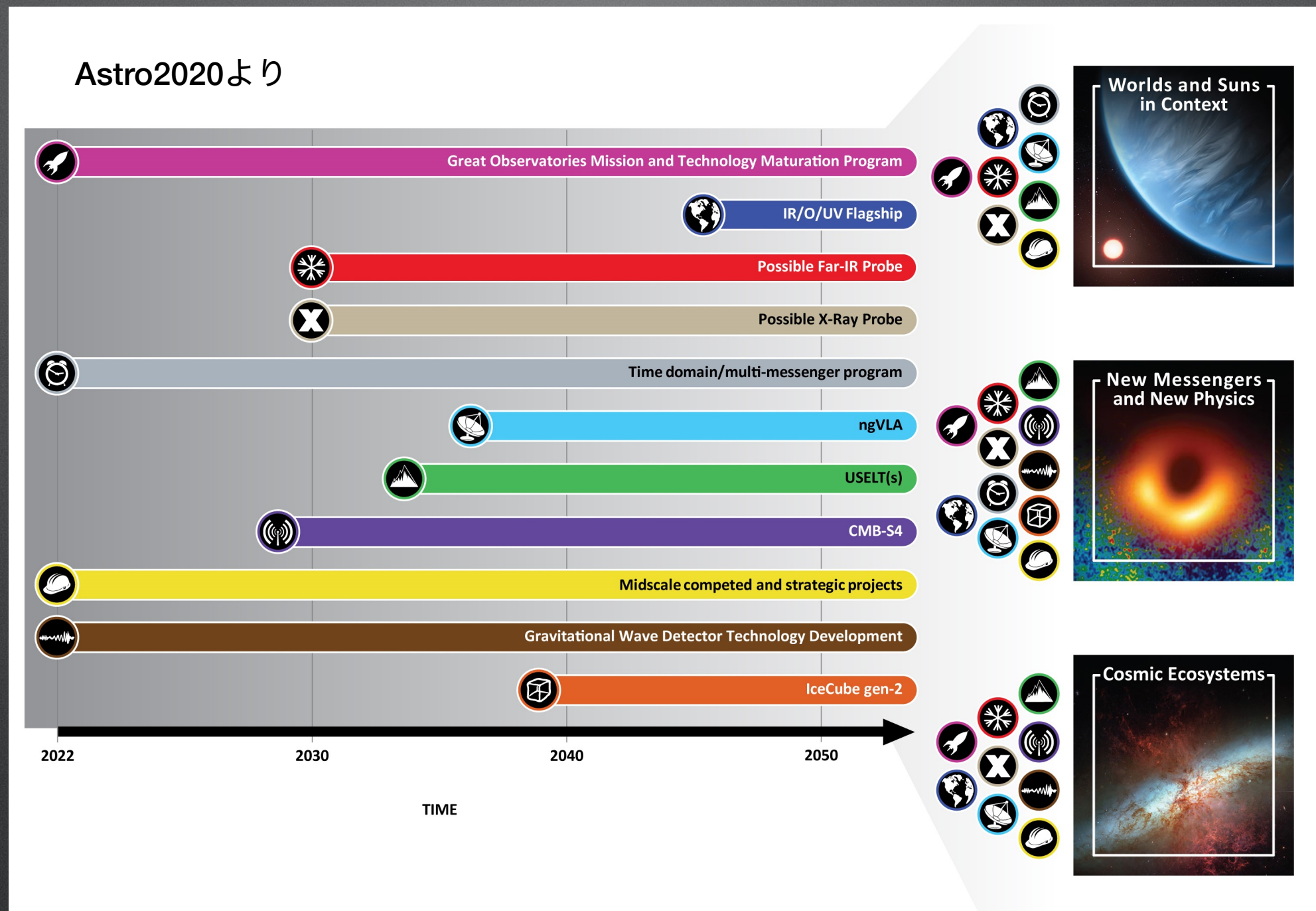


コンパクト天体

—*Time-domain & Multi-messenger*—

仏坂健太 (東京大学)

Astro 2020 - コンパクト天体 -



Astro2020で採択されているサイエンスプログラムのうち、コンパクト天体関係は2020年代にオペレーションがある2030年代にかけて継続的に観測主体で進展する。

コンパクト天体：2030年代サイエンスゴール

宇宙の物質の運命：星の進化と終焉の統一

超新星・GRBと恒星進化の統一、元素の起源、
ブラックホールの統計(1万個の世界)

極限物理の実験場：一般相対論・標準モデルを超えたい

Hulse -Taylor, 重力波, Sgr A*に続く更なる検証,
最高E宇宙線・ニュートリノ

新種の自然現象の探究

クエーサー, パルサー, GRB, X線連星, 1987Aニュートリノバースト
潮汐破壊, FRB, BBH, キロノバなど10年スケールで増えてきた

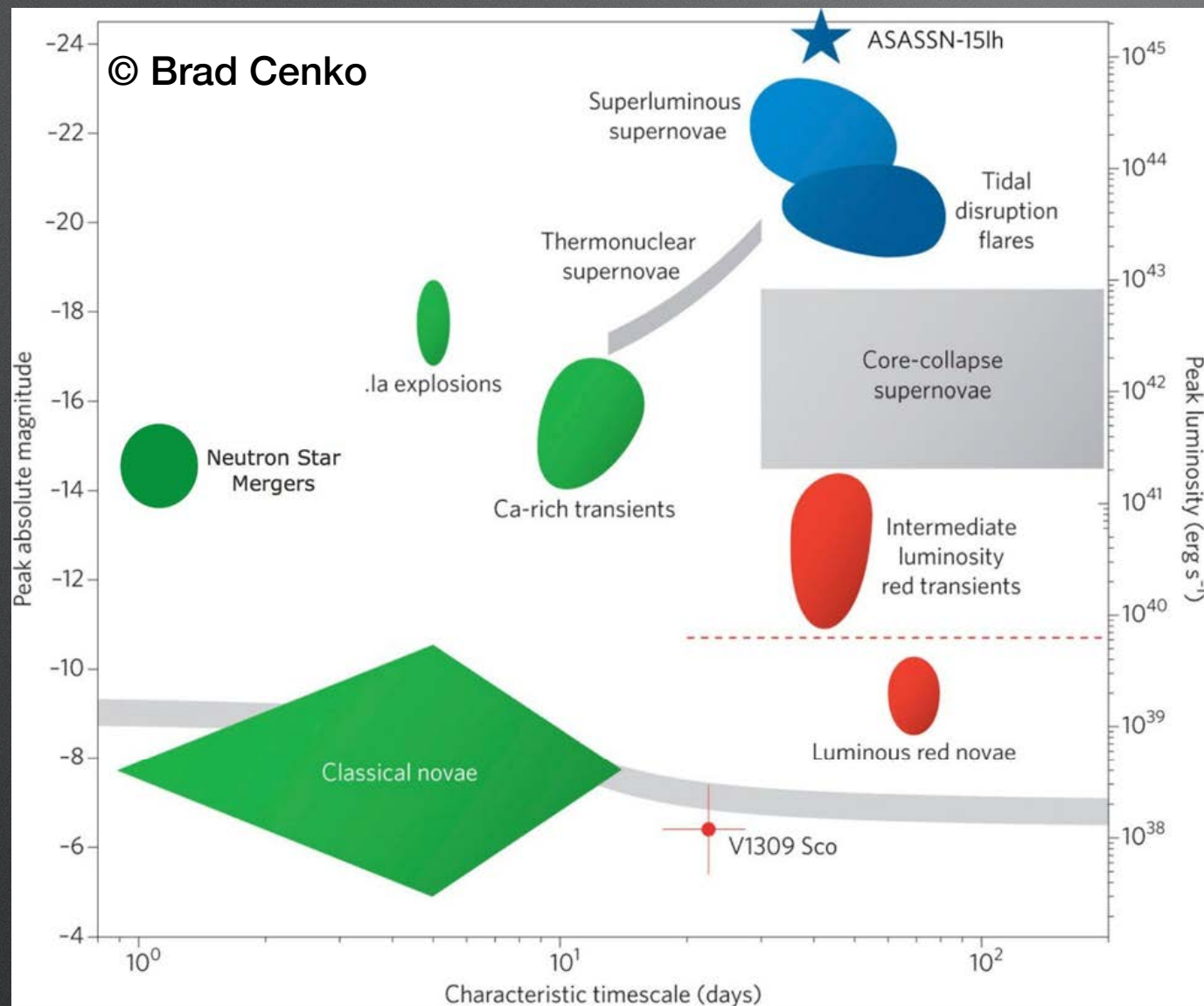
2020-30年代の3つの軸

1. *Time-domain*: 突発天体から新たな天体の同定し、新しいサイエンスを展開する。多波長が極めて重要。
2. *Multi-Messenger Time-domain*: 重力波天体、ときどき電磁波対応天体が見つかる。30年代後半にはニュートリノ天体も出てくる。
3. *Survey & Characterization*: 天文サーベイデータからコンパクト天体を発見し、質量などを詳細に決定する。（系外惑星の方法と類似）

