

Section 14.

時間領域天文学と

マルチメッセンジャー天文学

14.1 時間領域天文学

14.2 マルチメッセンジャー天文学

14.3 中性子星合体の

マルチメッセンジャー観測

時間領域天文学とは？

時間的に明るさが変動する天体や
突発的に現れる天体を対象にする天文学

1. 定常成分がある場合

==> 変光星、変動天体

2. 突然現れる場合

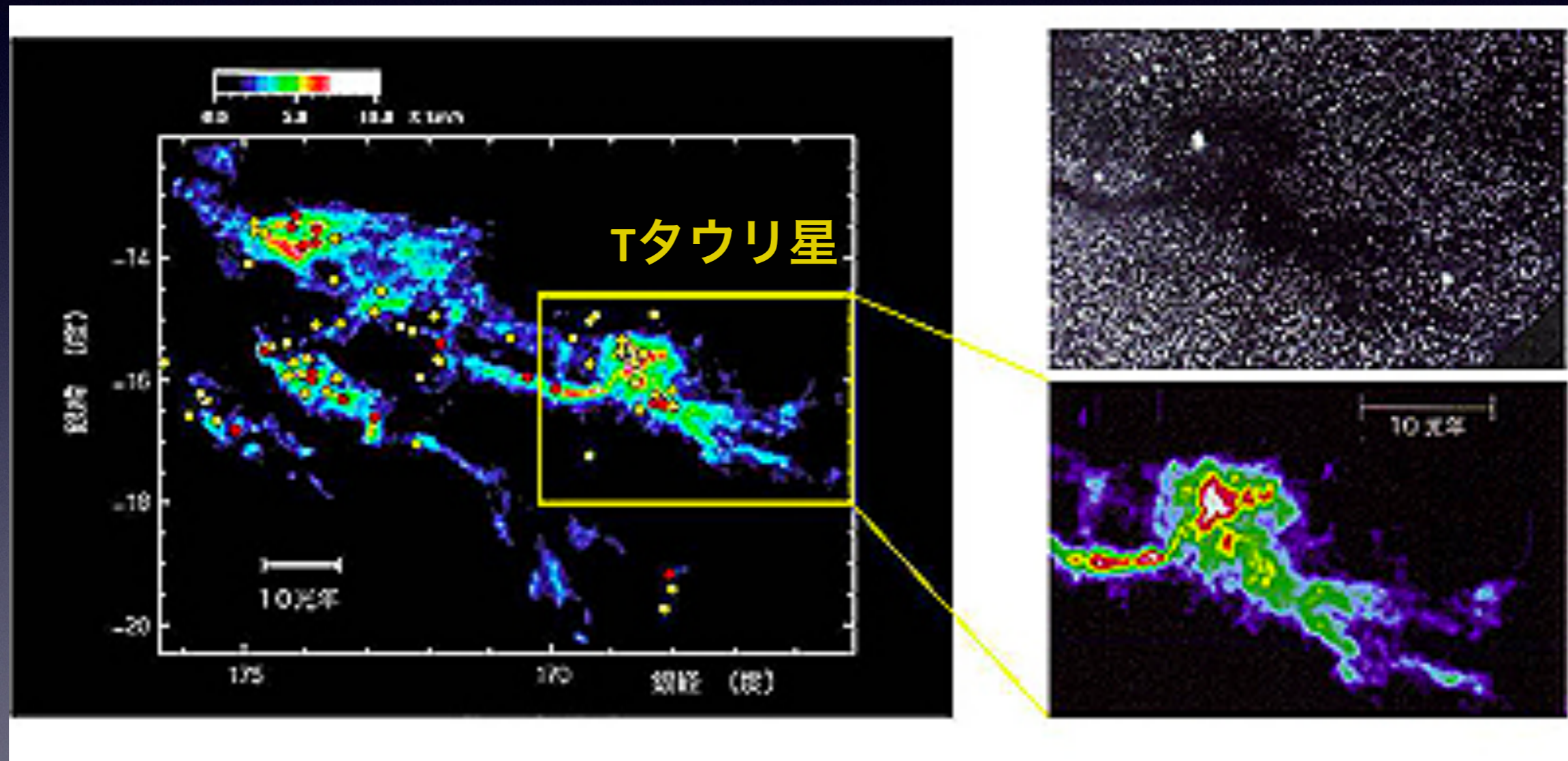
==> 突発天体 (新星、超新星、ガンマ線バーストなど)

変動のタイムスケール < 人類のタイムスケールなら

全て対象となりうる

(例 1) 星の形成

分子雲の自由落下時間 $\sim 10^6$ 年

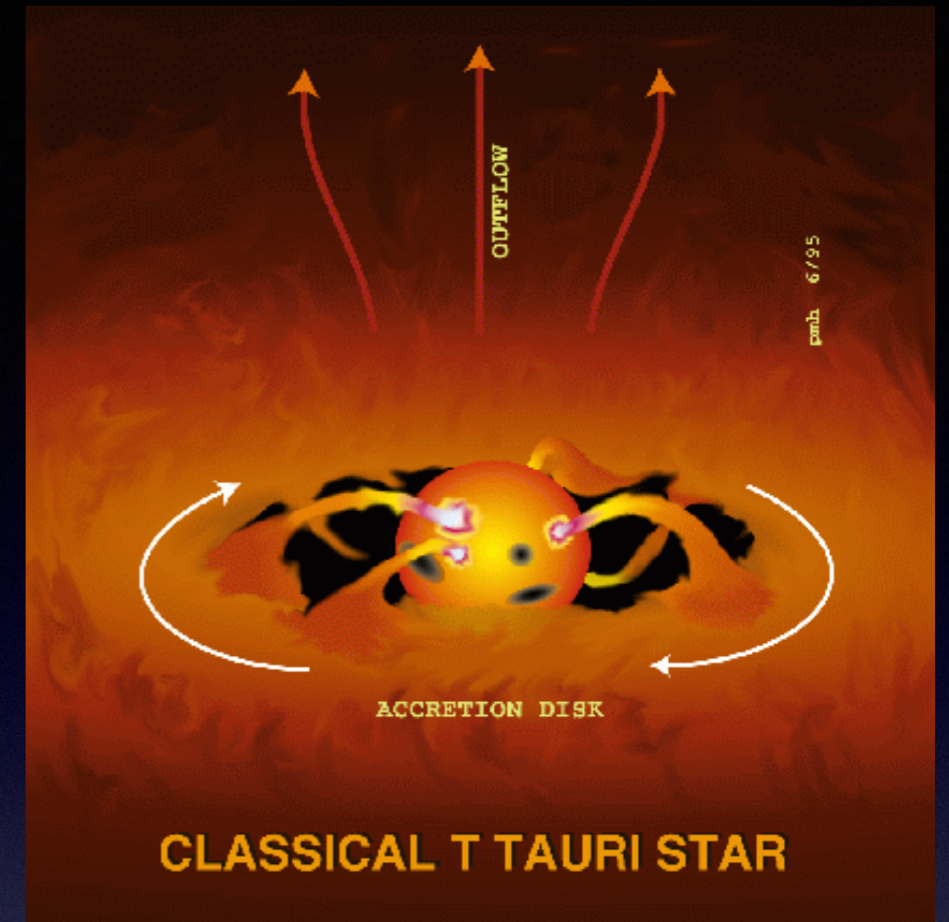


おうし座分子雲

理科年表 https://www.rikanenpyo.jp/kaisetsu/tenmon/tenmon_009_2.html

(例 1) 星の形成

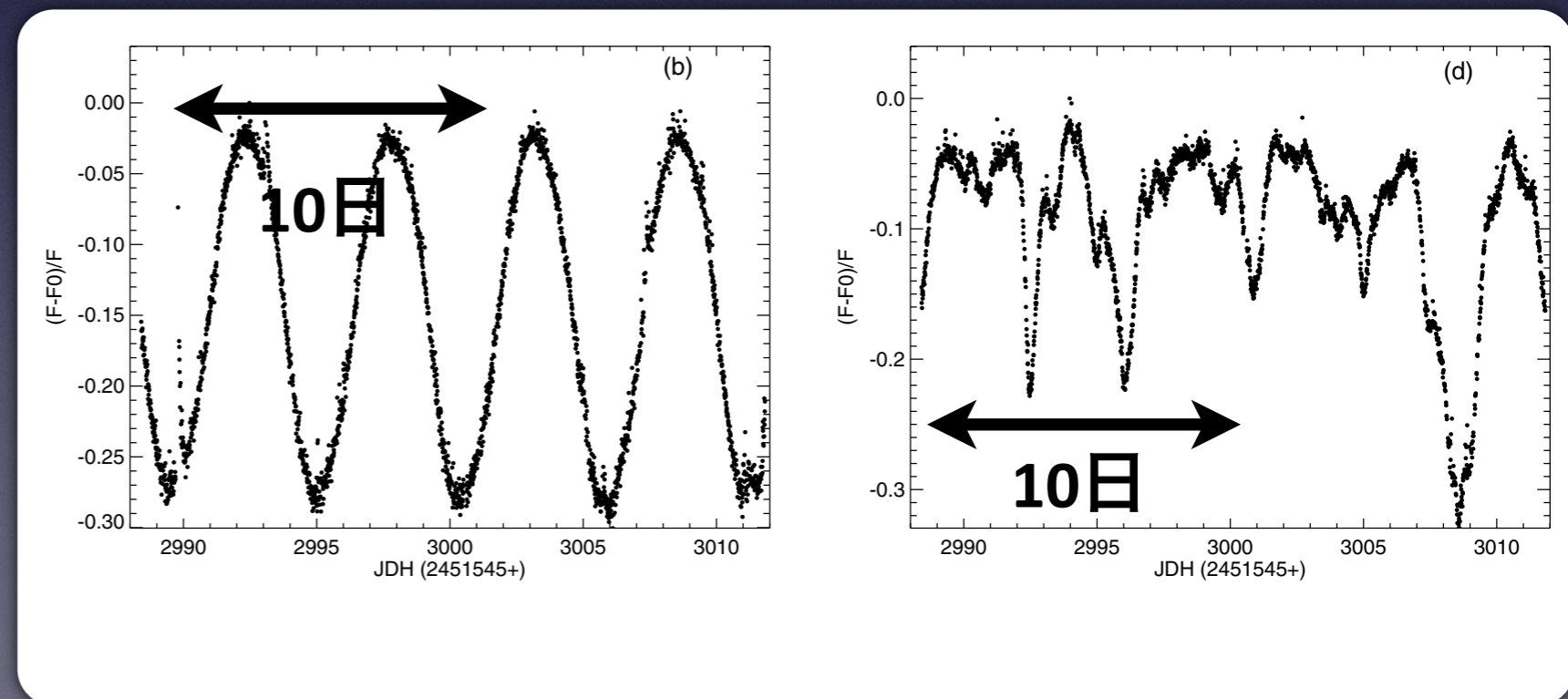
若い星 (Tタウリ星)



