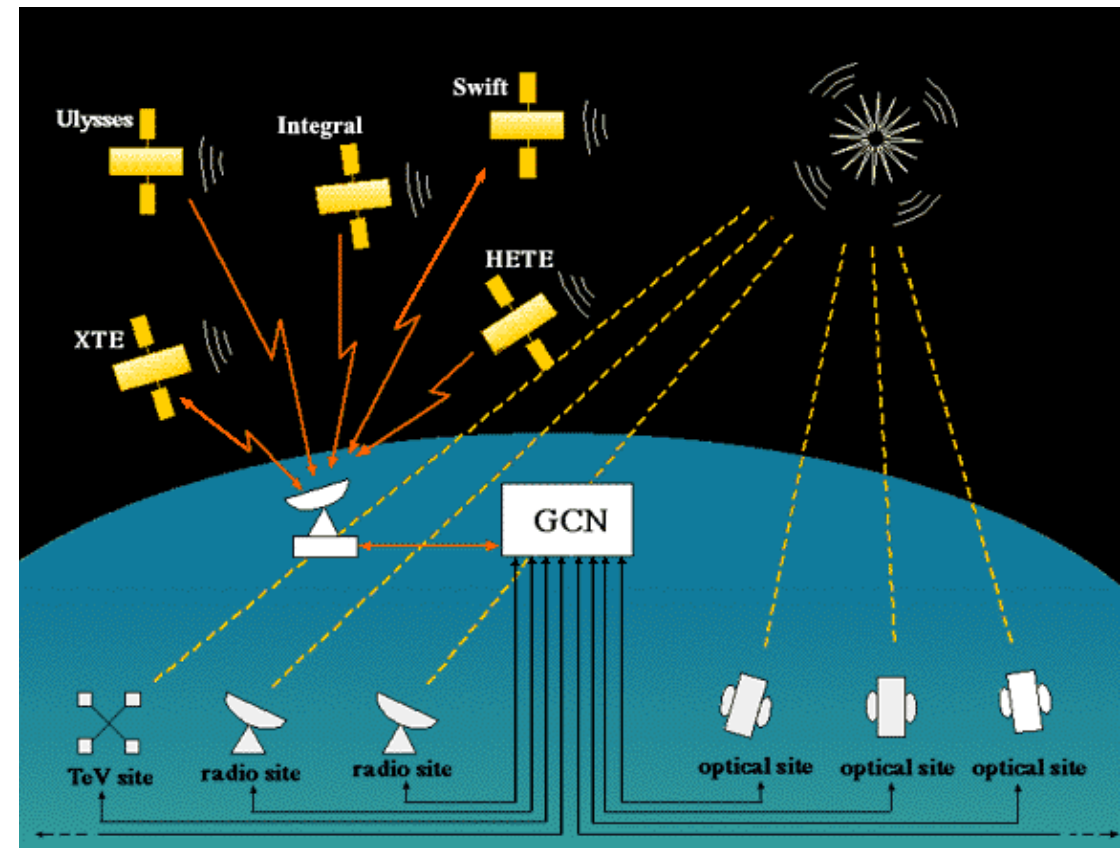
GLADE: Galaxy List for Advanced Detector era
次世代の重力波検出器を想定
100Mpcより遠い銀河も収録
200万銀河を距離などの情報と収録

GCN: Gamma-ray burst Coordinate Network

GRBの観測連携のために作られたコミュニケーションツール
アラートや観測結果をリアルタイムに報告できる

- GCN notice
主にアラートを送信。ソケット通信でリアルタイムに受信できる
- GCN circular
メールで観測結果などを送受信できる

重力波のアラートもGCNで送信されるが、
受け取ることができるのはLIGOとMOUを結んだ
グループのみ



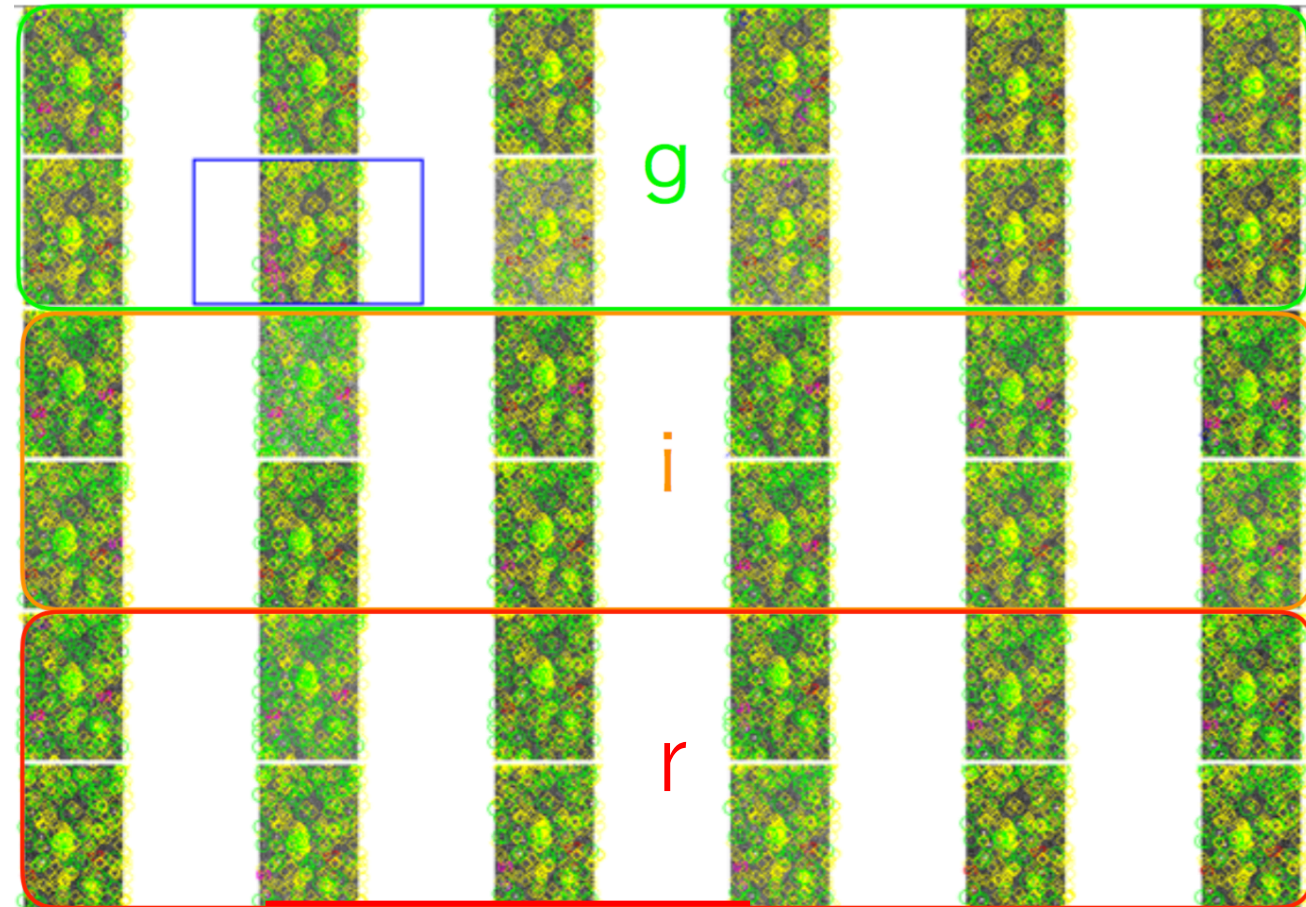
重力波天体の同定

重力波天体を探すパイプラインを作成
連星合体後に電磁波を放射するので、カタログや
既存のサーベイイメージと比較し、突発天体を探す

1. 撮影データに写っている星を検出
skyより 5σ 明るいもの
2. 可視光天体カタログUSNO-B1.0と比較
5秒角以内にあるものを消去
3. 星ではないものを除外(宇宙線)
CCDに映る宇宙線のPSFのFWHMは極端に小さい
FWHM <2 pixel のものを消去
典型的な星のFWHM ~ 7 pixel
4. 同じ位置で2回以上検出されているか