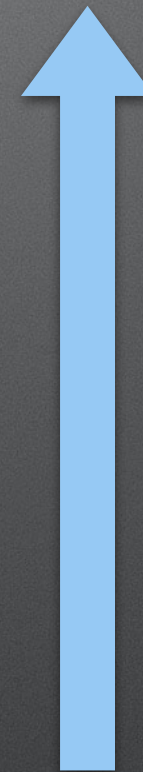
2020-30年代の3つの軸

1. *Time-domain*: 突発天体から新たな天体の同定し、新しいサイエンスを展開する。多波長が極めて重要。
2. *Multi-Messenger Time-domain*: 重力波天体、ときどき電磁波対応天体が見つかる。30年代後半にはニュートリノ天体も出てくる。
3. *Survey & Characterization*: 天文サーベイデータからコンパクト天体を発見し、質量などを詳細に決定する。（系外惑星の方法と類似）

Time-domain (光赤外)



明



暗

- 多様な可視光突発天体が明らかになりつつある。(PTF, Pans, ASAS-SN $\rightarrow$ ZTF)

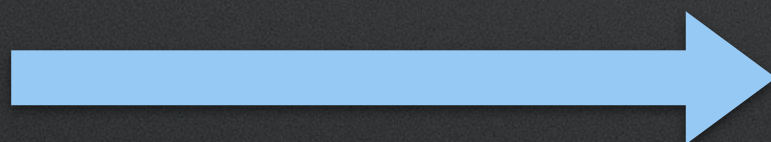
- これらと恒星・連星進化、宇宙の物質進化が統一されていく。
- 重力波・ニュートリノ突発天体とのシナジーが約束されている。