<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec13.html>

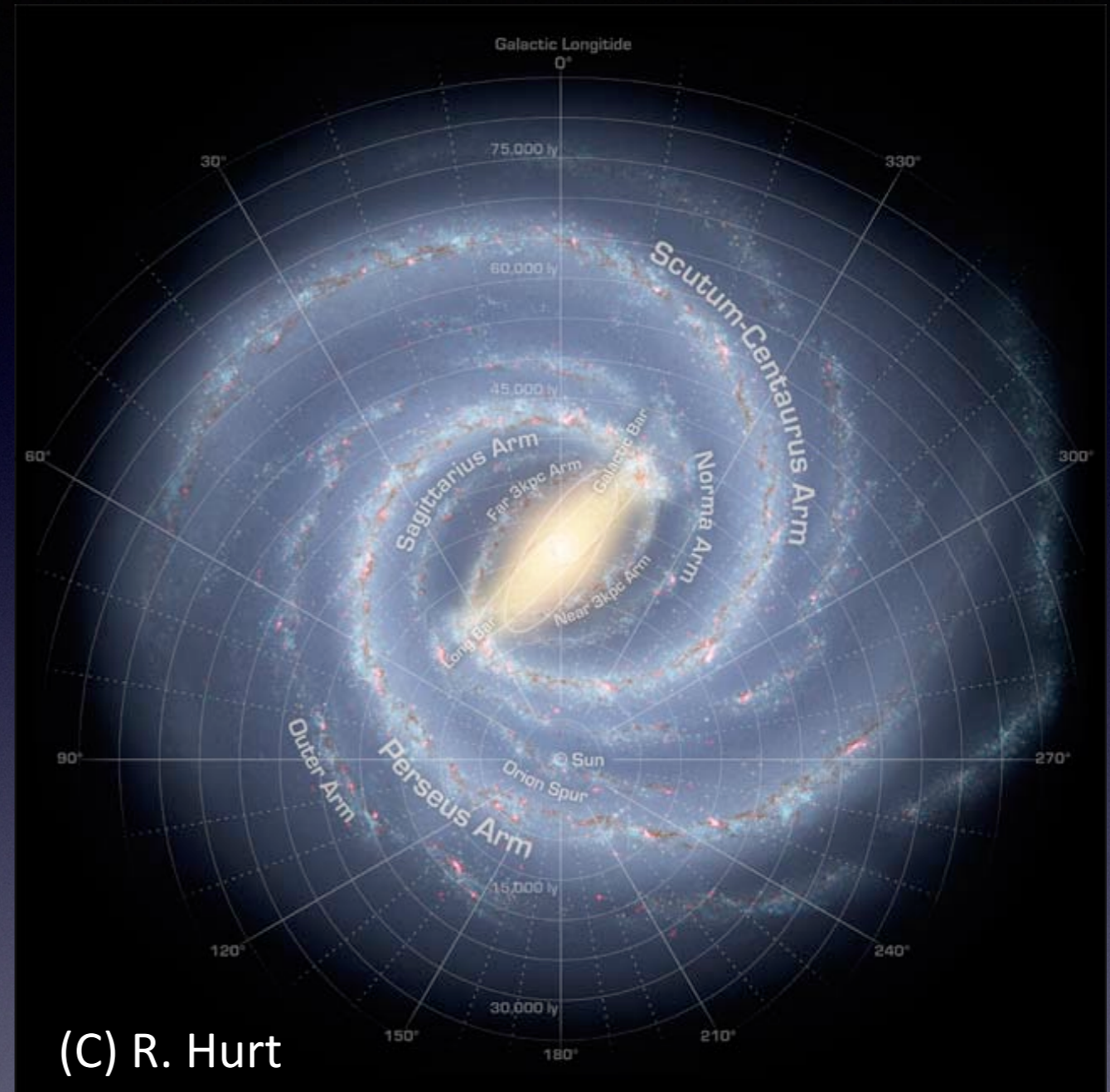
- 星表面のhot spot
- 星周円盤による遮蔽
(自転周期)

~ 10日程度の
タイムスケール



(例 2) 銀河

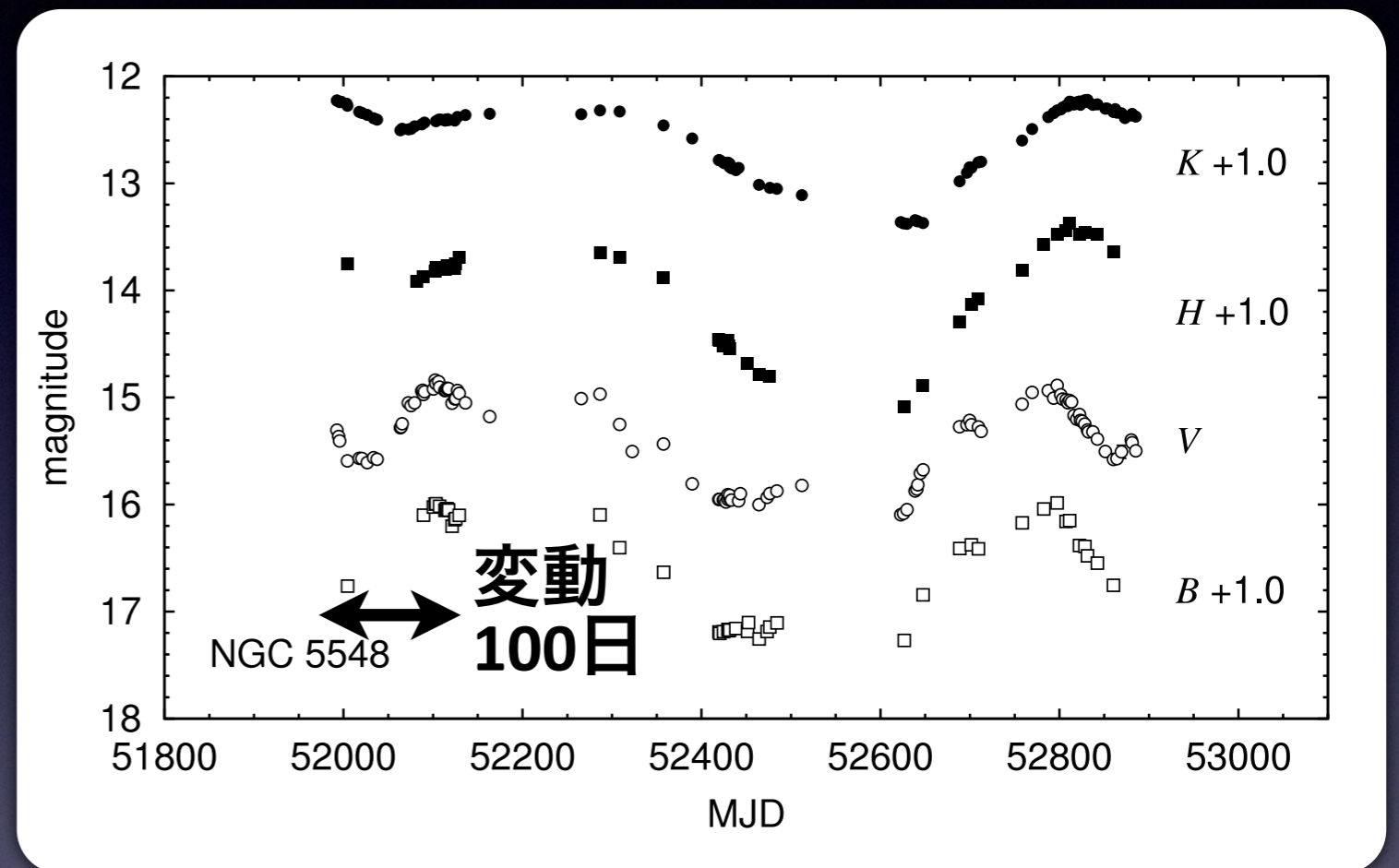
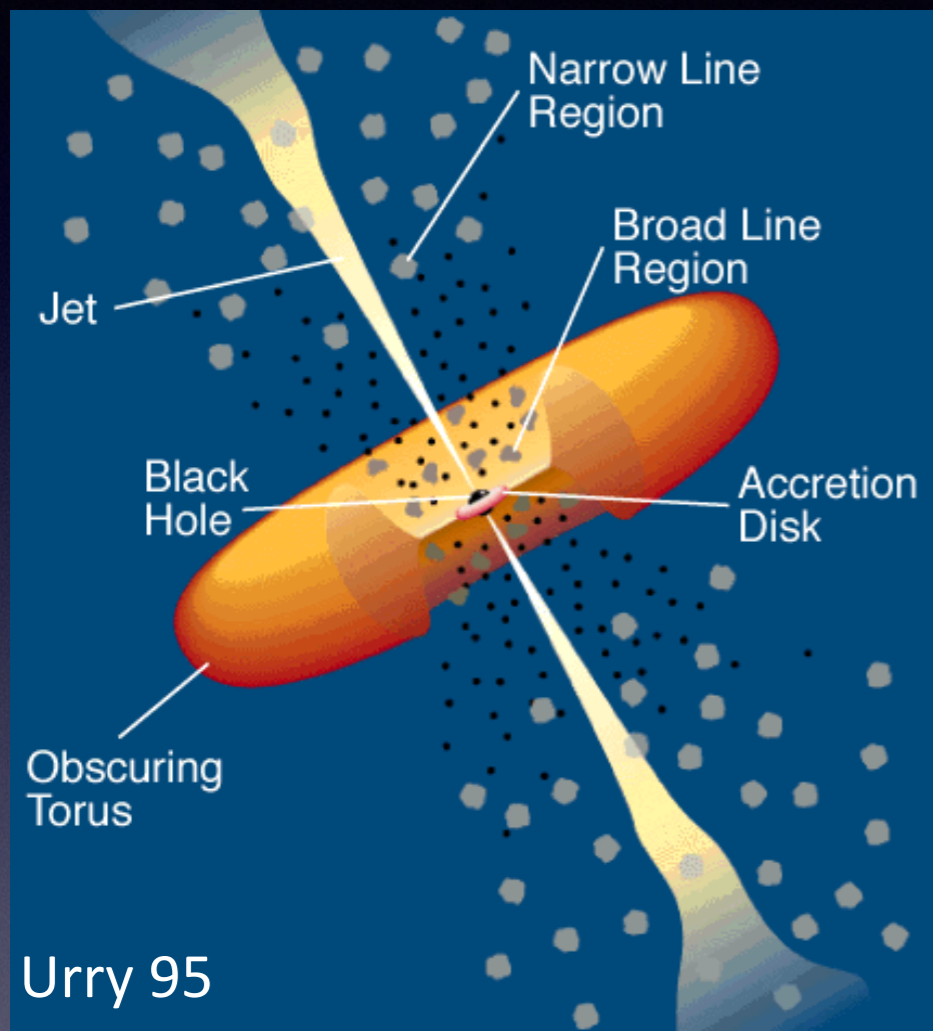
銀河回転の周期 $\sim 10^8$ 年