USNO-B1.0: 可視光全天カタログ
10億の銀河を含む天体を収録
filter B, R, I

- 目視チェック
銀河ごとにクライテリアの結果をチェックする
クライテリアを反映した撮影イメージを
バンド別、観測時間順に表示



重力波天体の同定

重力波天体を探すパイプラインを作成
連星合体後に電磁波を放射するので、カタログや
比較し、突発天体を探す

星を検出

O-B1.0と比較

去

(宇宙線)

FWHMは極端に小さい

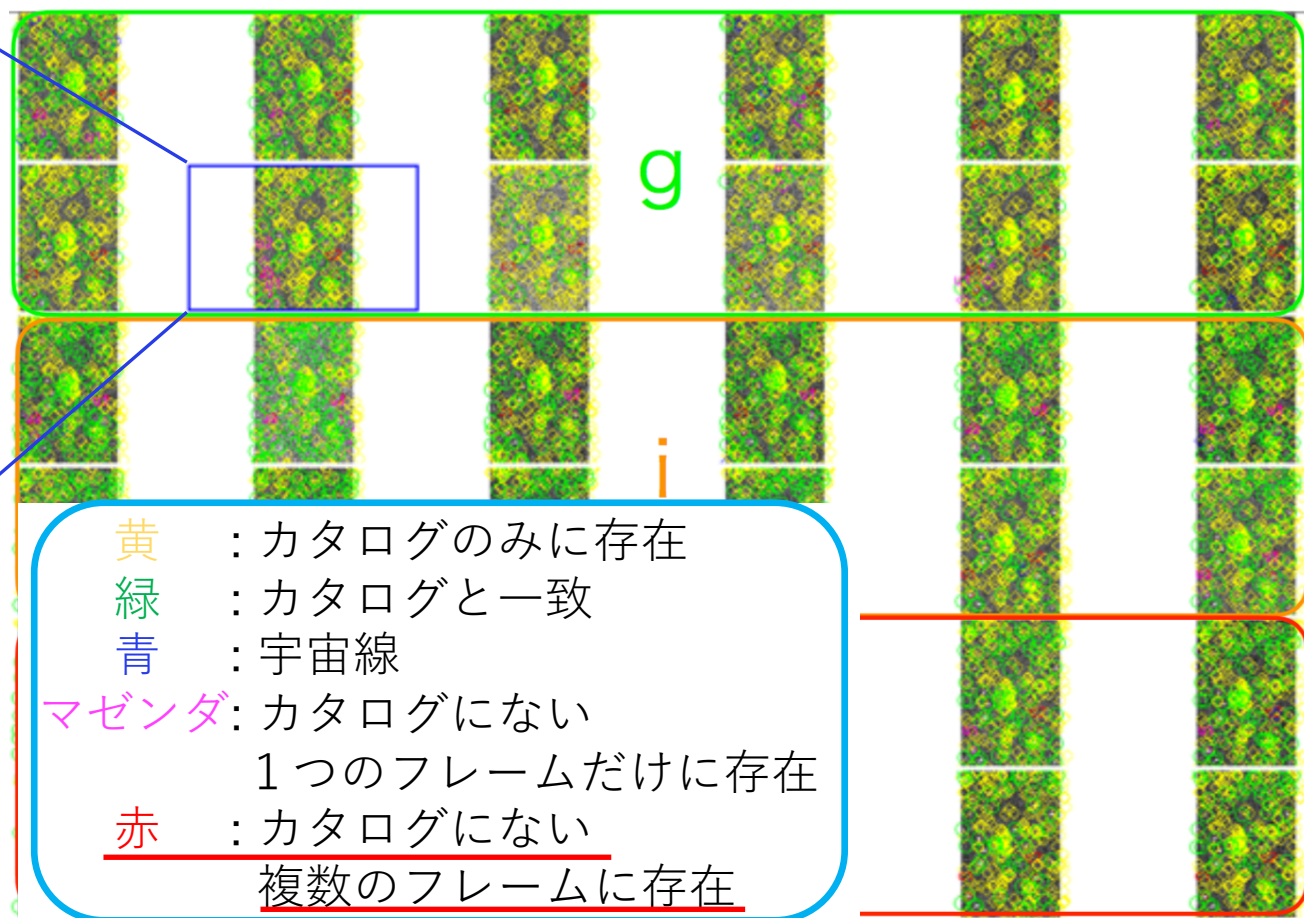
去

xel

されているか

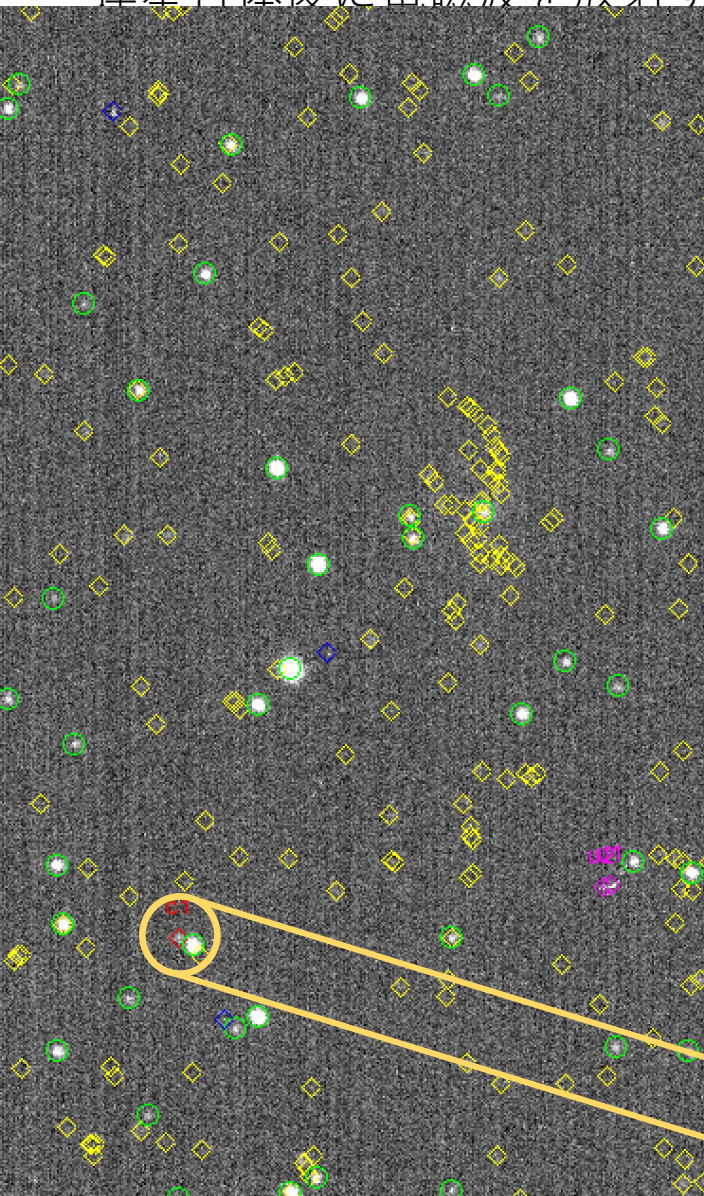
天カタログ
体を収録

- 目視チェック
銀河ごとにクライテリアの結果をチェックする
クライテリアを反映した撮影イメージを
バンド別、観測時間順に表示



重力波天体の同定

重力波天体を探すパイプラインを作成
連星合体後に電磁波を放射するので、カタログや比較し、突発天体を探す



星を検出

O-B1.0と比較

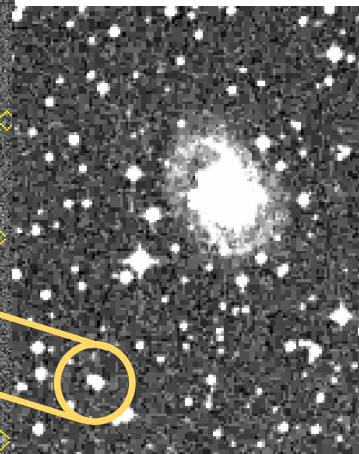
去

(宇宙線)