今後、10年

Vera Rubin や Roman、サーベイ体積が急激に増加

- 既知の種族は大量に見つかる。
- 希少なもの、暗いもので新しい種族の現象にも期待。

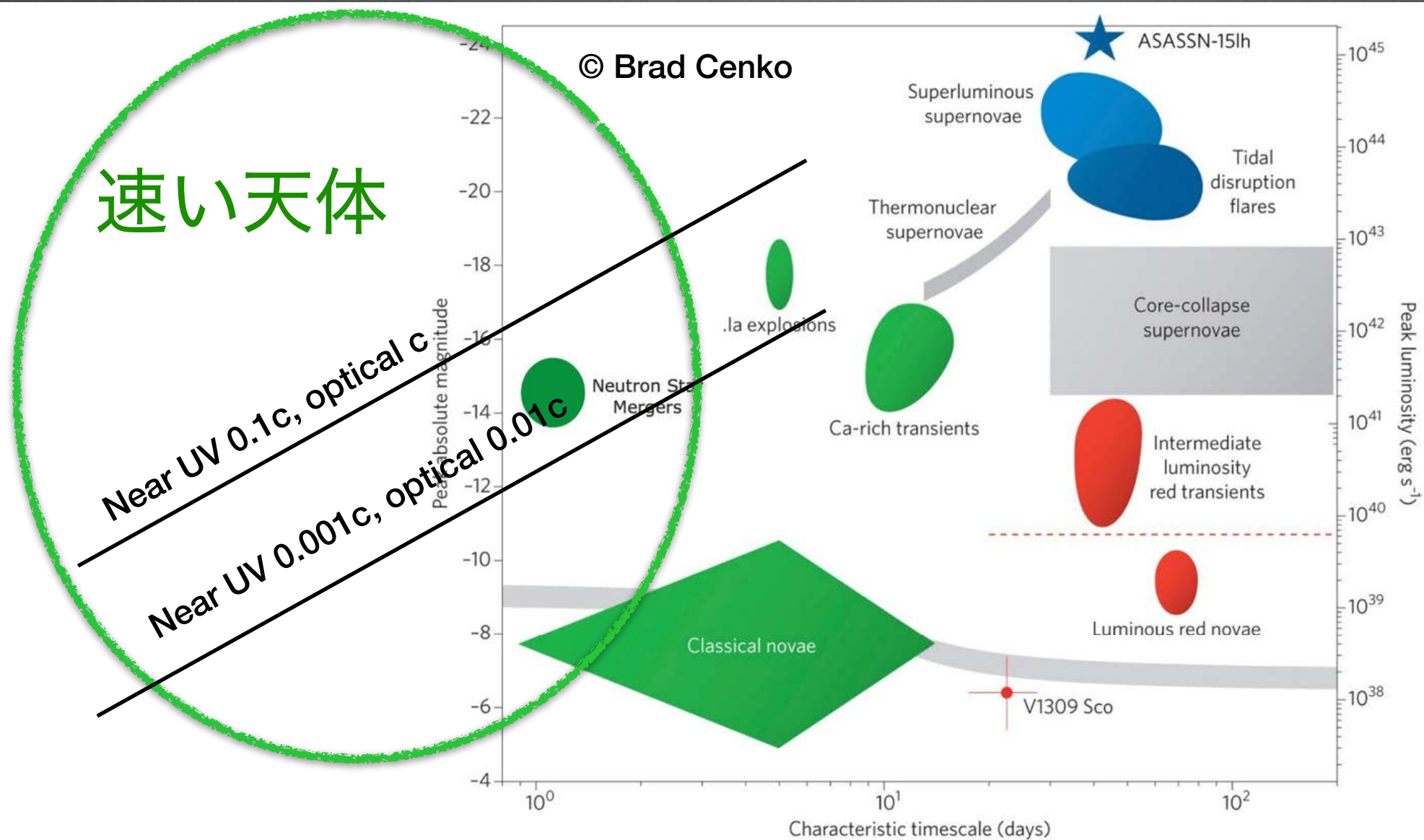
短命



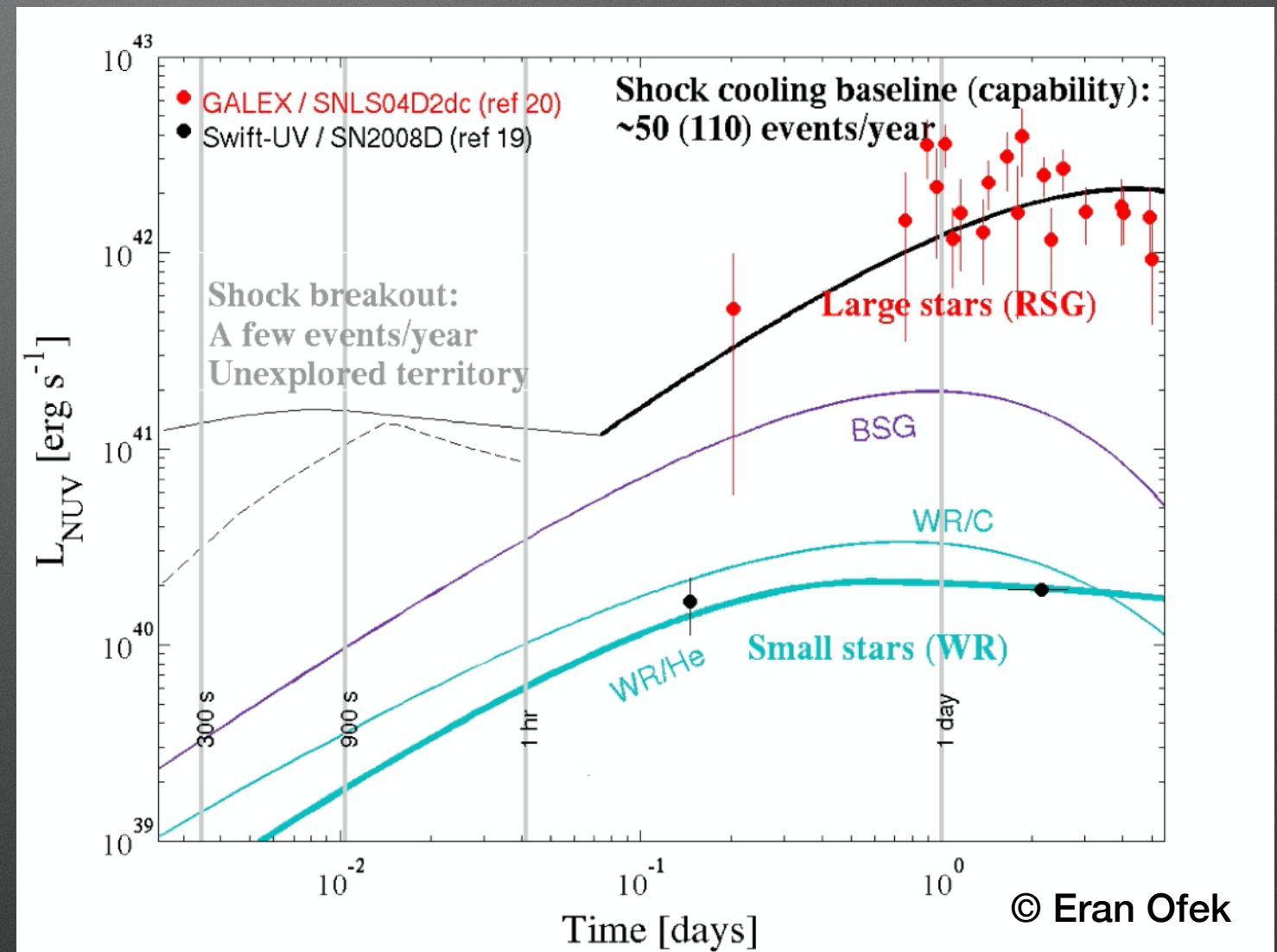
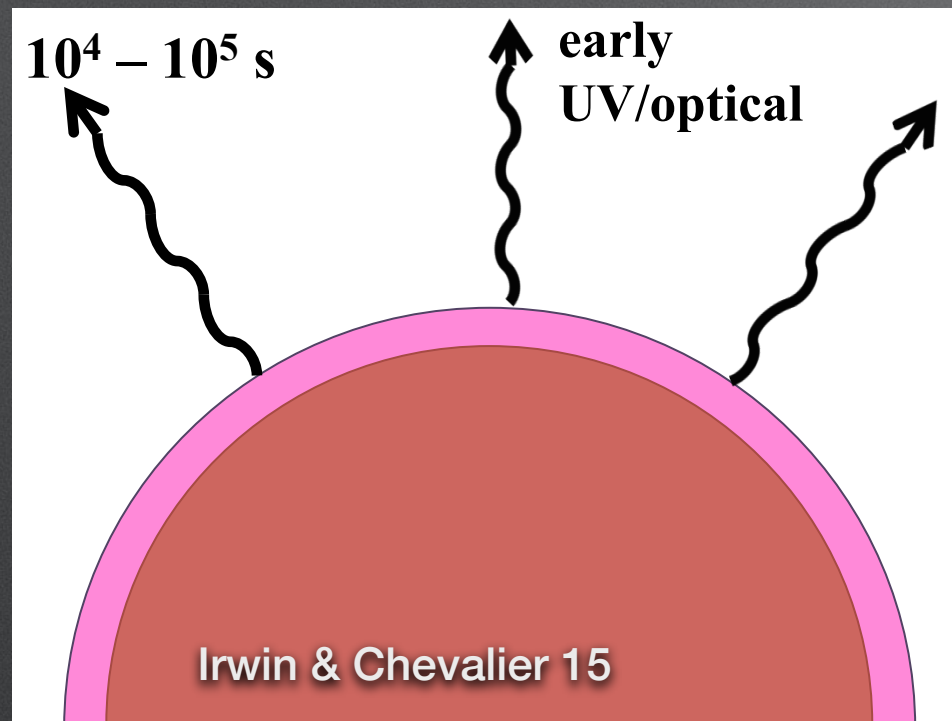
長命

Time-domain

新しい種族の突発天体を見つける：新しい領域へ(時間・波長)