(例 2) 銀河

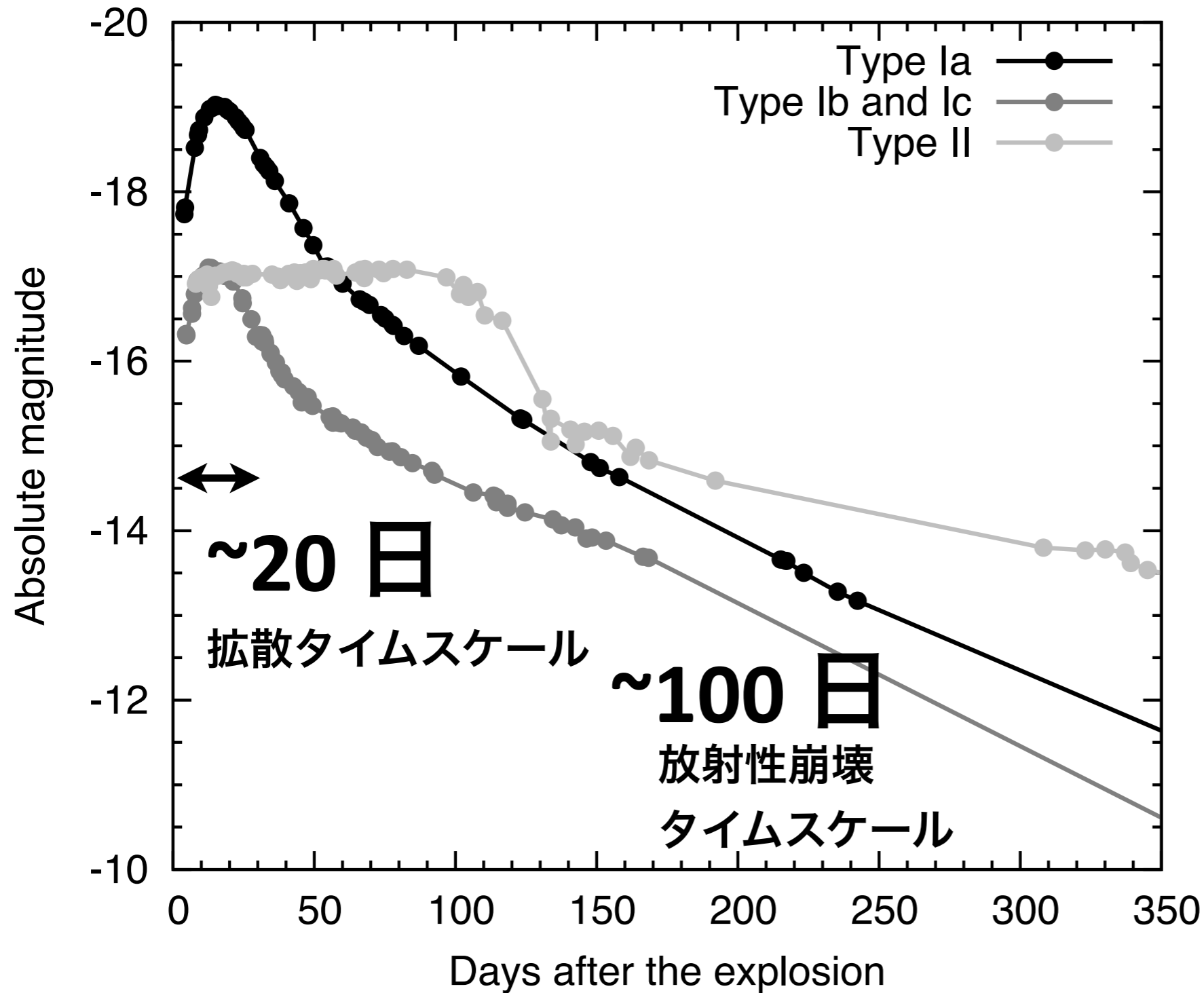
活動銀河核

Suganuma et al. 2006



降着円盤の変動タイムスケール ~ 1年

(例 3) 超新星爆発



$10^{43} \text{ erg s}^{-1}$

$10^{42} \text{ erg s}^{-1}$

時間領域天文学観測

1930-1950年代

ツヴィツキーら



(C) Caltech

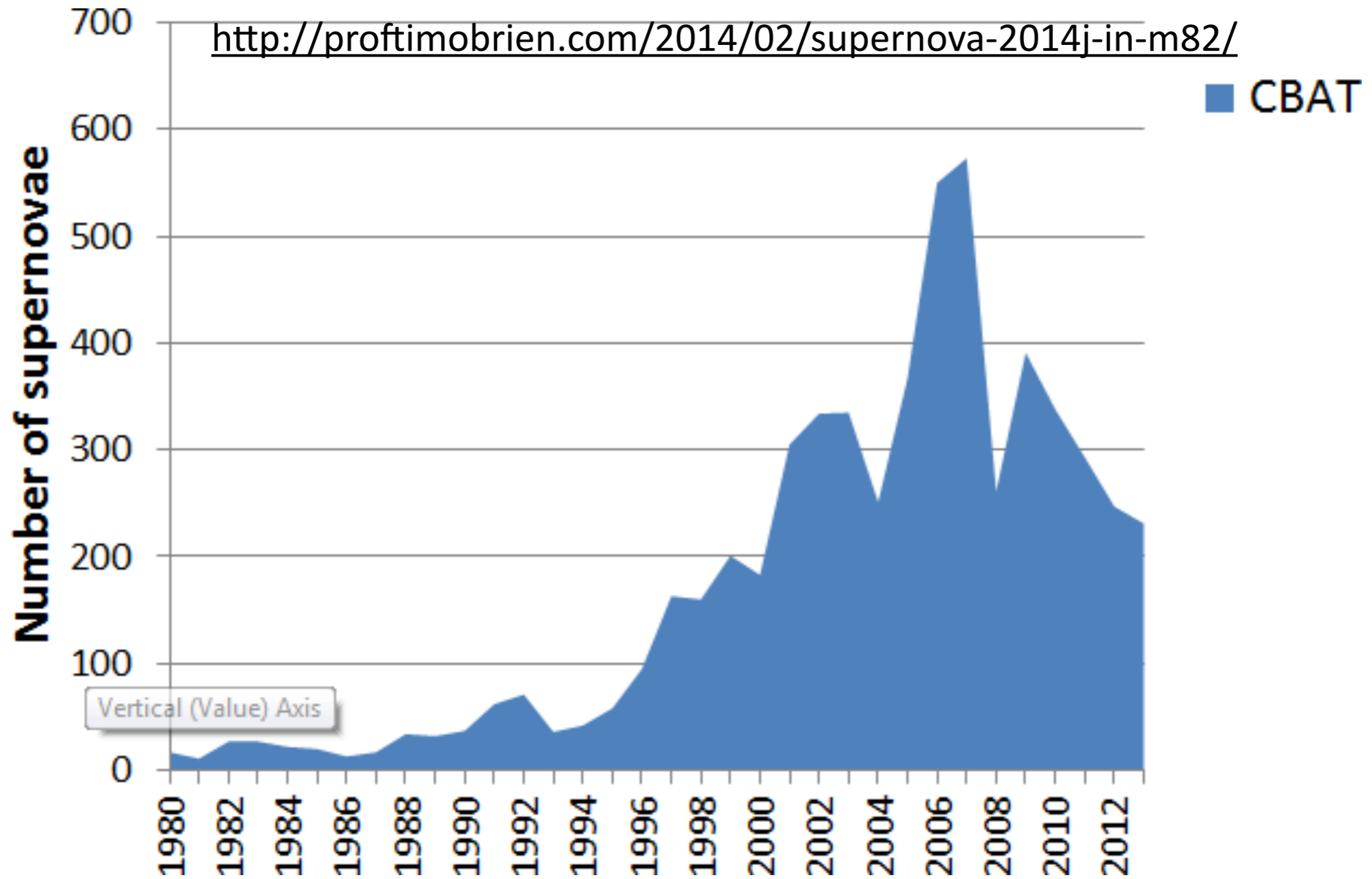
パロマー 46cm望遠鏡

初めての系統的な超新星探査

超新星発見の歴史

CBAT

= Central Bureau for Astronomical Telegrams



<http://www.cbata.harvard.edu/lists/Supernovae.html>

超新星観測に必要な望遠鏡の口径

*口径(直径)

$$m = -2.5 \log_{10}(F_\nu) - 48.6$$