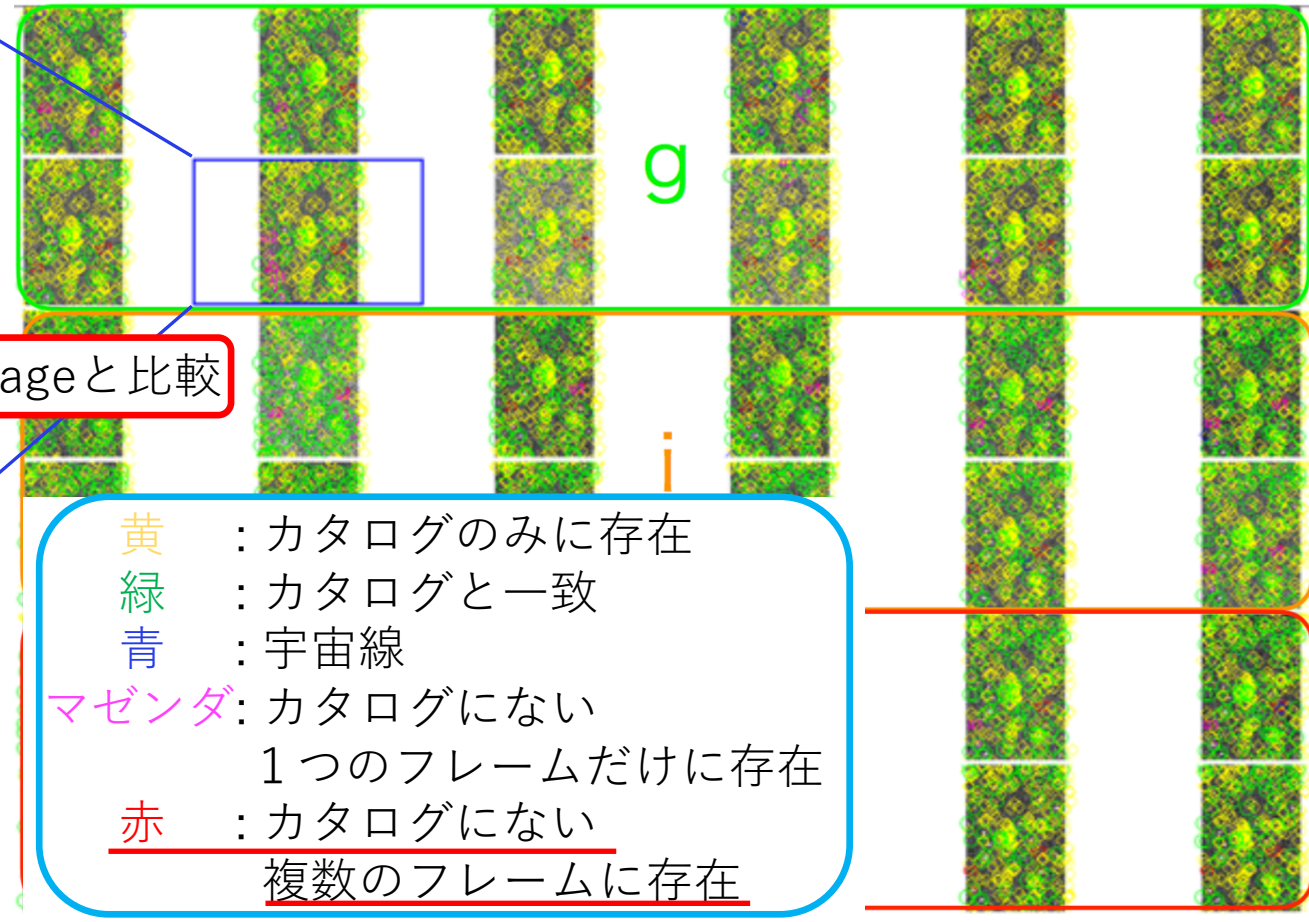
FWHMは極端に小さい

去

ixel



- 目視チェック
銀河ごとにクライテリアの結果をチェックする
クライテリアを反映した撮影イメージを
バンド別、観測時間順に表示



candidateはDSS imageと比較

- 黄 : カタログのみに存在
- 緑 : カタログと一致
- 青 : 宇宙線
- マゼンダ : カタログにない
1つのフレームだけに存在
- 赤 : カタログにない
複数のフレームに存在

重力波天体の同定

重力波天体を探すパイプラインを作成
連星合体後に電磁波を放射するので、カタログや
比較し、突発天体を探す

- 目視チェック
銀河ごとにクライテリアの結果をチェックする
カタログと一致した天体の撮影イメージを
表示

目視チェックの結果、重力波天体は見つからず
限界等級(5σ)

g: 18.9

r: 18.7

i: 18.3

緑 : カタログと一致

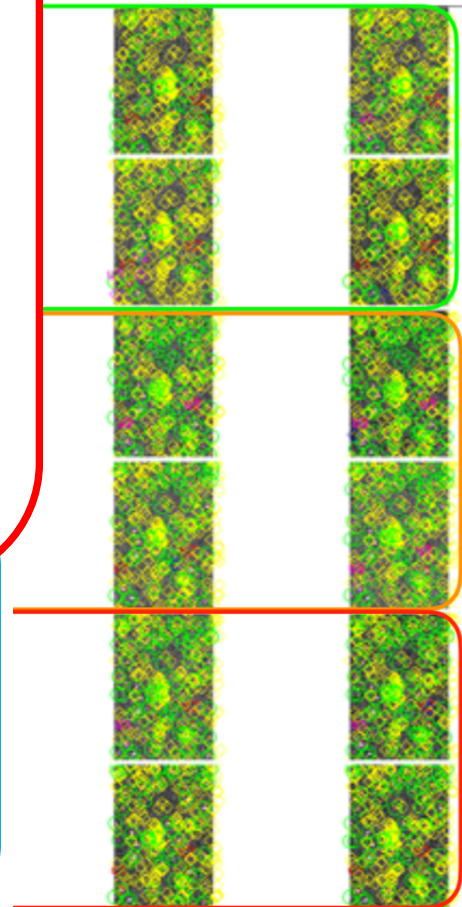
青 : 宇宙線

マゼンダ : カタログにない

1つのフレームだけに存在

赤 : カタログにない

複数のフレームに存在



重力波天体の同定(銀河サーベイ)

MOA-IIの広視野に対応出来る解析パイプラインを作成

GLADE: Galaxy List for Advanced Detector era
次世代の重力波検出器を想定した銀河カタログ
2百万の銀河を距離などの情報を含めて収録

1. 撮影データに写っている星を検出
skyより 5σ 明るいもの

2,361,160 objects

2. 可視光天体カタログUSNO-B1.0と比較
5秒角以内にあるか

516,757 objects

3. 星ではないものを除外(明るい星周りのspike, 宇宙線)
各フレームの星のPSFモデルでfitできないものを除外

34,468 objects

4. DSSのデータに写っているかチェック
DSSのデータで星を検出。5秒角以内にあるか

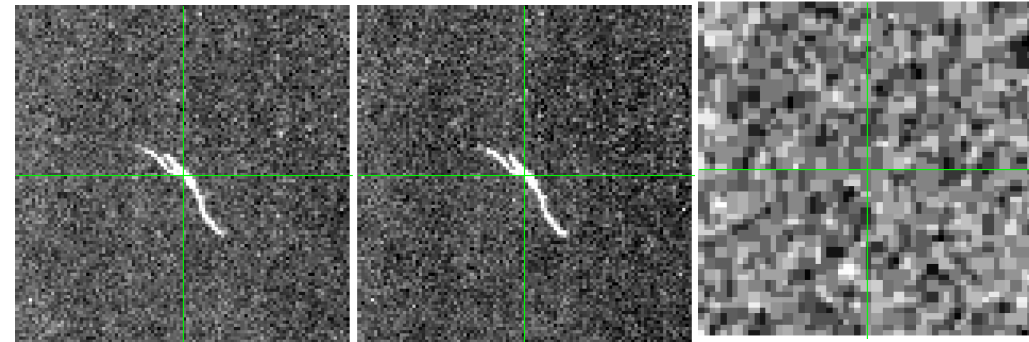
2,343 objects

5. 銀河(250~620Mpc)周辺のobjectは目視チェックへ
上記のクライテリアでは銀河周辺の天体は除外されるため、
銀河カタログGLADEと比較し、5秒以内にあるobjectを
無条件で目視チェックする