Promising target: Shock Breakout



- 衝撃波が星を突き破る際の光 (典型的にはsoft X, UV)
- 爆発を引き起こした星が何者かわかる
- 突発天体のフロンティアの一つ

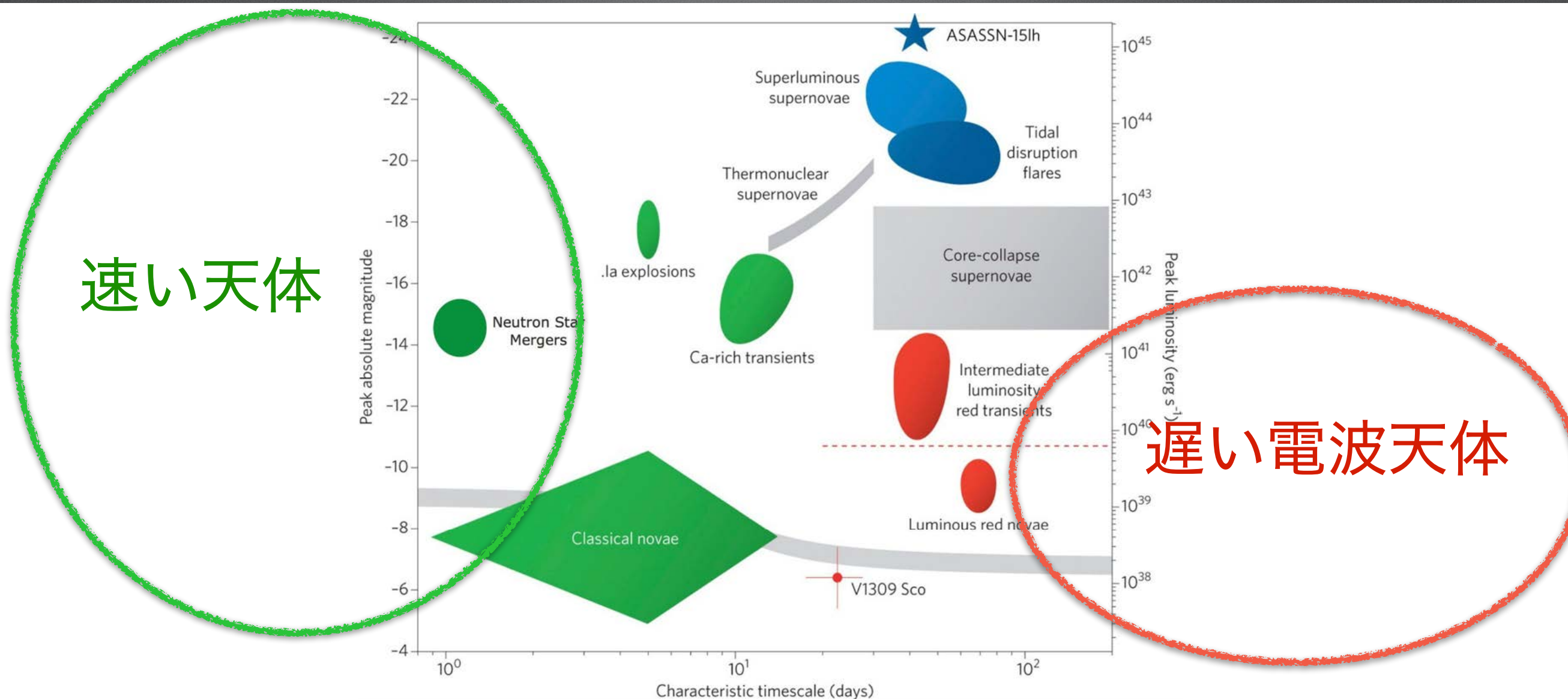
UV 突発天体

UVサーベイ：

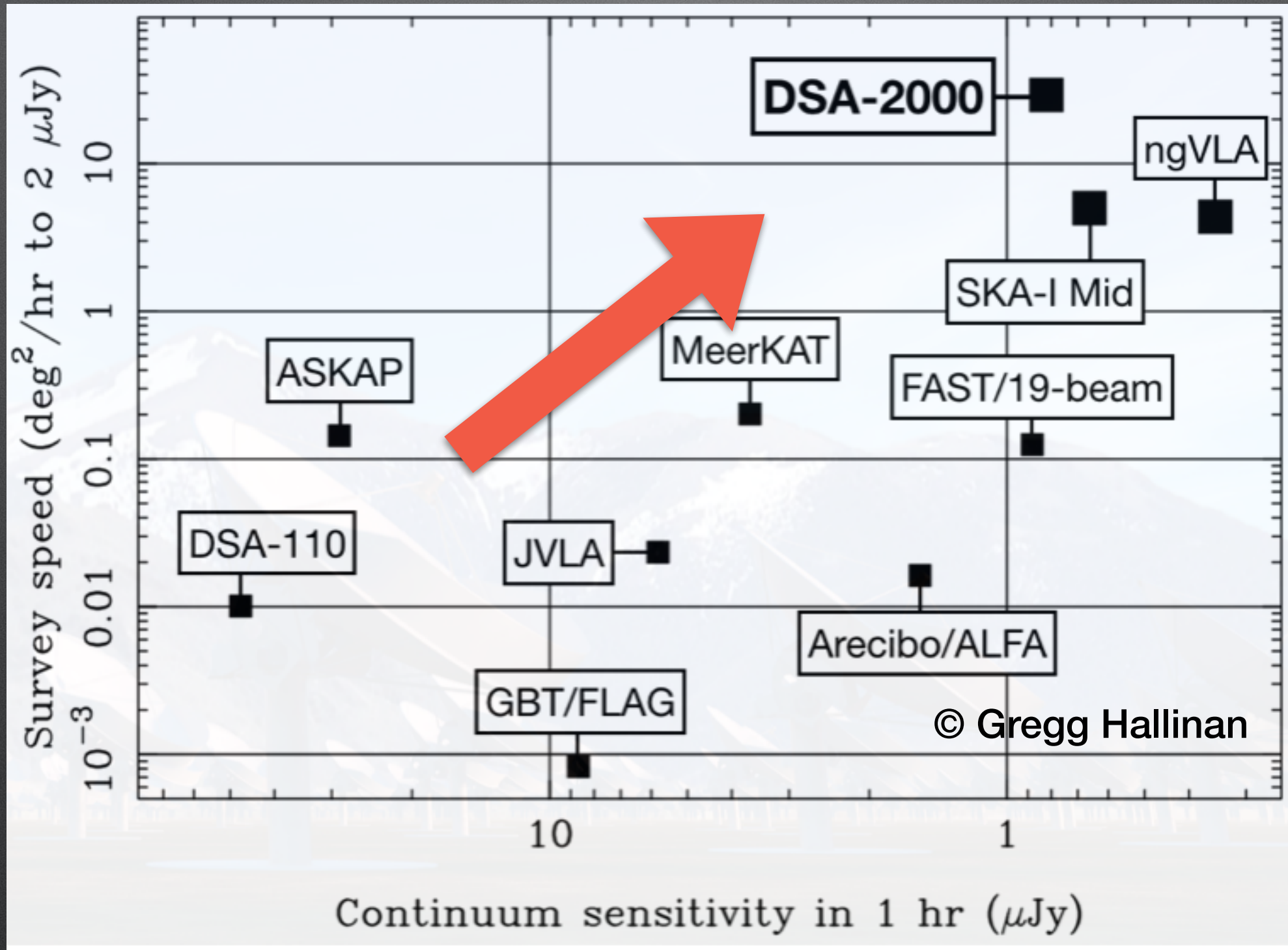
- discovery spaceが広い
- Shock breakout の観測に最適
- キロノバ の初期の信号を捉える
- 後期は可視・赤外で明るいはずで、Followup観測をやりやすい
- ULTRASAT: near UV, FoV~200 deg², ~22 mag (AB), cadence min ~ months
- Dorado: 1000 deg² every 3hr, ~20 mag (AB)
- SIBEX: Wide-field X-ray + far UV follow-up.
- LAPYUTA: 10 arcmin, 23 mag

Time-domain

新しい種族の突発天体を見つける：新しい領域へ(時間・波長)



今後 電波突発天体も出てくる



- 電波は通常、突発天体を追加観測に用いられてきた (FRBなど短いものを除く)
- しかし、2030年代には、サーベイ速度が現在の100-1000倍！！！！
- おそらく、相対論的な突発天体が一網打尽

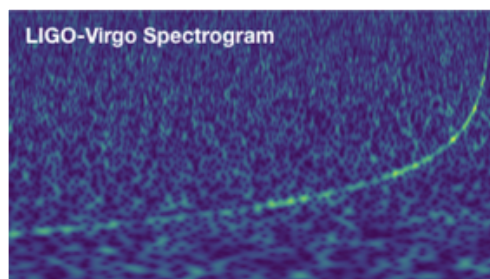
2020-30年代の3つの軸

1. *Time-domain*: 突発天体から新たな天体の同定し、新しいサイエンスを展開する。多波長が極めて重要。
2. *Multi-Messenger Time-domain*: 重力波天体、ときどき電磁波対応天体が見つかる。30年代後半にはニュートリノ天体も出てくる。
3. *Survey & Characterization*: 天文サーベイデータ（Gaia など）やコンパクト天体を発見し、質量などを詳細に決定する（系外惑星の方法と類似）。

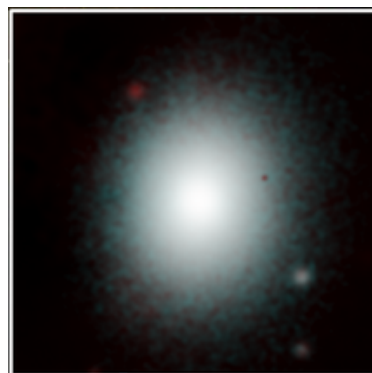
重力波の電磁波対応天体 (キロノバ)

Abbott et al. ApJ, 2017

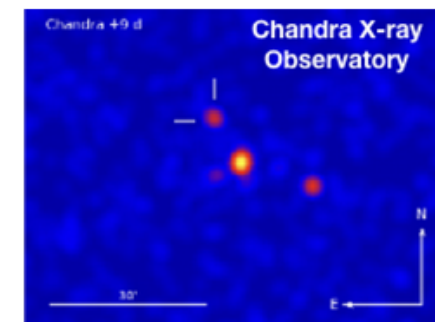
Gravitational waves
(2017 Aug 17.5)
 $T = 0$



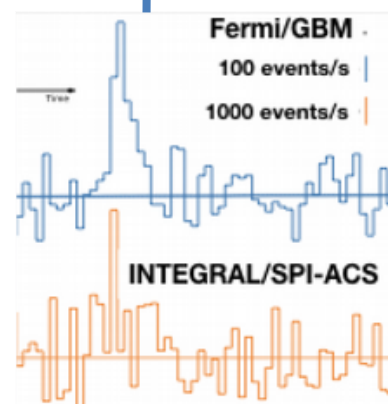
Near Infrared
 $T = 11\text{h } 36\text{m}$