$$= -2.5 \log_{10} \left(\frac{F_\nu}{3631 \times 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ Hz}^{-1} \text{ cm}^{-2}} \right)$$



撮像

肉眼

1m

2m

8m

宇宙望遠鏡
2m

分光

1m 2m

8m

宇宙望遠鏡
2m

-18 magの天体を
観測できる距離

10
kpc

10
Mpc

z=0.02
100
Mpc

z=0.2
1
Gpc

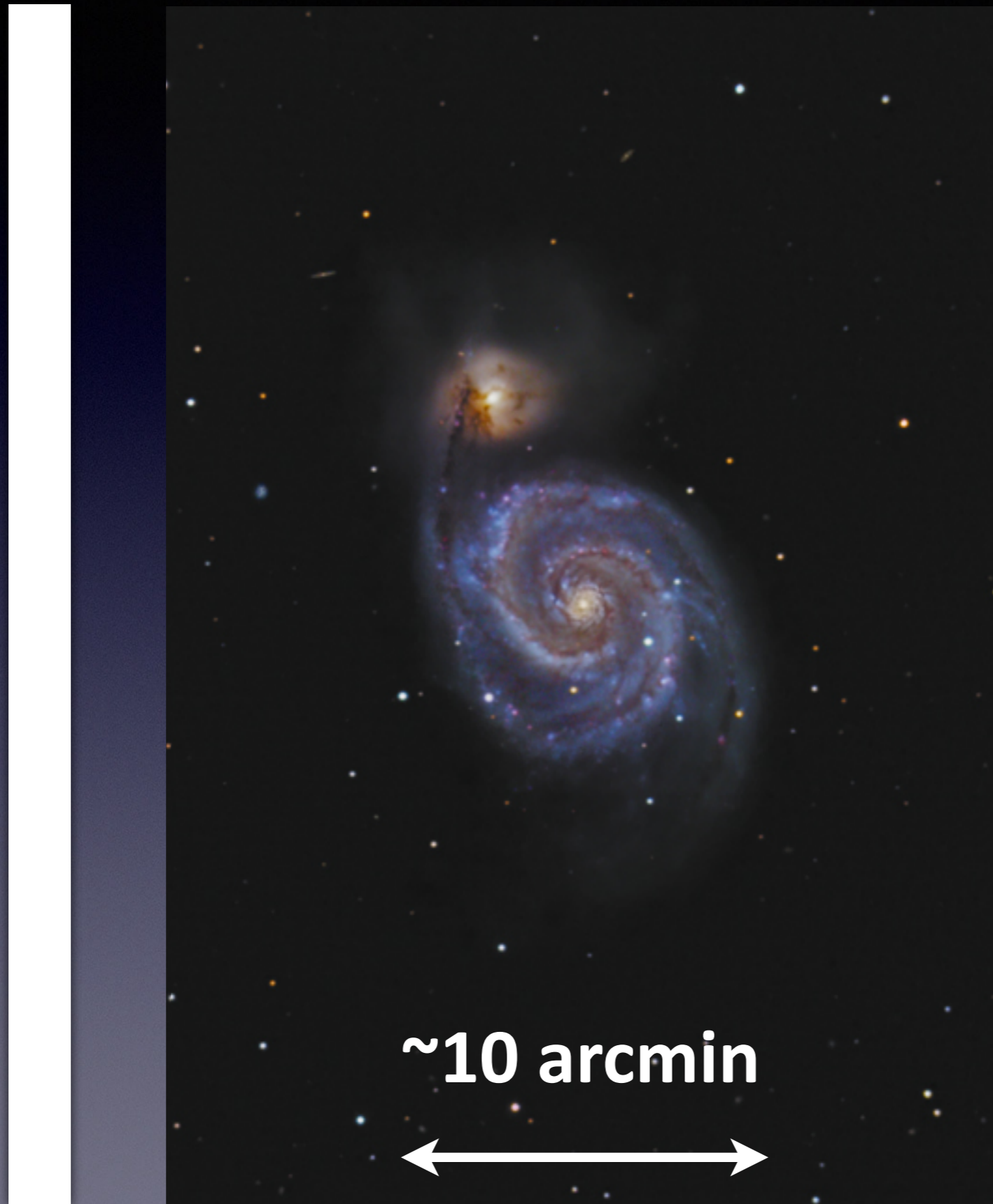
突発天体を見つけよう レベル1 (肉眼)



突発天体を見つけよう レベル1 (肉眼)



突発天体を見つけよう レベル2 (50cm望遠鏡)

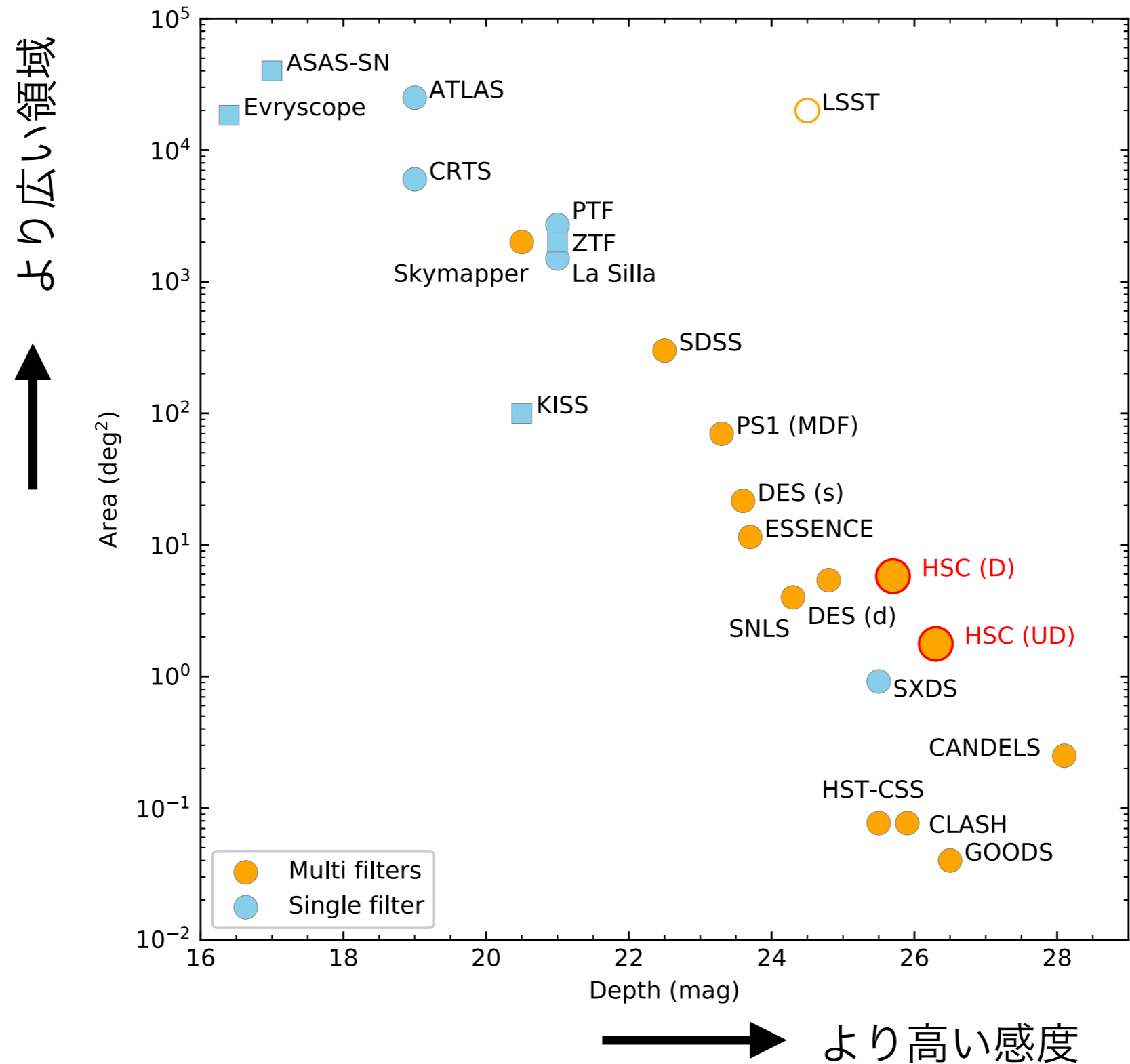


(C: Rod Pommier
<https://www.sbig.com>)