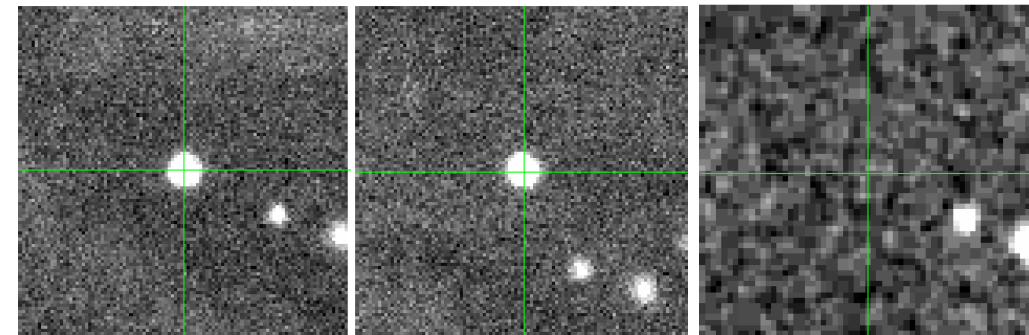
4,773 object(4.の天体と別に)

目視チェック

- クライテリアの結果を確認
- 候補天体とその周辺30秒角にある候補天体を観測時間順に並べ、DSSの画像も表示
- point like? 既存の天体? 移動天体?
- 銀河の周辺の新天体の存在を確認
ゴミの例



移動天体の例



観測データ

DSS

重力波天体の同定(銀河サーベイ)

MOA-IIの広視野に対応出来る解析パイプラインを作成

GLADE: Galaxy List for Advanced Detector era
次世代の重力波検出器を想定した銀河カタログ
2百万の銀河を距離などの情報を含めて収録

1. 撮影データに写っている星を検出
skyより5 σ 明るいもの

2. 可視光天体カタログ
5秒角以内にある

3. 星ではないもの
各フレームの星の

4. DSSのデータに
DSSのデータで星

5. 銀河(250~620Mpc)周辺のobjectは目視チェックへ
上記のクライテリアでは銀河周辺の天体は除外されるため、
銀河カタログGLADEと比較し、5秒以内にあるobjectを
無条件で目視チェックする

目視チェック

- クライテリアの結果を確認

目視チェックの結果

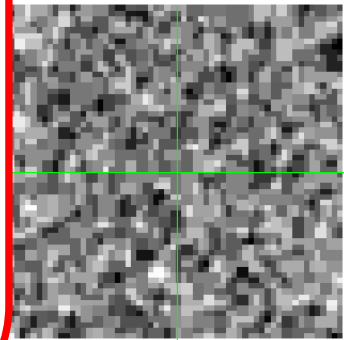
- 星であるか(point like?) 817/2,343 objectが星でない
- DSSに存在するか 1,204/2,343 objectがDSSに存在
- 移動天体であるか 322/2,343 objectが移動天体
- 銀河の周辺の新天体 4,773 object の中に新天体はない

目視チェックを通る天体はなかった。

限界等級(5 σ) 18.0

4,773 object(4.の天体と別に)

にある候補天体
の画像も表示
動天体?
確認



観測データ

DSS

重力波天体の同定(LMC)

連星合体後に電磁波を放射するので、
カタログや既存のサーベイイメージと比較し、
突発天体を探す

自動解析

1. 撮影データに写っている星を検出
skyより 5σ 明るいもの

2,529,726 objects

1. 可視光天体カタログUSNO-B1.0と比較
5秒角以内にあるか

1,356,839 objects

2. 星ではないものを除外
各フレームの星のpsfモデルでfitできないものを除外

19,083 objects

3. DSSのデータに写っているかチェック
DSSのデータで星を検出。5秒角以内にあるか

350 objects

4. 銀河は無条件で目視チェックへ
銀河カタログGLADEと比較し、5秒以内にある天体を
銀河として目視チェックをする

970 objects

5. 目視で確認

目視チェック

自動解析が正しいかチェックする

- 複数の画像に存在するか
205 objectが1つの画像のみに存在
- 星であるか(point likeか)
86 objectsが星ではない
- DSSにあるか
58 objectsがDSSに存在
- 銀河周りに新天体はなし

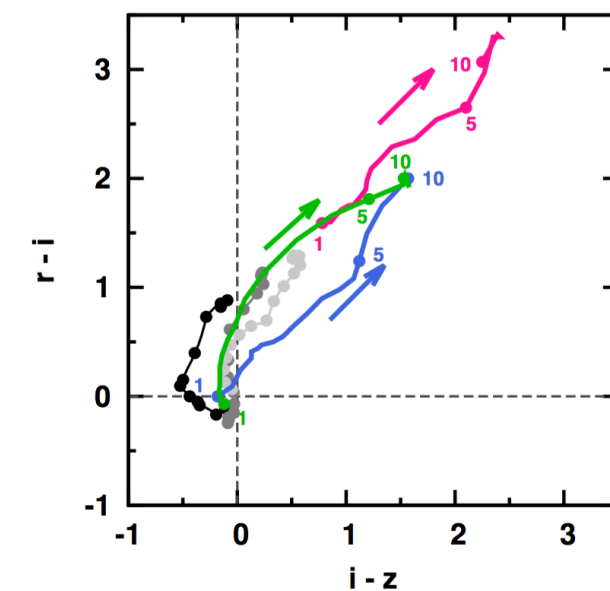
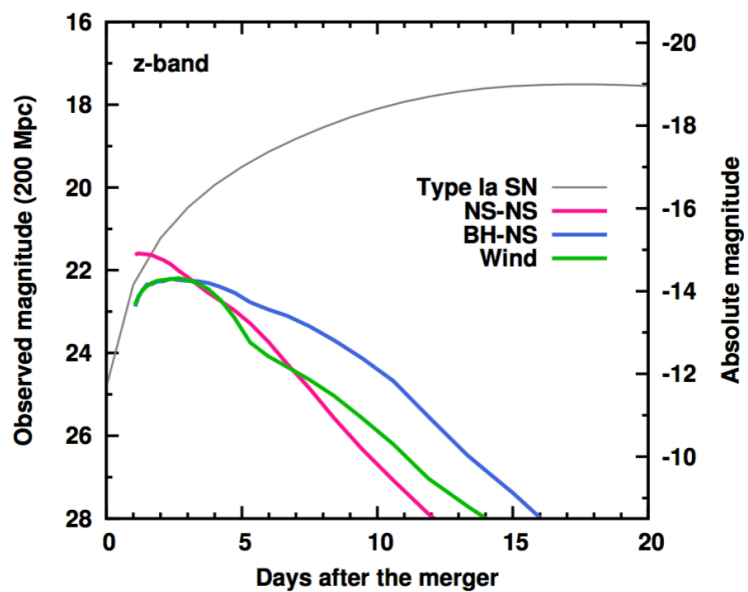
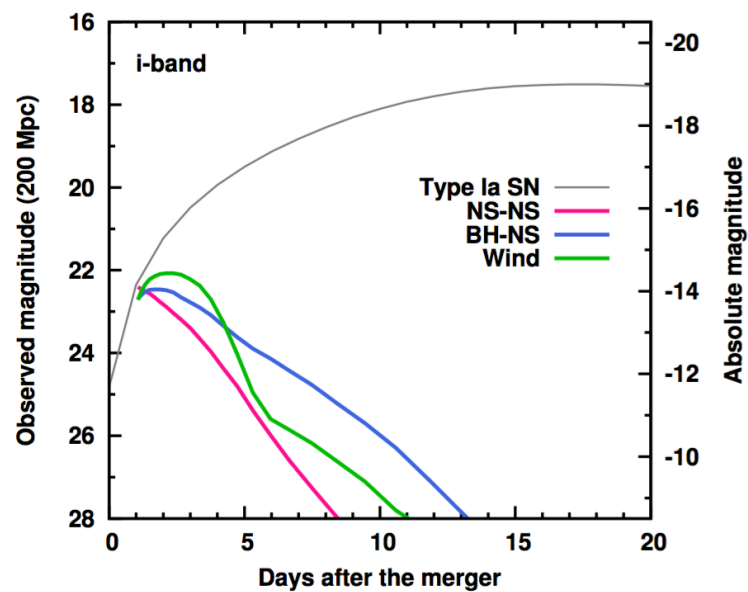
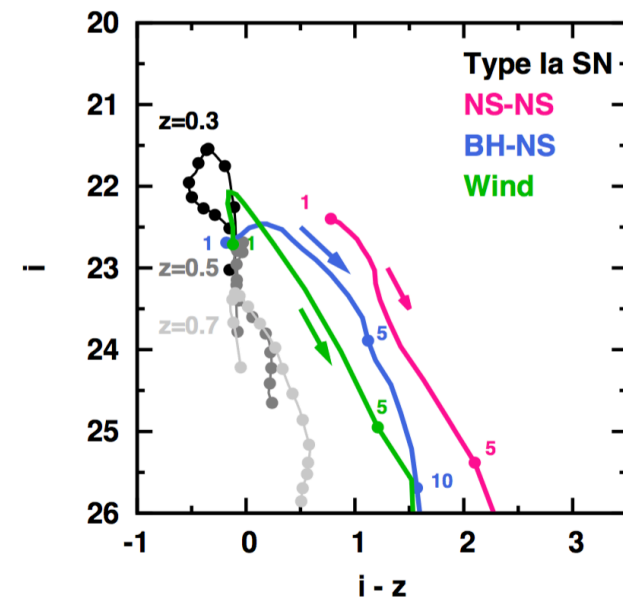
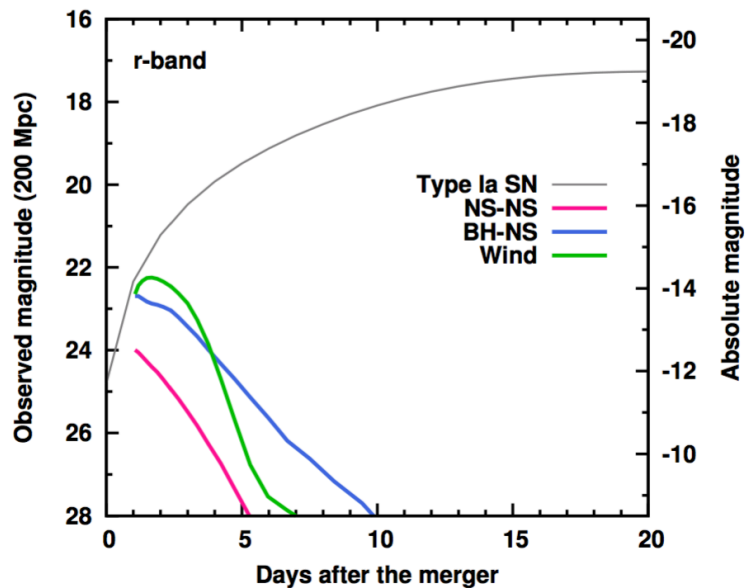
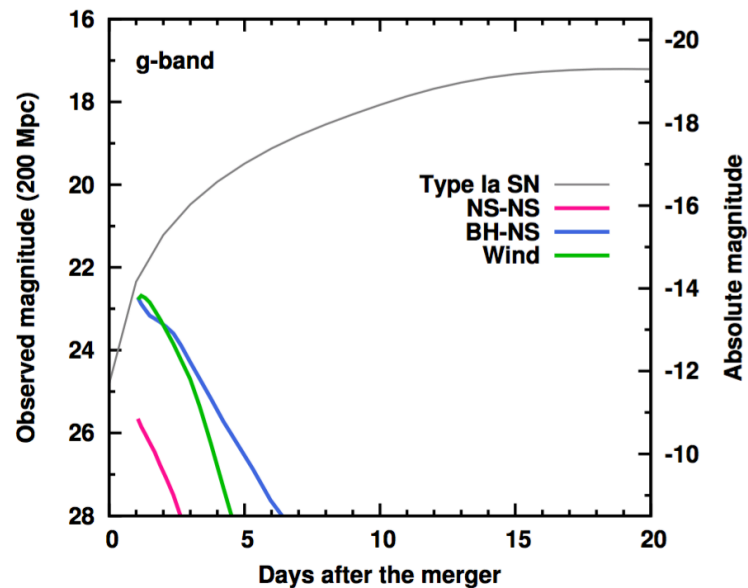