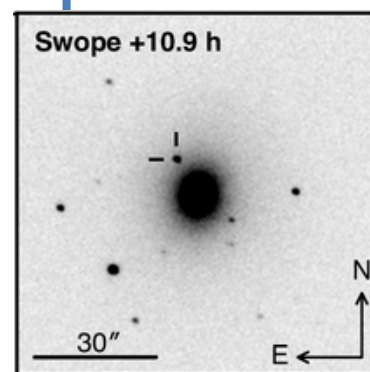
X-rays
 $T = 9\text{ days}$



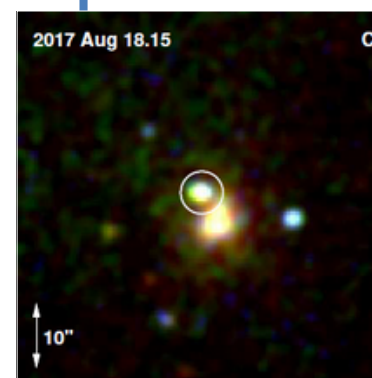
Delayed Arrival of X-rays and Radio



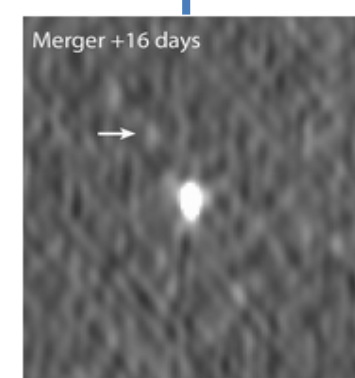
Gamma-rays
 $T = 1.7\text{ seconds}$



Optical
 $T = 10\text{h } 52\text{m}$



Ultraviolet
 $T = 15\text{ hours}$



Radio
 $T = 16\text{ days}$

Kilonova
(radioactivity of r-process elements)

Afterglow
(shock between outflows and the ISM)

キロノバのサイエンス

Element Origins

- 重元素の起源を理解できる鍵
- 同定するだけで、重力波による宇宙論が進む

1 H	Element Origins																2 He		
3 Li	4 Be													5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg													13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr		
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe		
55 Cs	56 Ba			72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
87 Fr	88 Ra																		
		57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
		89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U														

重元素の起源を理解できる鍵

同定するだけで、重力波による宇宙論が進む

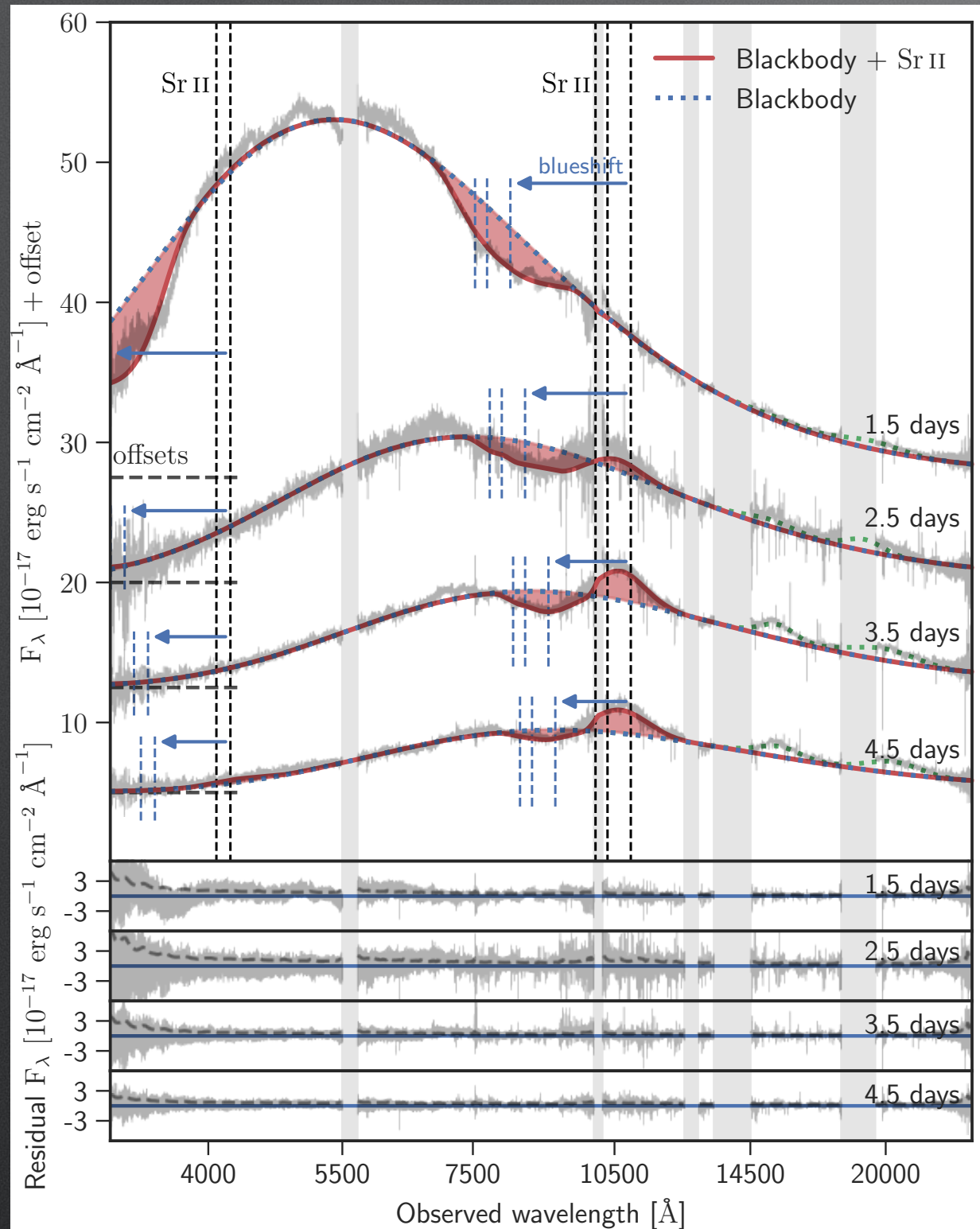
Merging Neutron Stars
Dying Low Mass Stars