正解

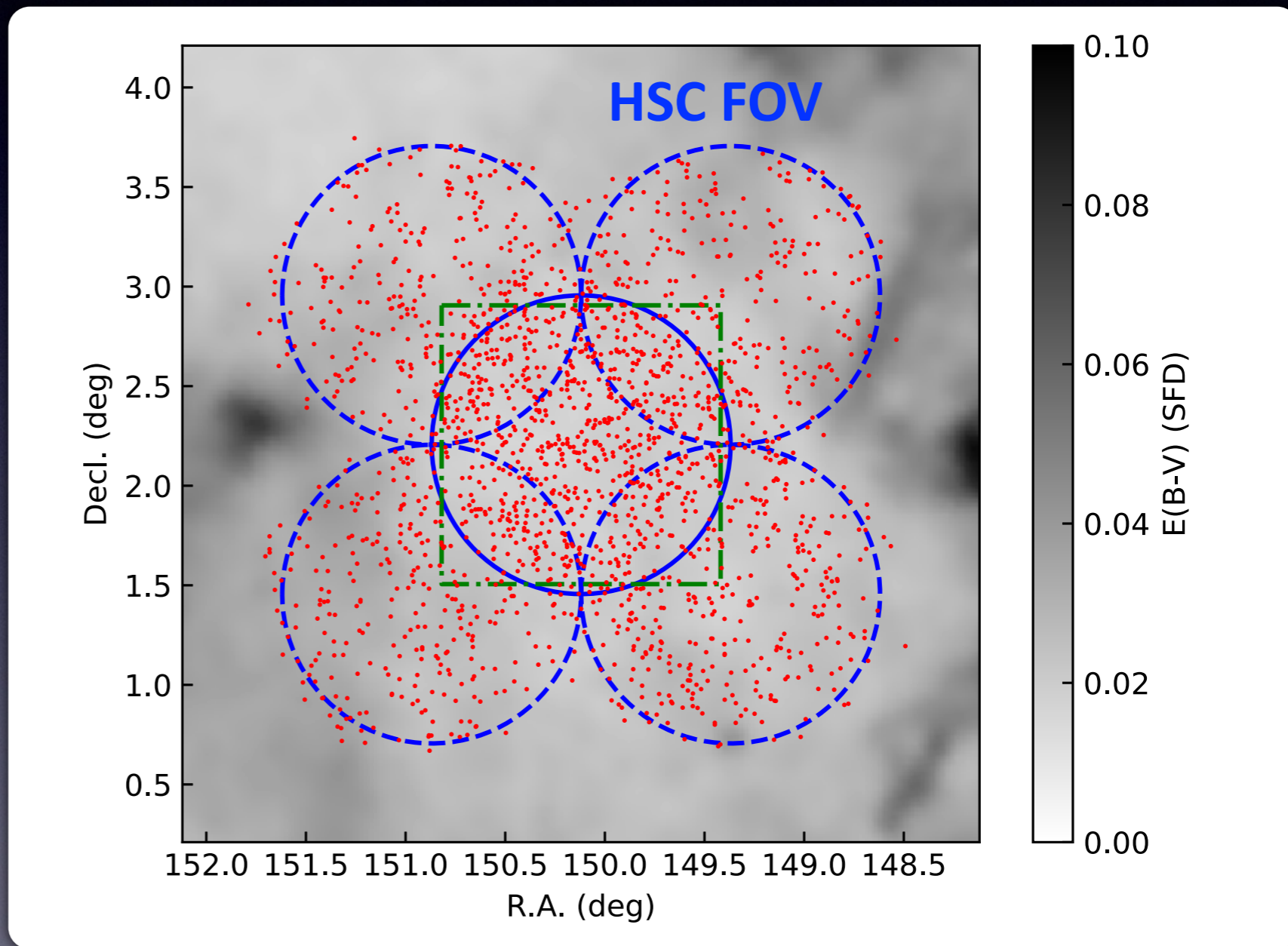
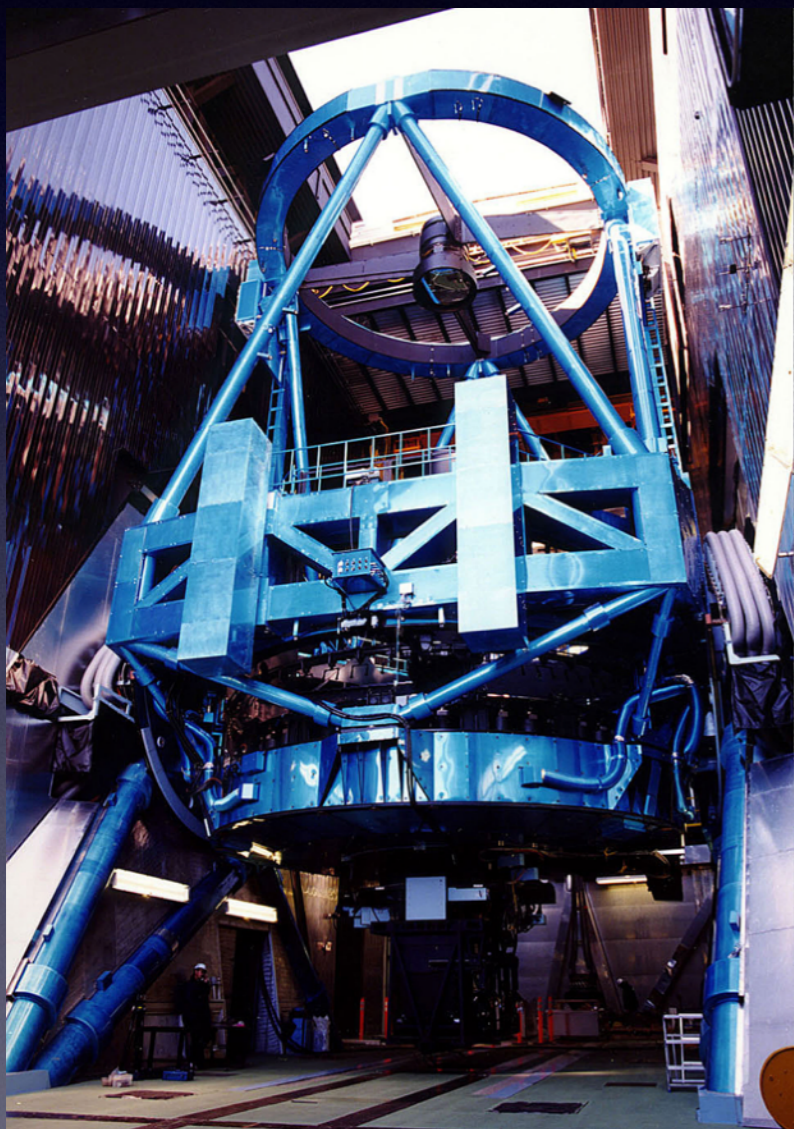