1 objectsが残った

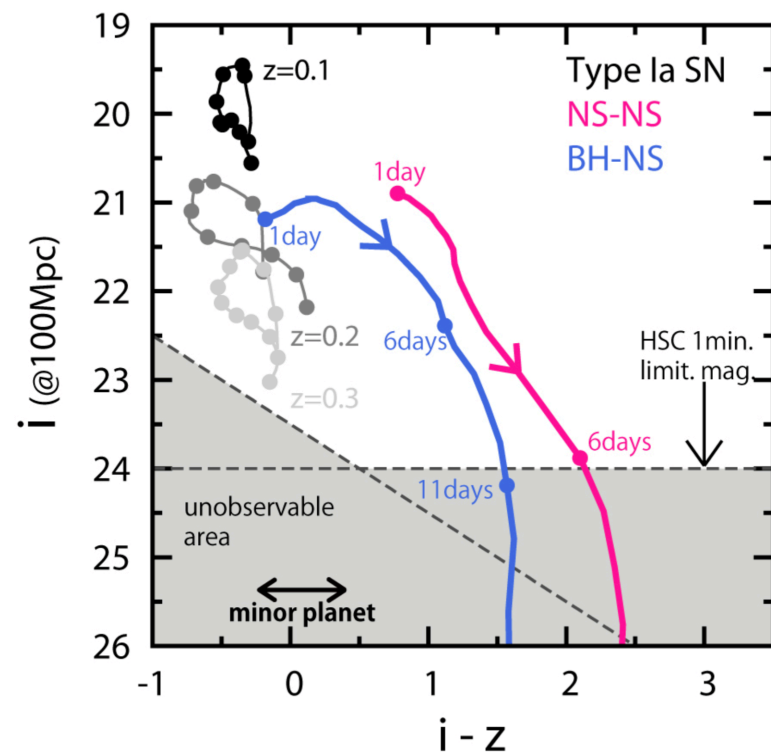
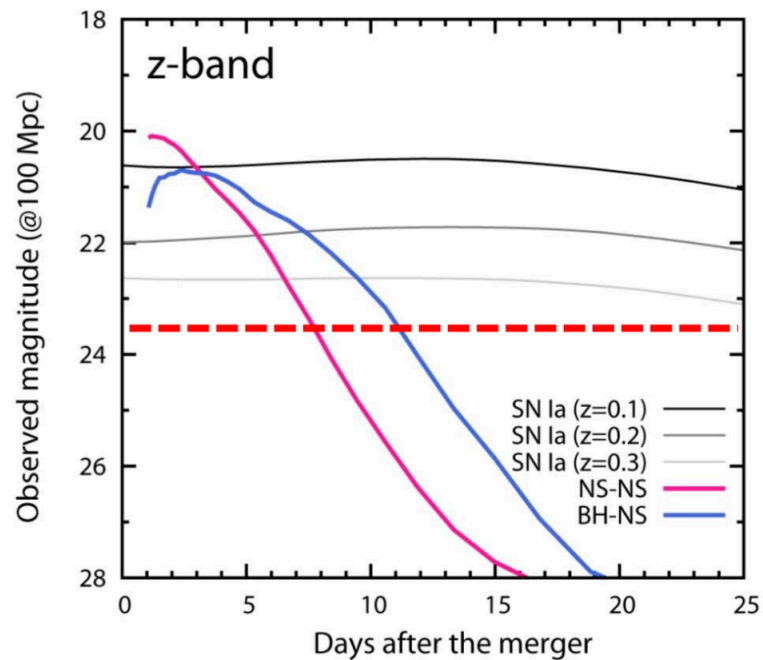
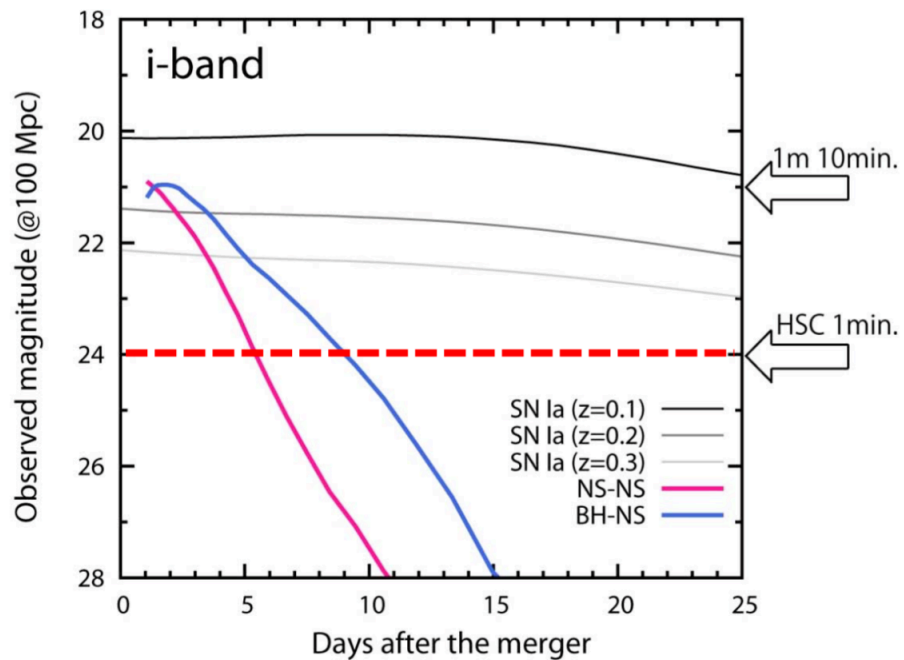
しかし、重力波検出前の画像にも写っていた。