Exploding Massive Stars
Exploding White Dwarfs

Big Bang
Cosmic Ray Fission

Based on graphic created by Jennifer Johnson

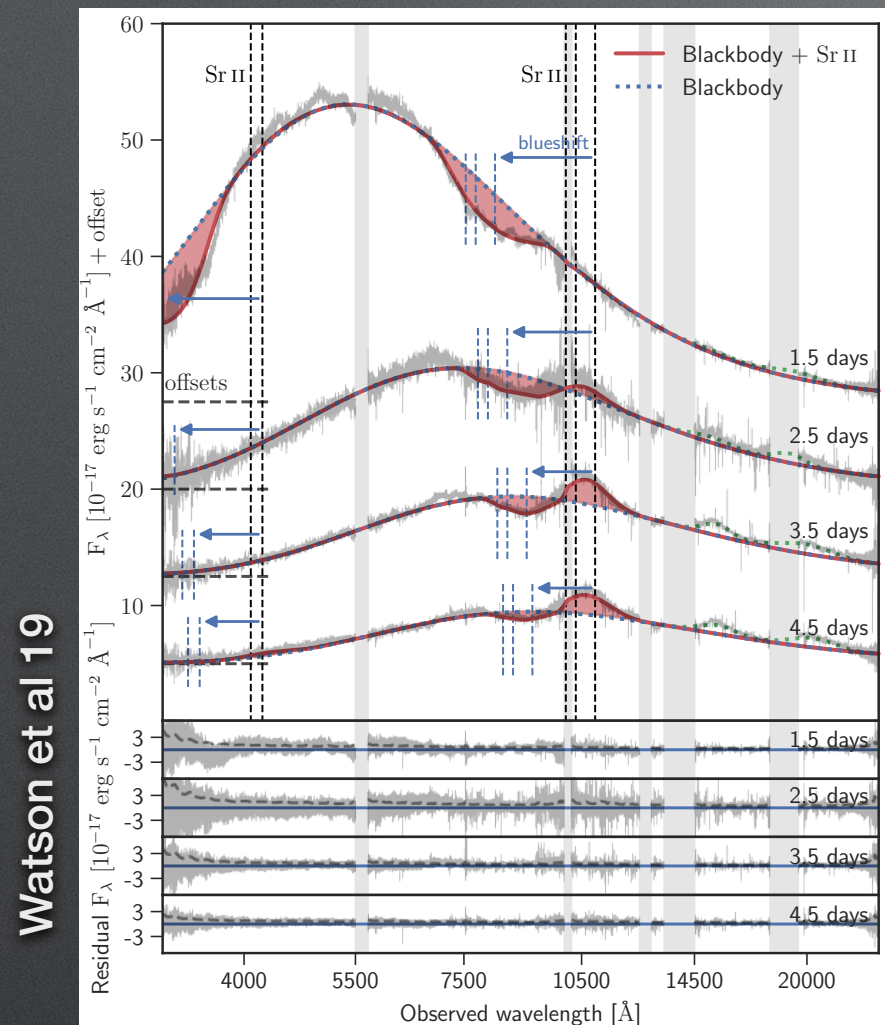
Lesson from GW170817



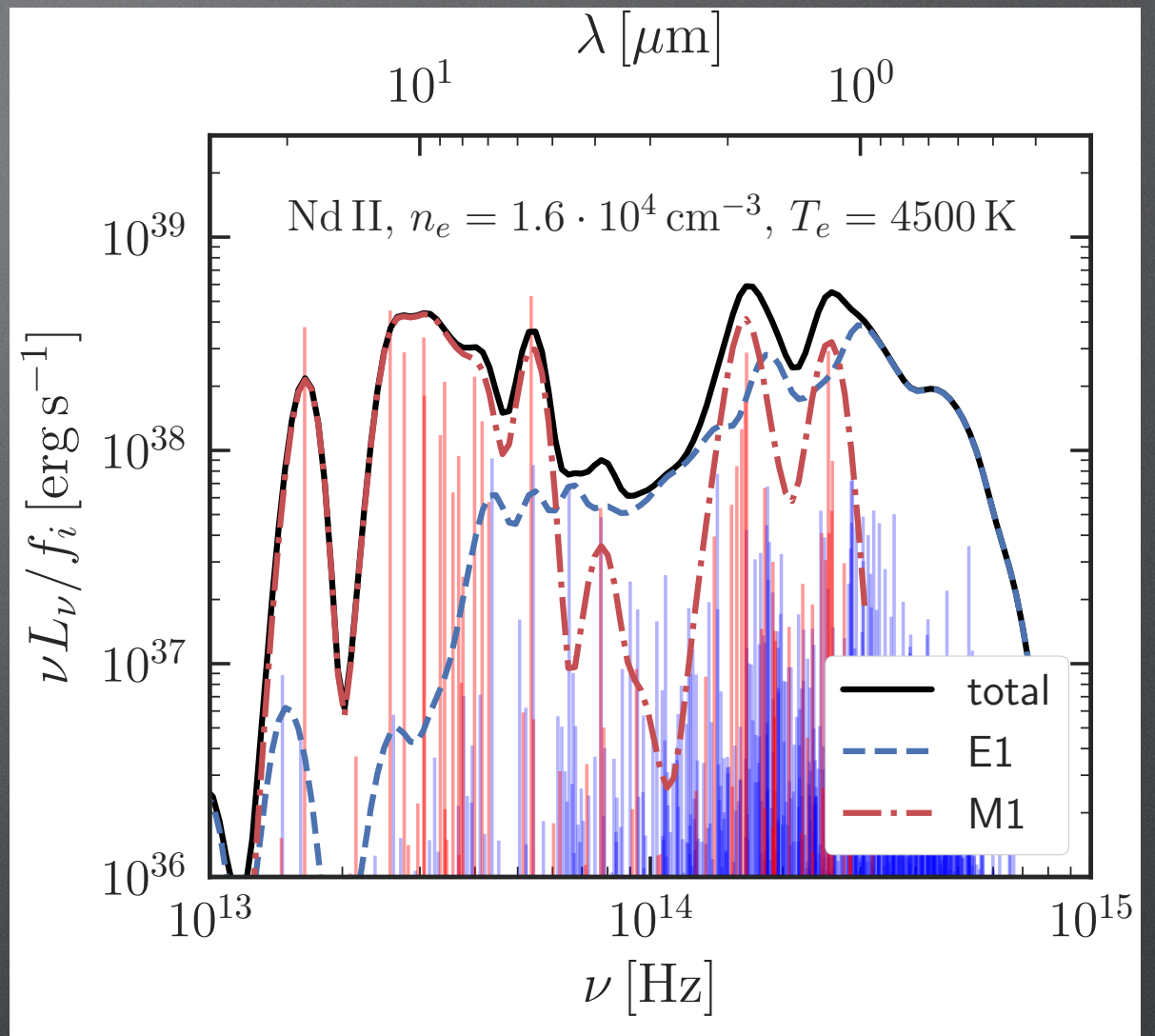
- 可視領域には構造が少ない。
- Sr II? P-Cygniが見えるが、かなり広がっている。
- 膨張速度 $\sim 0.1c$ 程度。
- 中分散で良い
- 狭い波長域の分光データは使いにくい。
- 可視から近赤外までカバーしたデータが極めて有用だった (VLT X-shooter)
- 今後、可視ピーク ~ 1 日, $T \sim 5000K$, $\lambda < 8000\text{\AA}$ に構造がない天体を探せば良い。

$M_{\text{peak}} \sim 17 \text{ mag at } 40 \text{ Mpc (GW170817)}$
-> $21 \text{ mag at } 200 \text{ Mpc (O4 2022~)}$
-> $22 \text{ mag at } 330 \text{ Mpc (O5 2025~?)}$
-> $25 \text{ mag at } >1 \text{ Gpc (3 G 203?)}$

元素の特定に向けて：準黒体から輝線期へ



KH et al 21



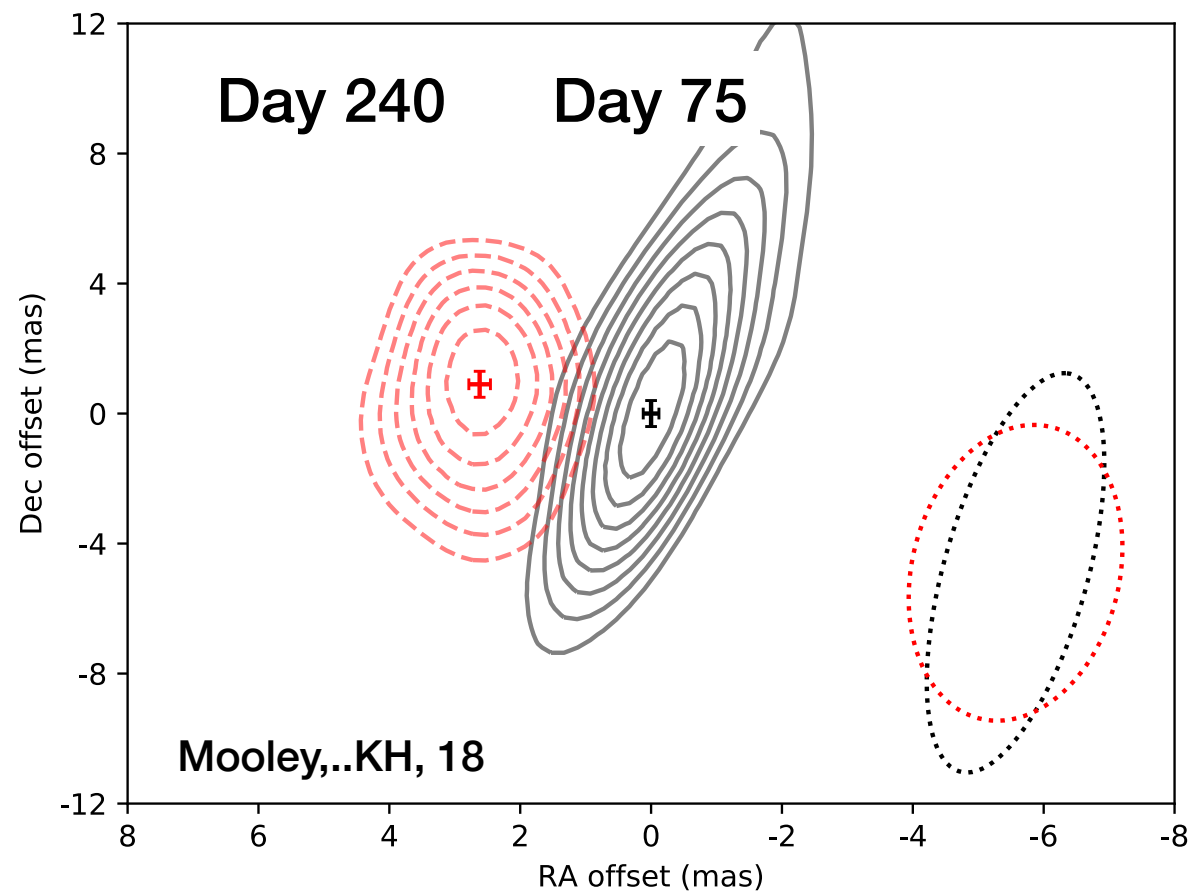
ランタノイドは特殊な構造を持つため 許容遷移 ~ eV 程度まで存在
-> 可視-近赤外(~1 μ m)付近まで弱い許容遷移による吸収線がたくさん。