現在の突発天体観測



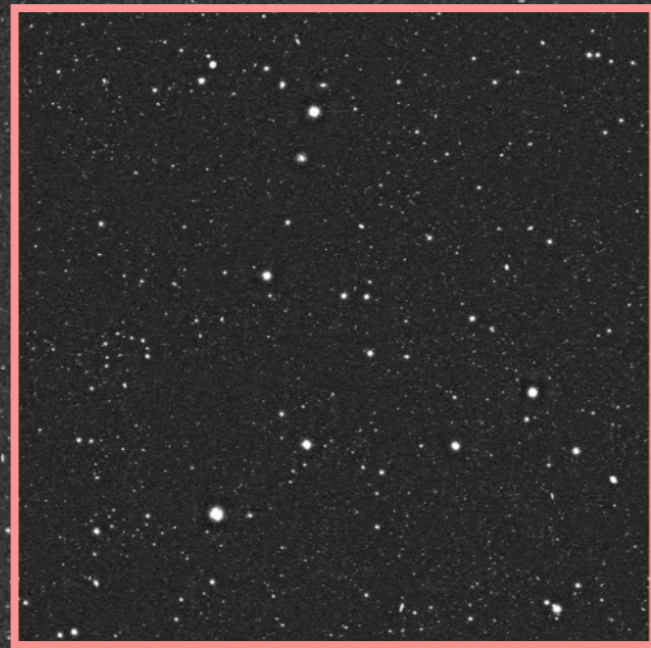
すばる望遠鏡 超広視野カメラによる突発天体探査

半年で~1800 天体！



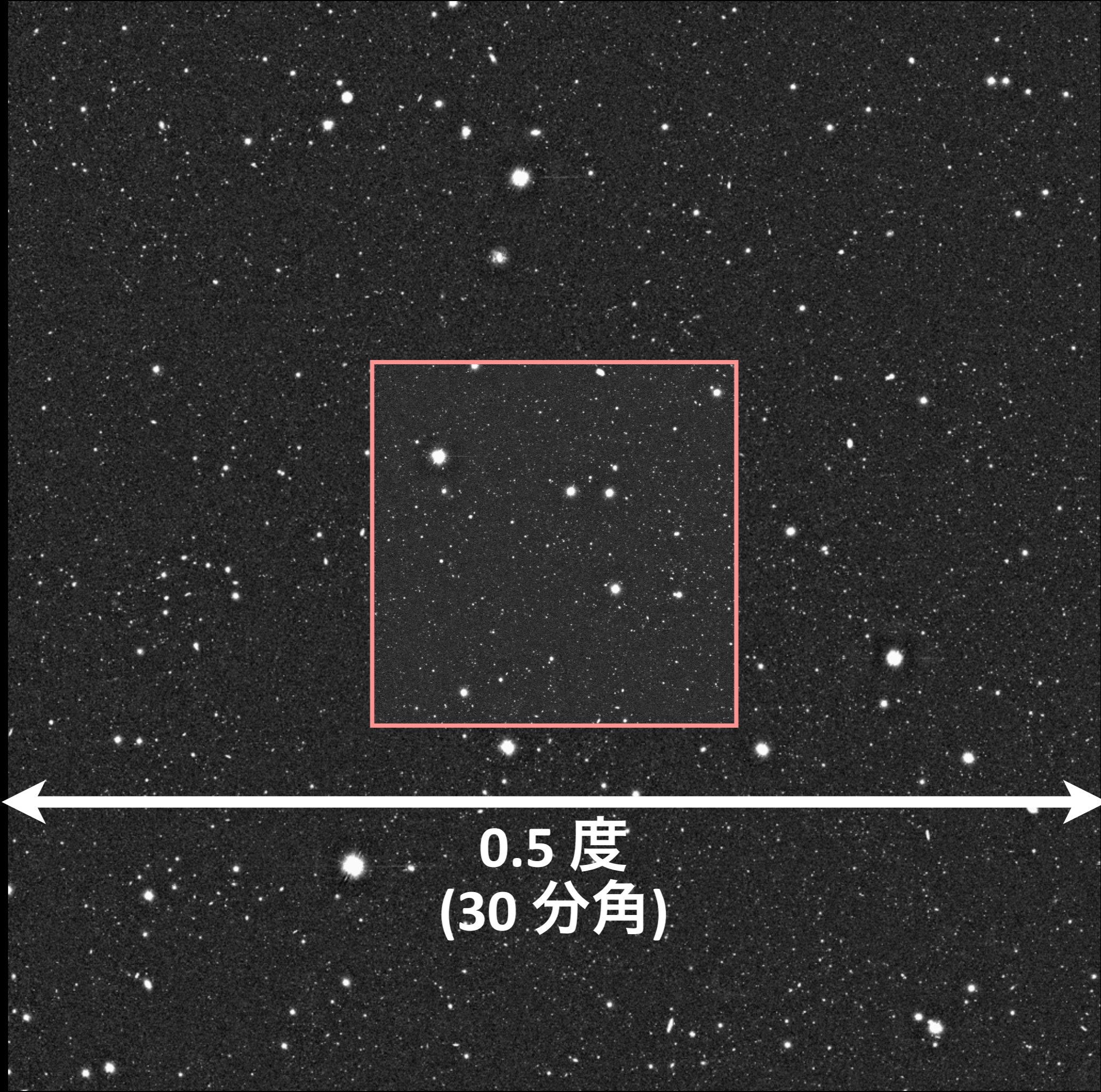
80億光年以上の超新星を50個以上発見

突発天体を見つけよう レベル3 (すばる望遠鏡)

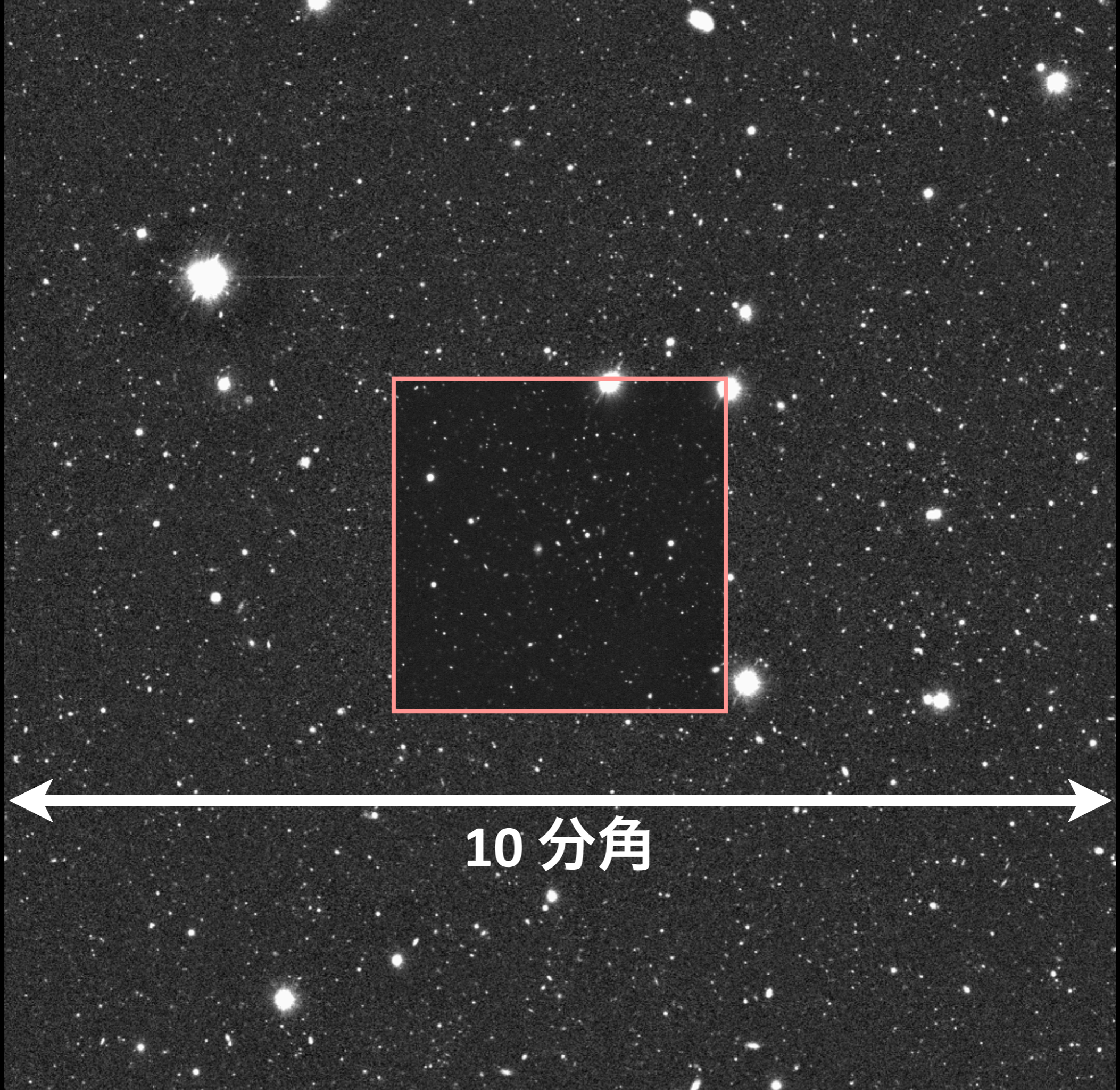


1.5 度

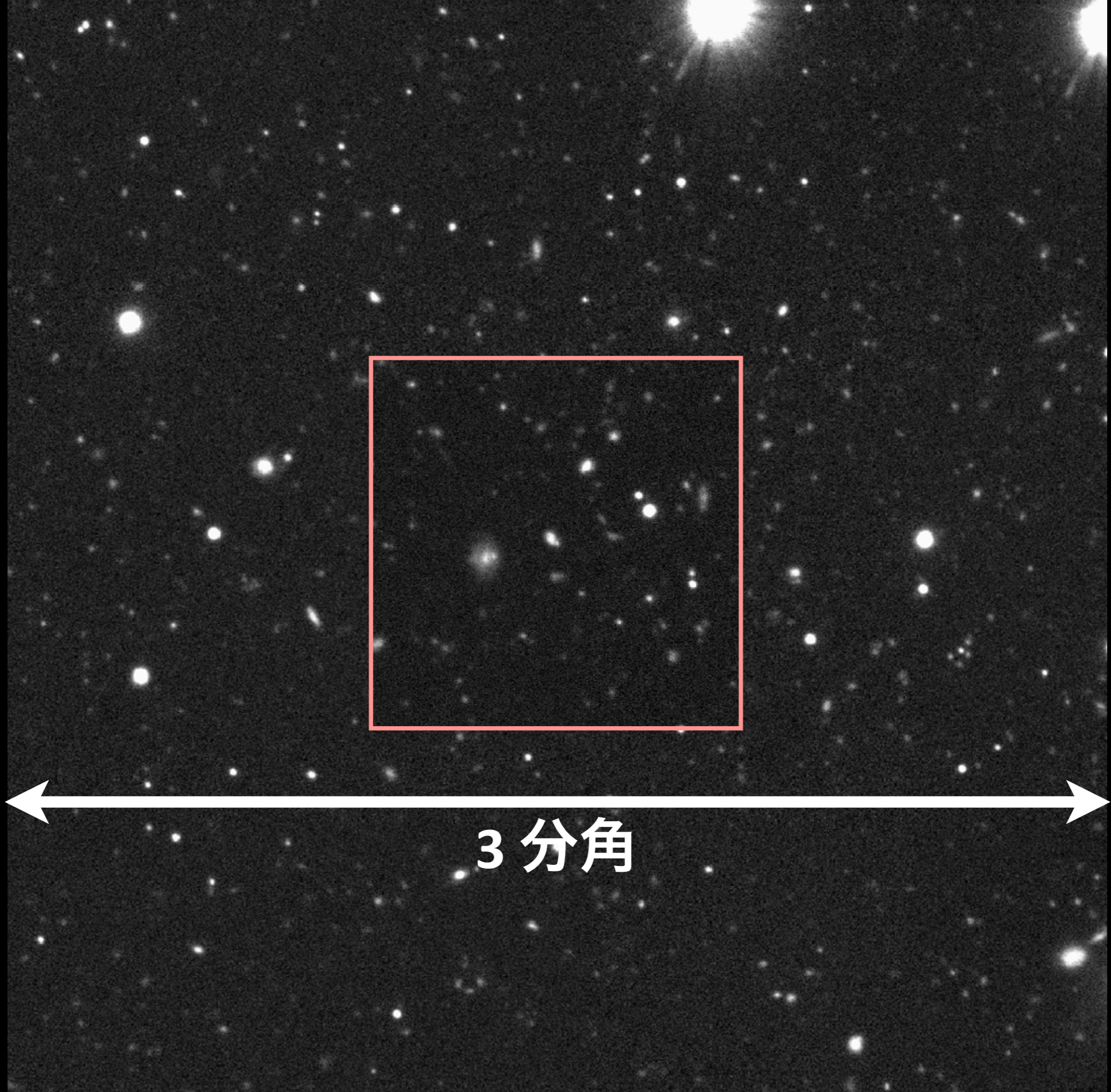
~300,000 天体



0.5 度
(30 分角)