中性子連星の光度曲線及び色の変化(200Mpc)

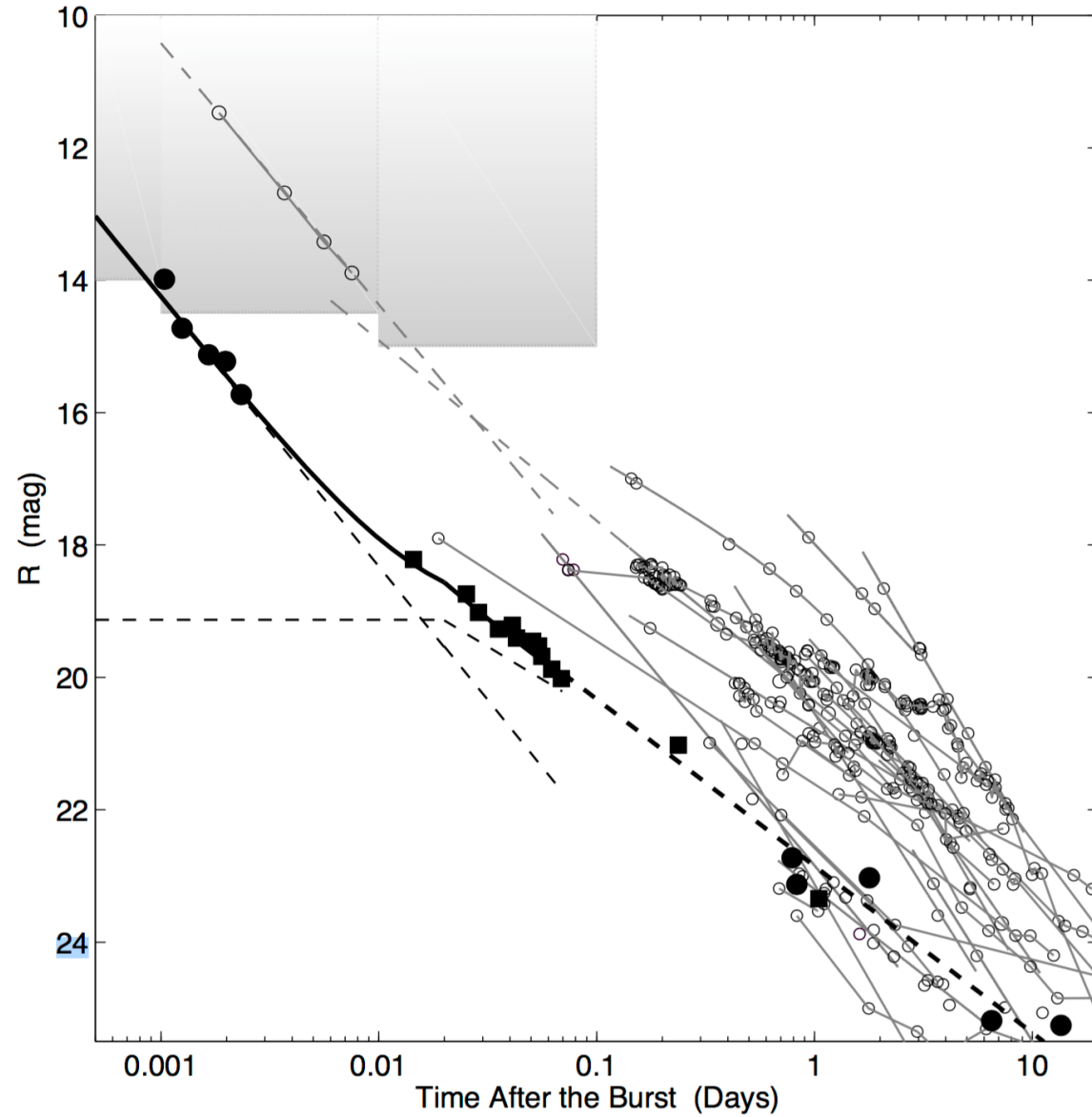
from M. Tanaka 2016



中性子連星の光度曲線(100Mpc)

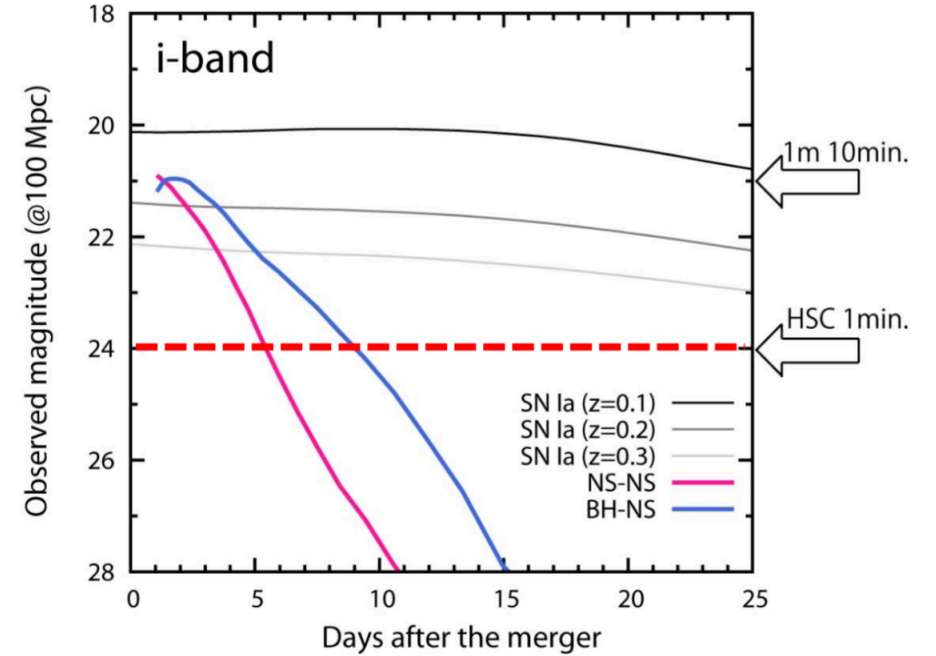


GRB 光度曲線



問題点

- O2では深い観測を行う(20等級以上)
- カタログとの比較には限界がある
USNO-B1.0 V:21等
DSS R:20~22等
- 銀河は点源として映るため遠い銀河にある重力波天体は見つけることができない