$\lambda > \sim 1\mu$ m の禁制線からなる構造が1週間後くらいには出てくるはず

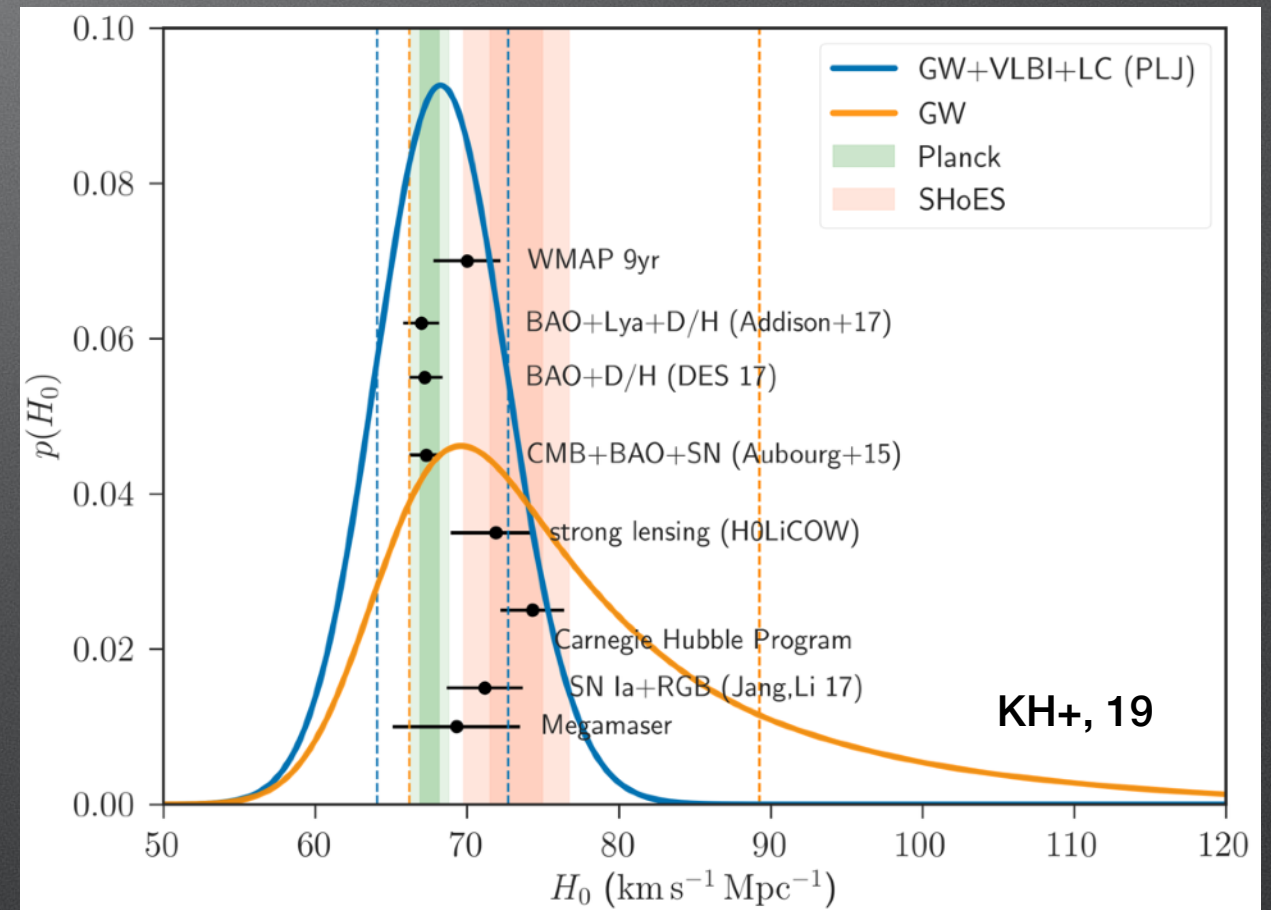
可視から中間赤外(~20 μ m)まで広くカバーする分光・測光データがあると素晴らしい。
(例：JWSTだと100Mpcくらいまで構造を分解可能)

GW170817 残光・超光速速度運動

VLBI



H0 from GW + VLBI



- GRB ジェットの運動を始めて分解
- ジェットのローレンツ因子 > 4
- ジェットに対する見込み角 ~ 20 度
- この観測、実は、スペースなら可視・赤外でも可能

キロノバ Golden observation

t=0 重力波検出

(t~1sec GRB)

~ 1hr UVでキロノバ 発見

ジェットとエジェクタの相互作用がわかる

~ 数hr - 数ヶ月 可視・赤外測光

キロノバ のエネルギー源を特定 (β 崩壊、核分裂、中心エンジン?)

~ 数日~ 数ヶ月 可視・赤外分光

可視近赤外の強い吸収線・輝線から元素特定

放射性崩壊で崩壊で消えていく成分も見つかる

~ 数日 ~ 数年 電波, 可視, X線で残光

ジェットの構造や粒子加速に関する知見

~ 数ヶ月 電波・可視でジェット超光速運動を分解

ジェットのローレンツ因子を測り、連星合体に対する見込み角を決定

~ 数年 電波でキロノバ 残骸を分解

キロノバ エジェクタの構造を得る

※これは30年代には完了してるかもしれない

第三世代と重力波天文学

第3世代の地上干渉計（2030年代）

- 中性子星合体は毎日10個、典型的な距離が1 Gpcを優に超えてくる。
- 初代星由来のBBHもあれば見つかる ($z \sim 10$)

1. 近傍イベント. $D \sim O(100 \text{ Mpc})$

- できるだけ早く見つけて詳細な観測 (X or UV $\rightarrow$ opt/IR $\rightarrow$ X-radio)

2. 標準サイレン宇宙論 ($z \sim 1$)

- GRBを特定する (5%が付随すれば、年間 ~ 100 回)
- 可視・赤外の測光・分光追観測でキロノバを確認して、母銀河の赤方偏移
- 宇宙の膨張率を $z \sim 1$ くらいまで正確に測る。（電波だともっと遠くまで行くか、Dobie KH+21）

3. 重力波のstrong lensing (Oguri 18, 19)

- 年間 $O(100)$
- 中性子星合体の電磁波対応天体と組み合わせれば宇宙論、基礎物理に対する強力なProbeになる。strong lensと判明してからの観測でよければ、電波, SKA, ng-VLA, DSA2000

GW170817を遠くに置くと

FACILITIES FOR OBSERVING EM COUNTERPARTS TO GWs

Table 2.2: Present (*P*) and future (*F*) EM facilities that are able to observe faint/distant counterparts to GWs. Detection Limit (**DL**, 1 hr exposure time) for UV, optical, and near-IR facilities are expressed in AB magnitudes, for X-rays in $10^{-16} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^2$, and for radio in μJy . Distance reach (**D** in Mpc) of facilities for GW170817-like events are also shown.