10 分角



3 分角

超新星



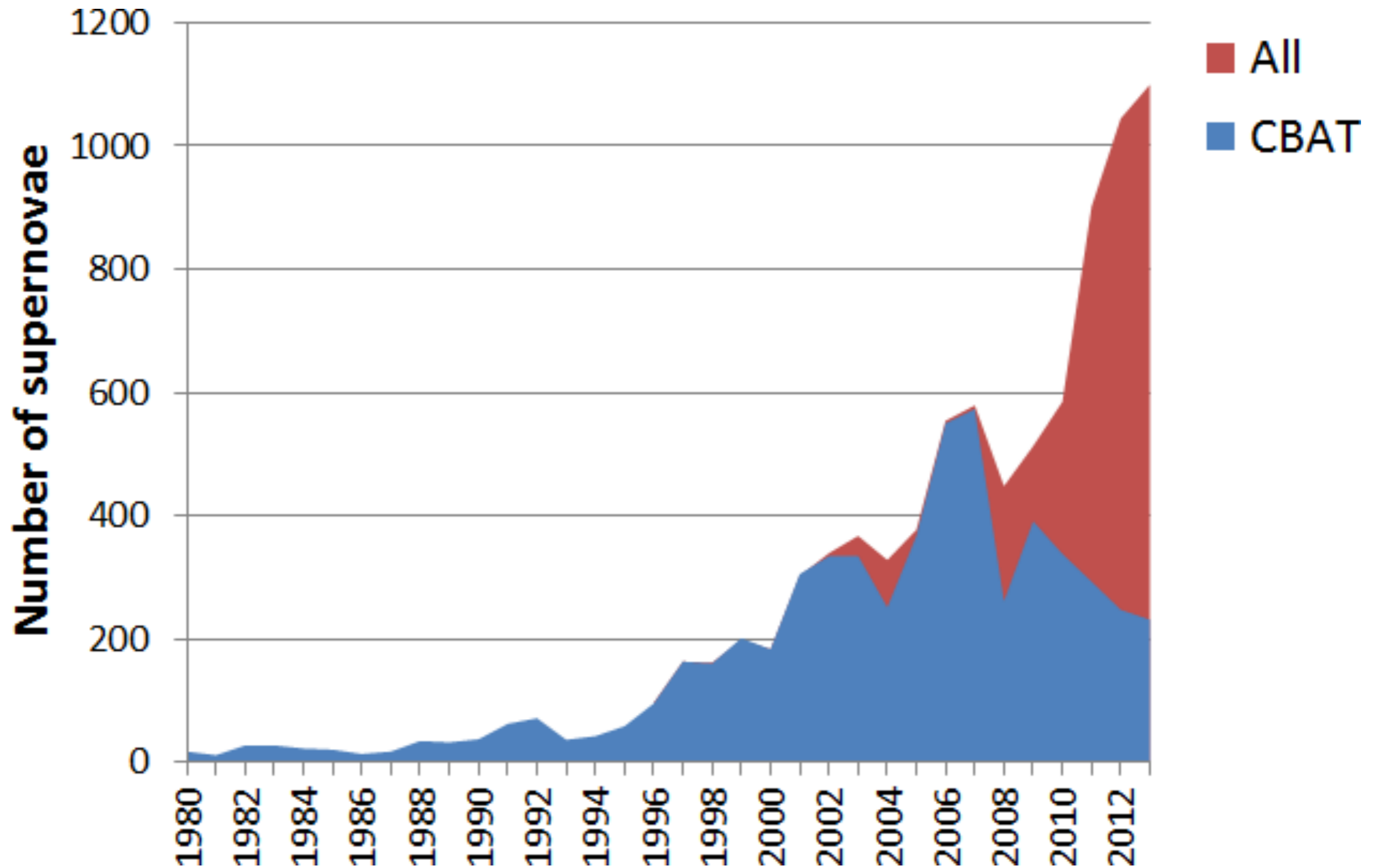
1 分角



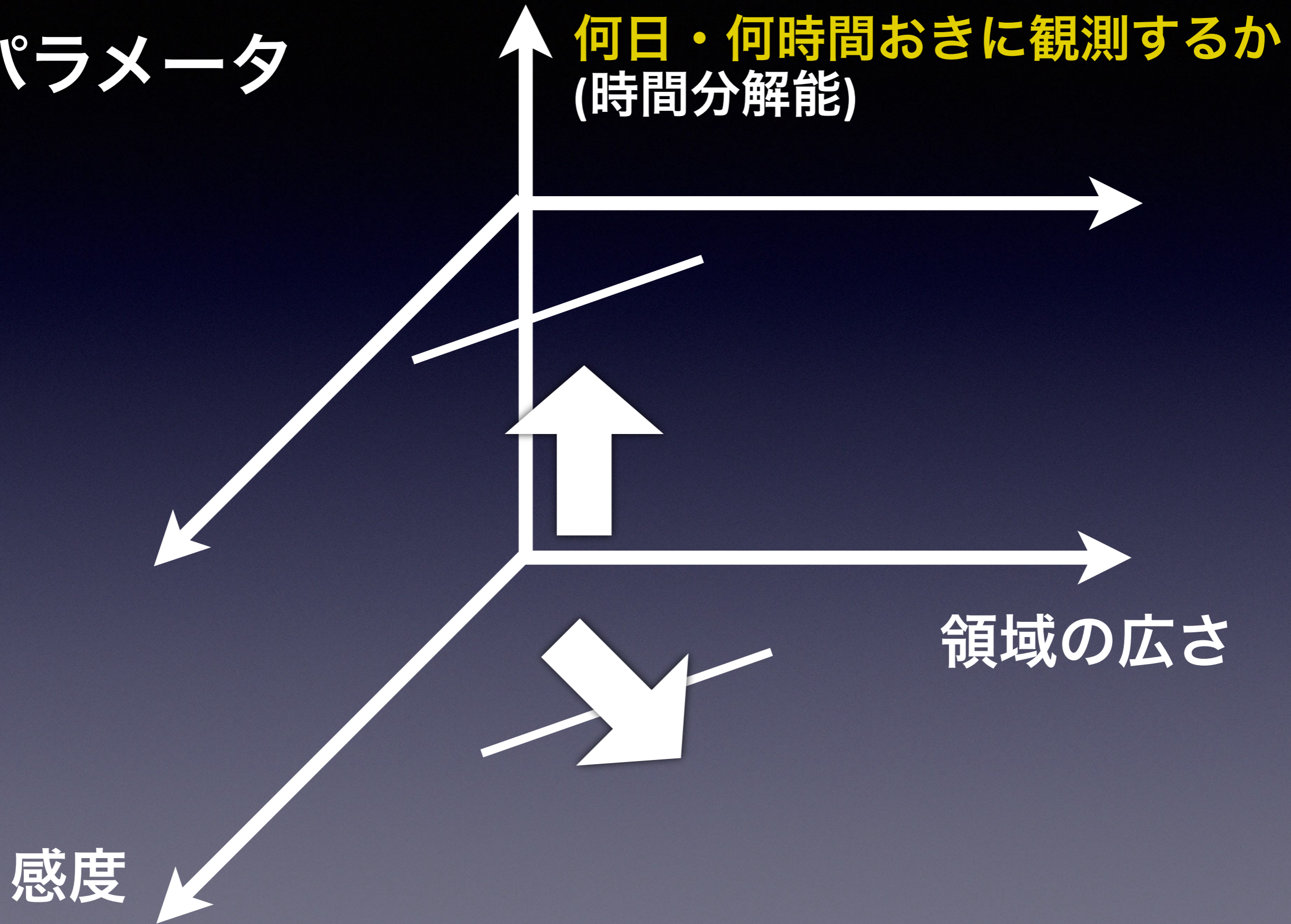
ビフォー

アフター

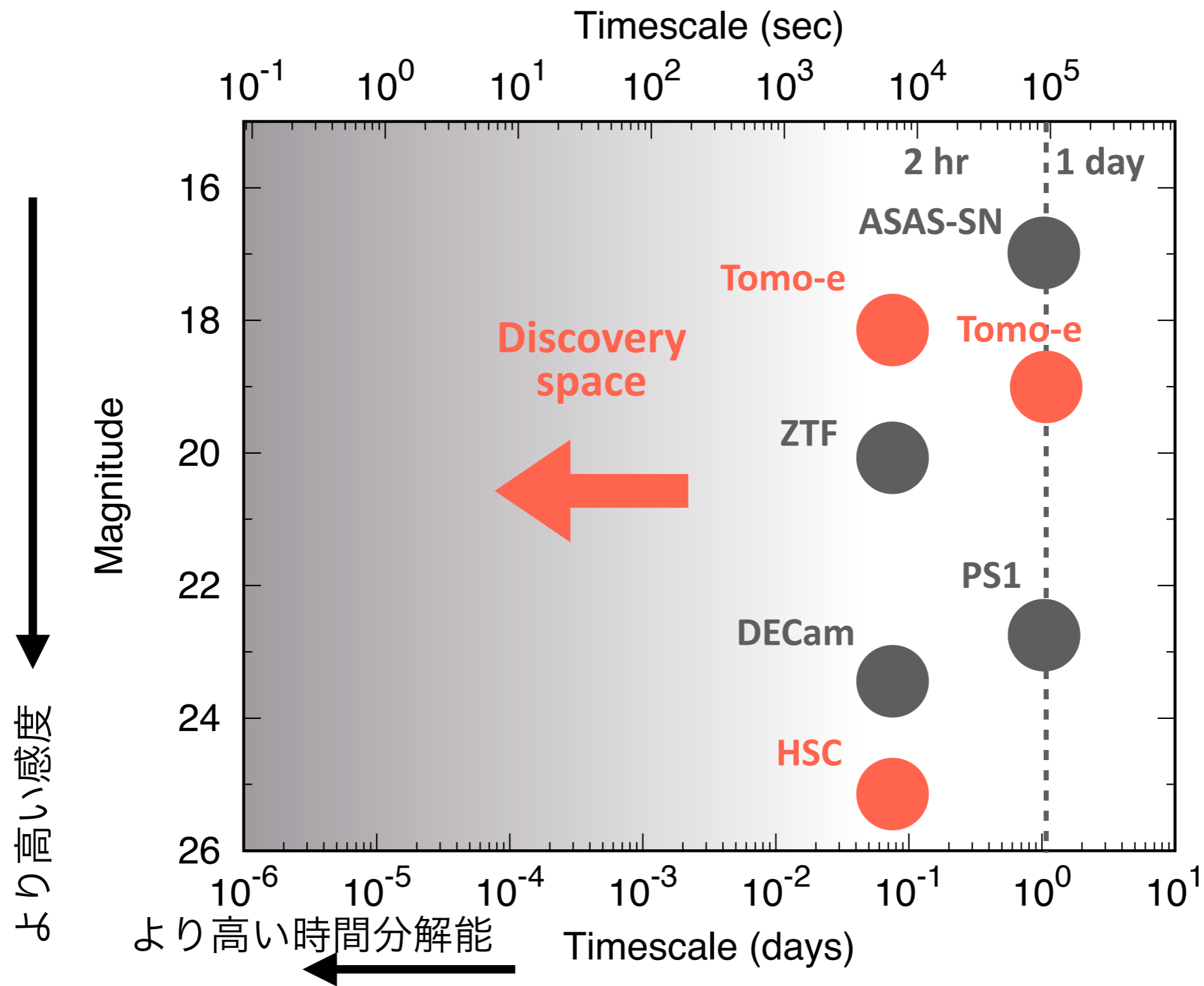
超新星発見の歴史



時間領域天文学の 3パラメータ



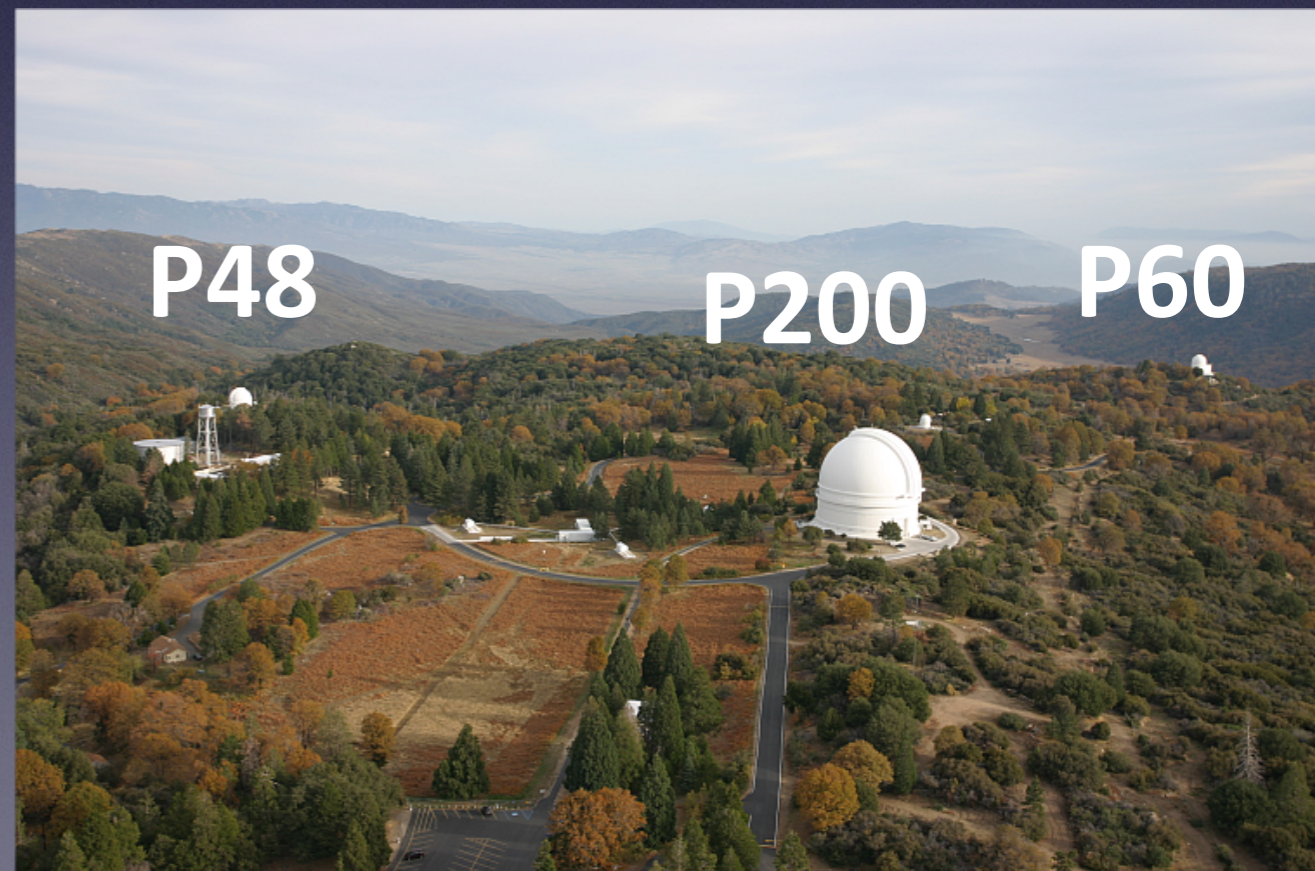
Transient survey (optical/infrared)



Zwicky Transient Facility

2018-

- パロマー 1.2m シュミット望遠鏡 (P48)
@ Palomar/California
- 視野: 47 deg²
- 感度: 20-21 mag
- 即時追観測
1.5m (P60)
5m (P200)



P48 (1.2m)



P200 (1948!) (5m)

C: Bettmann/CORBIS

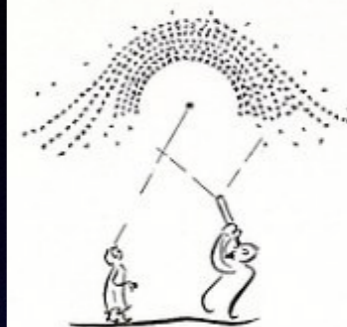


パロマーの巨人望遠鏡

(上)

D. O. ウッドベリー 著

関 正雄・湯澤 博・成相恭二 訳