改善案

- 数日後reference image を撮影し、差し引きを行い新天体を見つける
- リアルタイムではカタログとの比較で解析を行う

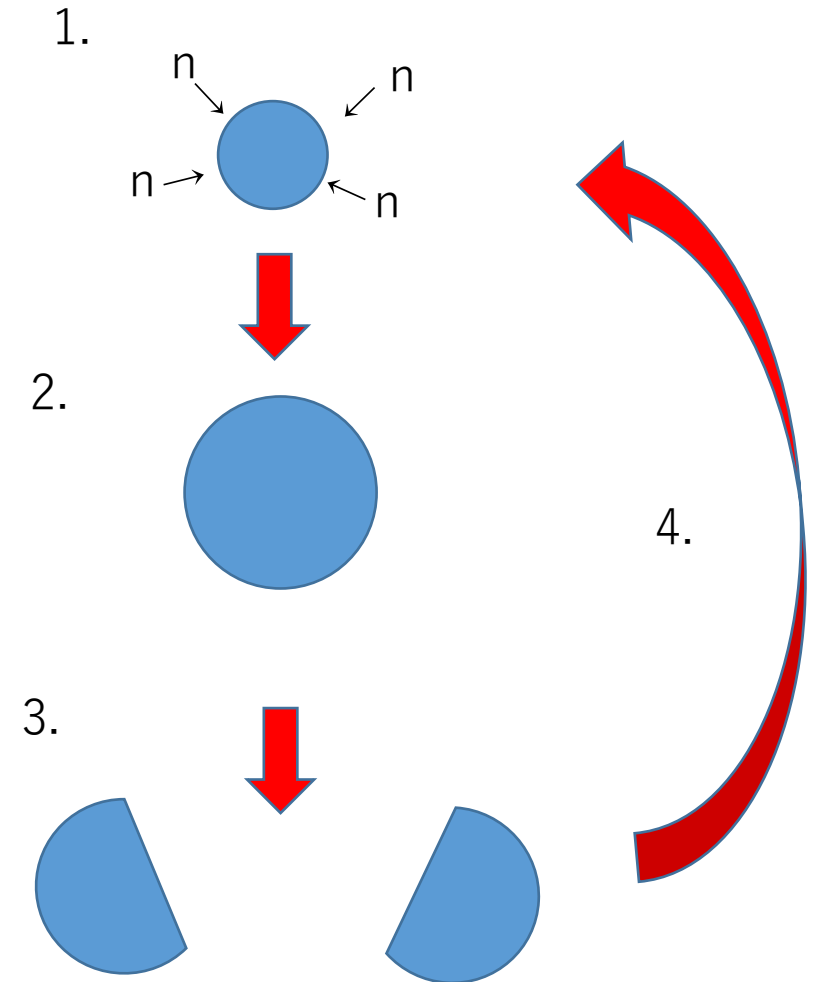
r-process

- nucleosynthesis of heavy element
- Eejcta or NS merger is neutron rich environment
- Here, neutron capture proceed faster late than β -decay.

1. neutron capture by seed element
2. seed become heavier ($A \sim 280$)
3. fission
4. repeat until deplete neutron
5. Unstable radioactive elements thermally emit EM wave by β -decay or nuclear fission.



kilonova

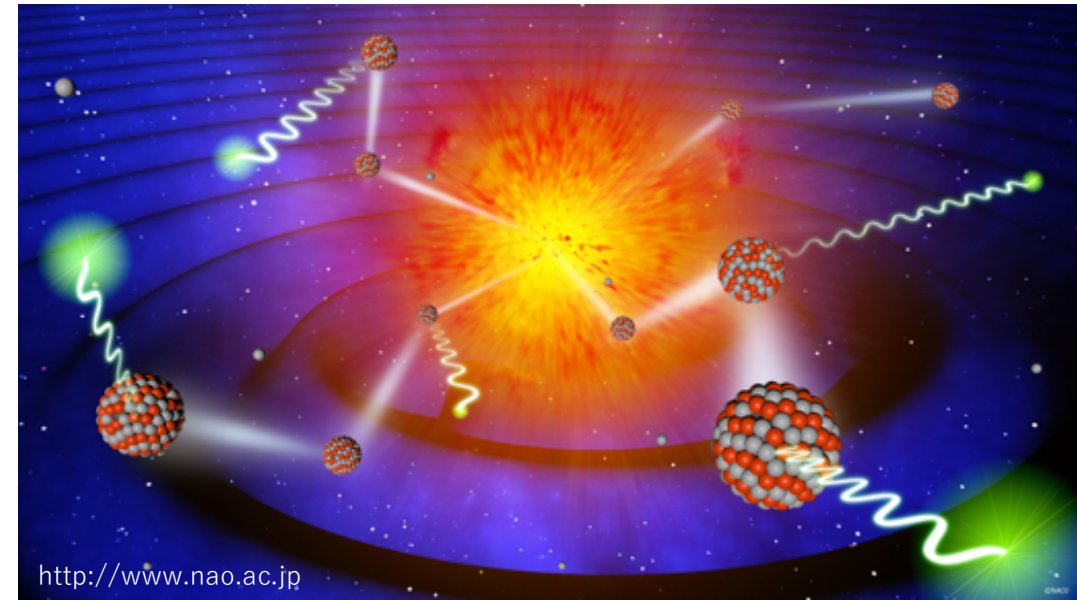


kilonova

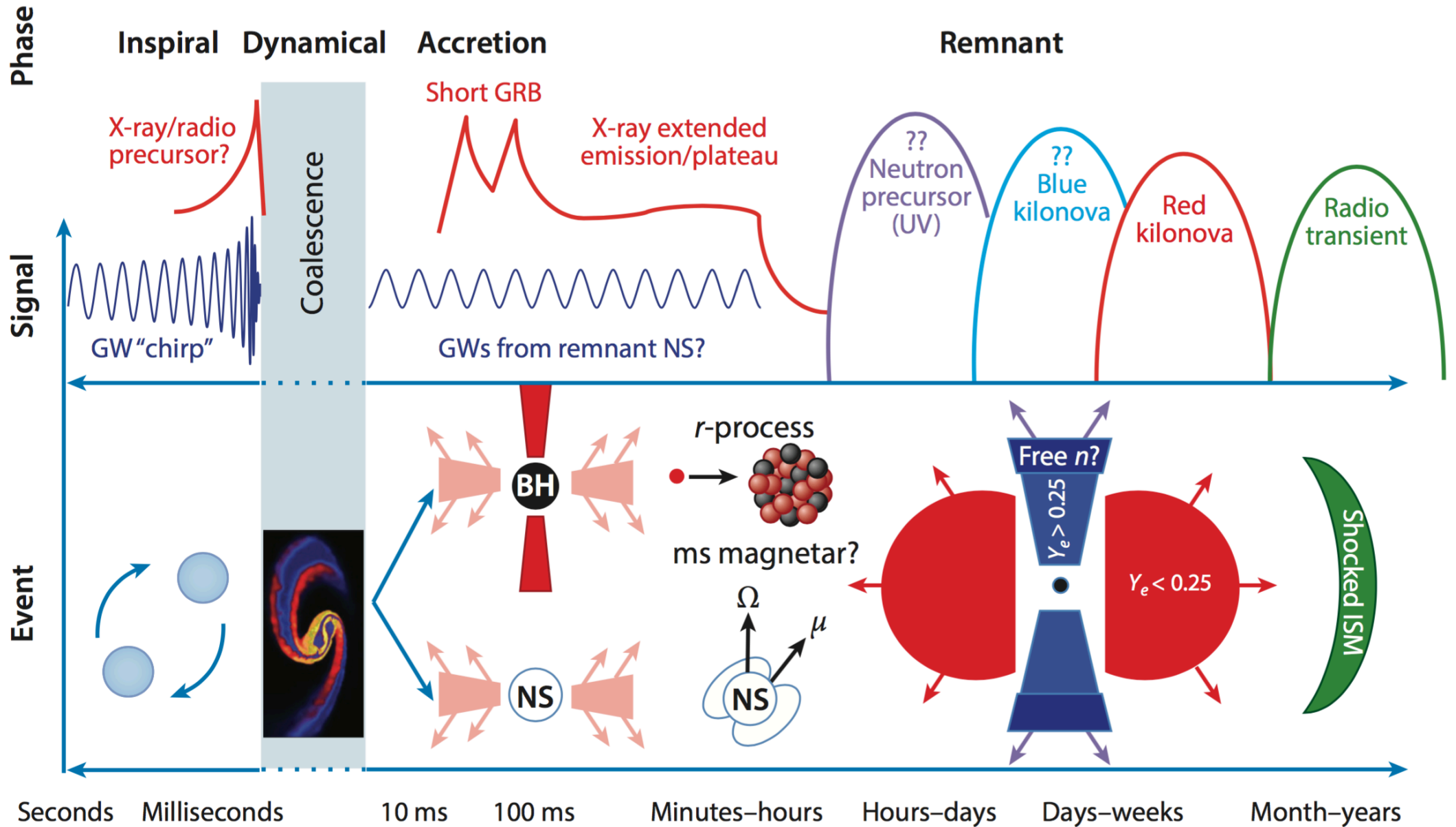
- radioactive nuclei release energy via β -decay and fission
- wavelength: radio \sim optical (peak is IR)
- duration: day \sim week
- isotropic emission

color

- Y_e affect mass number (A)
- High mass elements have complex structure of valence in outmost shell and opacity is high.
- This lead high temperature and bluer color
- Ejecta of HMNS have high Y_e due to neutrino wind.
- blue color
- peak is is one day after merger
- color depends on observing direction