	Facility	DL	D
Gamma-rays	<i>Fermi P</i>	S/N 5	80
	AMEGO <i>F</i>	S/N 5	130
X-rays	<i>Swift P</i>	S/N 5	~80
	<i>Chandra P</i>	30	150
	<i>ATHENA F</i>	3	480
	<i>Lynx F</i>	6	450
	STROBE-X <i>F</i>	S/N 5	120
UV	<i>HST</i> (im) <i>P</i>	26	2000
	<i>HST</i> (spec) <i>P</i>	23	400
Optical Imaging	Subaru <i>P</i>	27	3200
	LSST <i>F</i>	27	3200
IR	<i>WFIRST F</i>	27.5	4800
Imaging	<i>Euclid F</i>	25.2	1700

	Facility	DL	D
Optical Spec.	Keck/VLT	23	500
	Gemini Obs.	23	500
	GMT <i>F</i>	25	1265
	TMT <i>F</i>	25.5	1592
	E-ELT <i>F</i>	26	2005
Infrared Spec.	Keck/VLT	21.5	481
	GMT <i>F</i>	23.5	762
	TMT <i>F</i>	24	960
	E-ELT <i>F</i>	24.5	1208
Radio	VLA (S) <i>P</i>	5	91
	ATCA (CX) <i>P</i>	42	51
	ngVLA (S) <i>F</i>	1.5	353
	SKA-mid (L) <i>F</i>	0.72	634

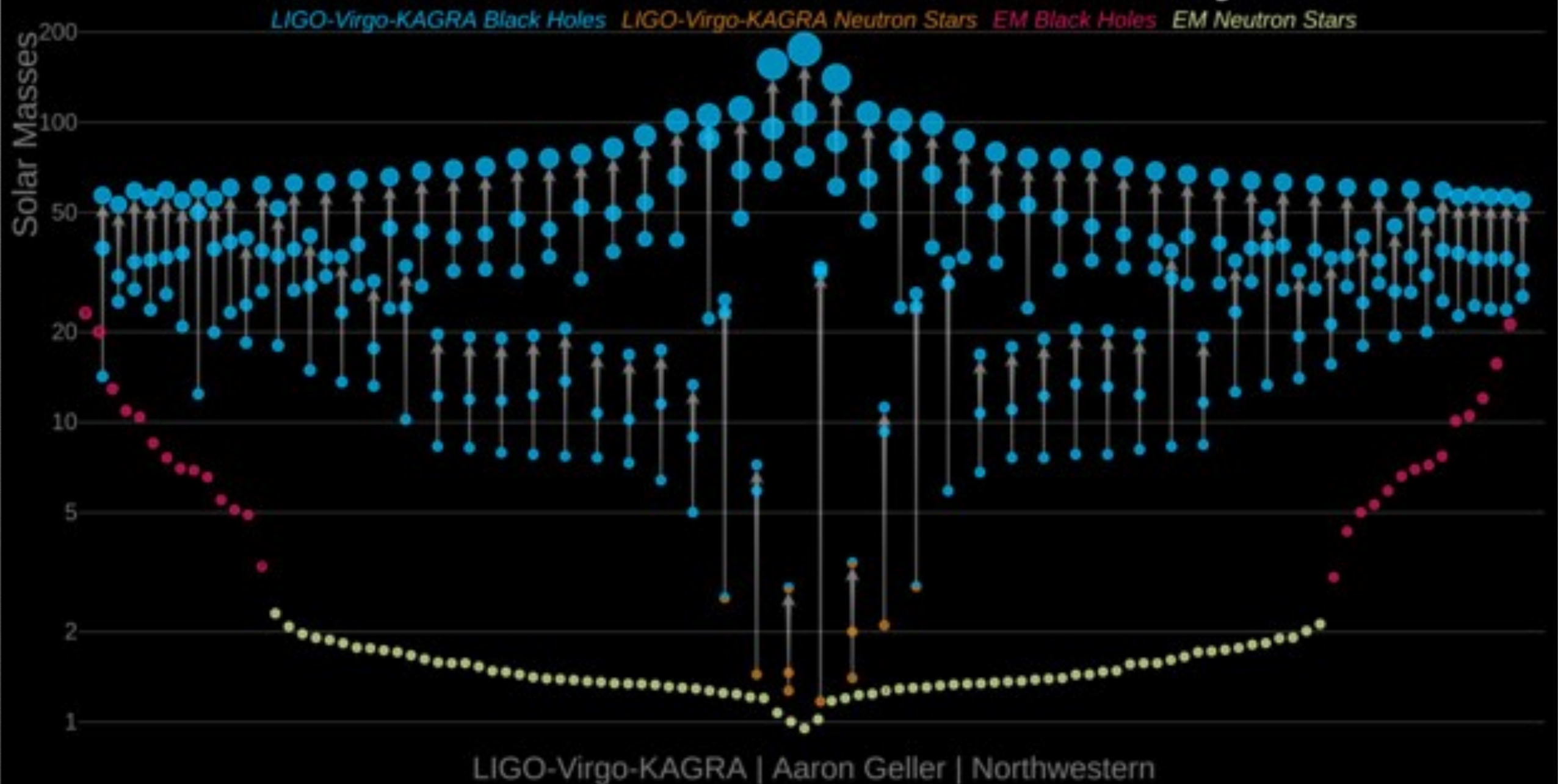
The next global generation gravitational wave observatory science book

単純には、HSC, LSST, Romanでキロノバ探査が有力

2020-30年代の3つの軸

1. *Time-domain*: 突発天体から新たな天体の同定し、新しいサイエンスを展開する。多波長が極めて重要。
2. *Multi-Messenger Time-domain*: 重力波天体、ときどき電磁波対応天体が見つかる。30年代後半にはニュートリノ天体も出てくる。
3. *Survey & Characterization*: 天文サーベイデータ（Gaia など）やコンパクト天体を発見し、質量などを詳細に決定する。（系外惑星の方法と類似）

Masses in the Stellar Graveyard



- ・ 現在、重力波BHの数 ~ 100 これから定常的に増え続ける(10^4 個第3世代)。
- ・ 銀河系の電磁波から見つかったBHが15ほど。
- ・ 銀河系に存在するはずの1億個ほどのBHはどこに眠っているのか？

眠っているBHの探査の展望

- *eROSITA*: X線連星, ~ 300 (Doroshenko+ 14)、孤立BH (Kimura, Kashiya, KH 21)
- *TESS*: BH + 主系列, a few $\times 100$ (Masuda & KH 19)
- *Gaia*: Astrometric BH連星, $100 - 10^5$ (e.g., Mashian & Loeb 17, Yamaguchi+18, Yallnewich..KH,18)
- *Vera Rubin*: マイクロレンズ BHs, $\sim 10^5$ (Natasha & Takada 20)

電磁波BHの数が再び重力波BHの数を上回る可能性もある

Jayasinghe+21



今は少ししかないが、10年~20年後には、HR図のように
たくさんのブラックホールで埋まる。

20年後、コンパクト天体どうなるか？

超新星爆発と恒星進化

- ショックブレイクアウトなどから、超新星の多様性と恒星進化が結びつく。
- GRBジェット駆動条件、爆発せず重力崩壊で消える条件が判明。

第3世代の地上干渉計（観測的宇宙論と連携）

- 中性子星合体は毎日10-100個。
- 標準サイレン宇宙論が赤方偏移2まで伸ばせるか。(GRB & 電波)
- 重力レンズ重力波が出てくる。
- できる多く、遠くの対応天体を特定できる装置・戦略が重要になる。

サーベイ天文学（系外惑星探査と連携）

- ブラックホールが1万個観測され、BBHマイクロレンズや自己レンズするBH連星などが連星進化や重力理論のテストができる。

その他

- LISA, TianQin, DECIGOから新たな重力波天体、IceCube-Gen2からニュートリノ天体が見つかる。
- フォローアップ観測には膨大な突発天体から適切な選択が必要。