中性子連星合体とEM emission



DSS (Digitized Sky Survey)

Survey	Code	Colour	Epoch	Emulsion and filter	Band	Limiting magnitude	Declination range	Number of plates	pixels	GSC (1 or 2)	DSS (1 or 2)	Copyright
POSS-I E	XE	Red	1950-58	103aE	Epg	20.0	+90:-30	936	1.0/1.7"	2	1	STScI
POSS-I O	XO	Blue	1950-58	103aO	Qpg	21.0	+90:-30	936	1.0"	2	2	STScI
Pal-QV	N	Blue	1983-85	IIaD +W12	Vpg (POSSII)	19.5	+90:+06	611	1.7"	1+2	2	STScI
POSS-II J	XJ	Blue	1987-98	IIIaJ +GG395 (POSSII)	Jpg (POSSII)	22.5	+90:+00	897	1.0"	2	2	Caltech
POSS-II F	XP	Red	1987-98	IIIaF +RG610	Fpg (POSSII)	20.8	+90:+00	897	1.0"	2	2	Caltech
POSS-II N	XI	Near-IR	1987-02	IV-N +RG9	Ipg (POSSII)	19.5	+90:+00	890	1.0"	2	2	Caltech
SERC-J*	S	Blue	1975-87	IIIaJ +GG395	Jpg	23.0	-20:-90	606	1.7"	1+2	1	ROE
SERC-EJ	S	Blue	1979-88	IIIaJ +GG395	Jpg	23.0	-00:-15	288	1.7"	1+2	1	ROE
AAO-SES	XS	Red	1990-98	IIIaF +OG590	Fpg	22.0	-20:-90	606	1.0"	2	2	AAO
SERC-ER	ER	Red	1984-98	IIIaF +OG590	Fpg	22.0	-00:-15	288	1.0"	2	2	AAO/ROE
AAO-SR	GR	Red	1996-99	IIIaF +OG590	Fpg	22.0	S.Gal.plane	116	1.0"	2	2	AAO
SERC-I	IS	Near-IR	1990-02	IV-N +RG715	Ipg	19.5	-00:-90	894	1.0"	2	2	AAO
SERC-QV	XV	Blue	1986-88	IIaD +GG495	Vpg	14.0	S.Gal.plane	94	1.0/1.7"	1+2	1	ROE
SERC-V and PAL-V	XX	Blue	1979-85	IIIaJ +GG495	Vpg	var.	M31, LMC,SMC	4	1.7"	1+2	1	STScI/ROE

G184098の観測

望遠鏡:B&C 露光時間:120秒 バンド:i,r,g

以下に銀河及びその日付(UTC)、隣に枚数を書く

ESO034-012	ESO060-010	ESO089-015	ESO126-024	NGC2187A
2015-09-21 2	2015-09-21 2	2015-09-21 2	2015-09-20 2	2015-09-20 2
2015-09-24 4	2015-09-24 4	2015-09-24 4	2015-09-21 2	2015-09-21 2
2015-09-26 4	2015-09-26 4	2015-09-26 4	2015-09-24 4	2015-09-24 4
ESO058-014	ESO060-011	ESO089-016	2015-09-26 4	2015-09-26 4
2015-09-21 2	2015-09-20 2	2015-09-20 2	NGC2150	NGC2442
2015-09-24 4	2015-09-21 2	2015-09-21 2	2015-09-20 3	2015-09-21 3
2015-09-26 4	2015-09-24 4	2015-09-24 4	2015-09-21 2	2015-09-24 4
ESO058-023	2015-09-26 4	2015-09-26 4	2015-09-24 4	2015-09-26 4
2015-09-21 2	ESO060-018	ESO090-011	2015-09-26 4	NGC2466
2015-09-24 4	2015-09-21 2	2015-09-20 2	NGC2187	2015-09-20 2
2015-09-26 4	2015-09-24 4	2015-09-21 2	2015-09-20 4	2015-09-21 2
ESO059-023	2015-09-26 4	2015-09-24 4	2015-09-21 2	2015-09-24 4
2015-09-21 2	ESO089-009	2015-09-26 4	2015-09-24 4	2015-09-26 4
2015-09-24 4	2015-09-20 4	ESO126-023	2015-09-26 4	
2015-09-26 4	2015-09-21 2	2015-09-21 2		
	2015-09-24 6	2015-09-24 4		
	2015-09-26 4	2015-09-26 4		

限界等級の見積もり

USNO-B1.0を使い等級のキャリブレーションを行う
skyのばらつきから限界等級を求める

1. データ内の天体を測光

2. 等級の変換(B&C telescope)

B&Cのfilter -> g, i, r (SDSS系)

USNO-B1.0 filter -> B, R, I (Johnson系)

USNO-B1.0の等級をSDSS系に変換

$$\begin{aligned}
 g' &= V + 0.56(B - V) - 0.12, & r' - i' &= 0.98(R_c - I_c) - 0.23 & (R_c - I_c < +1.15) \\
 & & & = 1.40(R_c - I_c) - 0.72 & (R_c - I_c \geq +1.15), \\
 r' &= V - 0.49(B - V) + 0.11, & r' - z' &= 1.59(R_c - I_c) - 0.40 & (R_c - I_c < +1.65) \\
 & & & = 2.64(R_c - I_c) - 2.16 & (R_c - I_c \geq +1.65), \\
 u' - g' &= 1.38(U - B) + 1.14, \\
 g' - r' &= 1.05(B - V) - 0.23,
 \end{aligned}$$

M. Fukugita et al. より

3. 等級のキャリブレーション

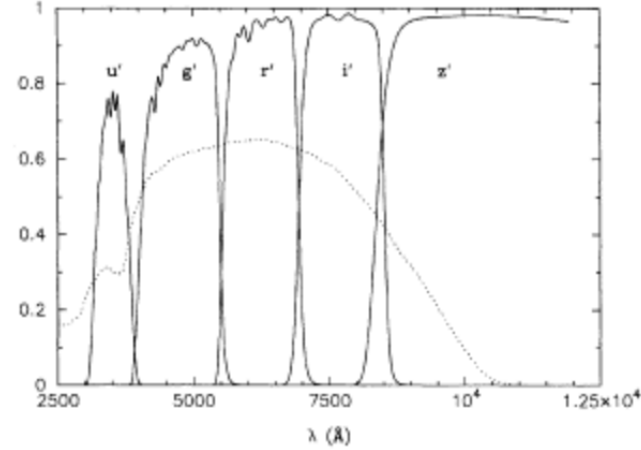
測光したMOA等級とUSNO-B1.0等級を直線でfit

4. 限界等級(5σ)の見積もり

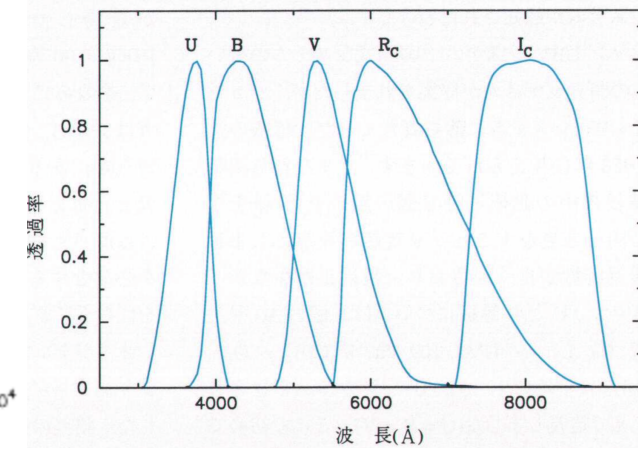
測光の際に得られるskyの標準偏差(σ)を用いる

$$M_{\text{limit}} = -2.5 \log_{10} 5 \sigma$$

この M_{limit} を3.の直線でUSNO-B1.0等級に変換



SDSS系フィルター



Johnson系フィルター

BCT66276-ES0034-012-iw.fit: $y=x+-1.208$