二十世紀、新時代の天文学の発展は、望遠鏡の進化とともにあった。その基礎を築いたヘール(1868-1938)は、資金・材料集めや技術上の様々な困難を乗り越え、次々と巨大望遠鏡の建設を進めた。本書

には彼の尽力で始められ、アメリカの人材・技術力を結集して作られたパロマーの二百インチ望遠鏡の物語が記される。(全2冊)



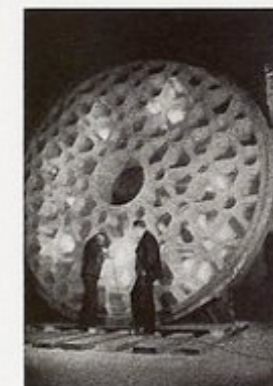
青 942-1
岩波文庫

パロマーの巨人望遠鏡

(下)

D. O. ウッドベリー 著

関 正雄・湯澤 博・成相恭二 訳



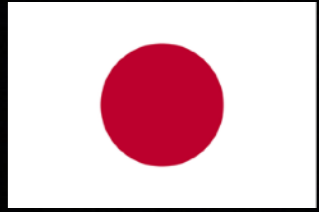
200インチ望遠鏡の計画がはじまって6年、心配された反射鏡の巨大ガラス盤もようやく出来、ヘールを中心に巨人望遠鏡建設の準備は着実に進められる。しかし、建設地の選択、ガラス盤の輸送、望遠鏡の取り付けなど、残された課題は多く、科学者、技術者をはじめとするひとびとの努力は並み大抵のものではなかった。(全2冊)



青 942-2
岩波文庫

Tomoe

2019-



<http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/tomoe/index.html>

東京大学 木曾観測所 1mシュミット望遠鏡@長野県

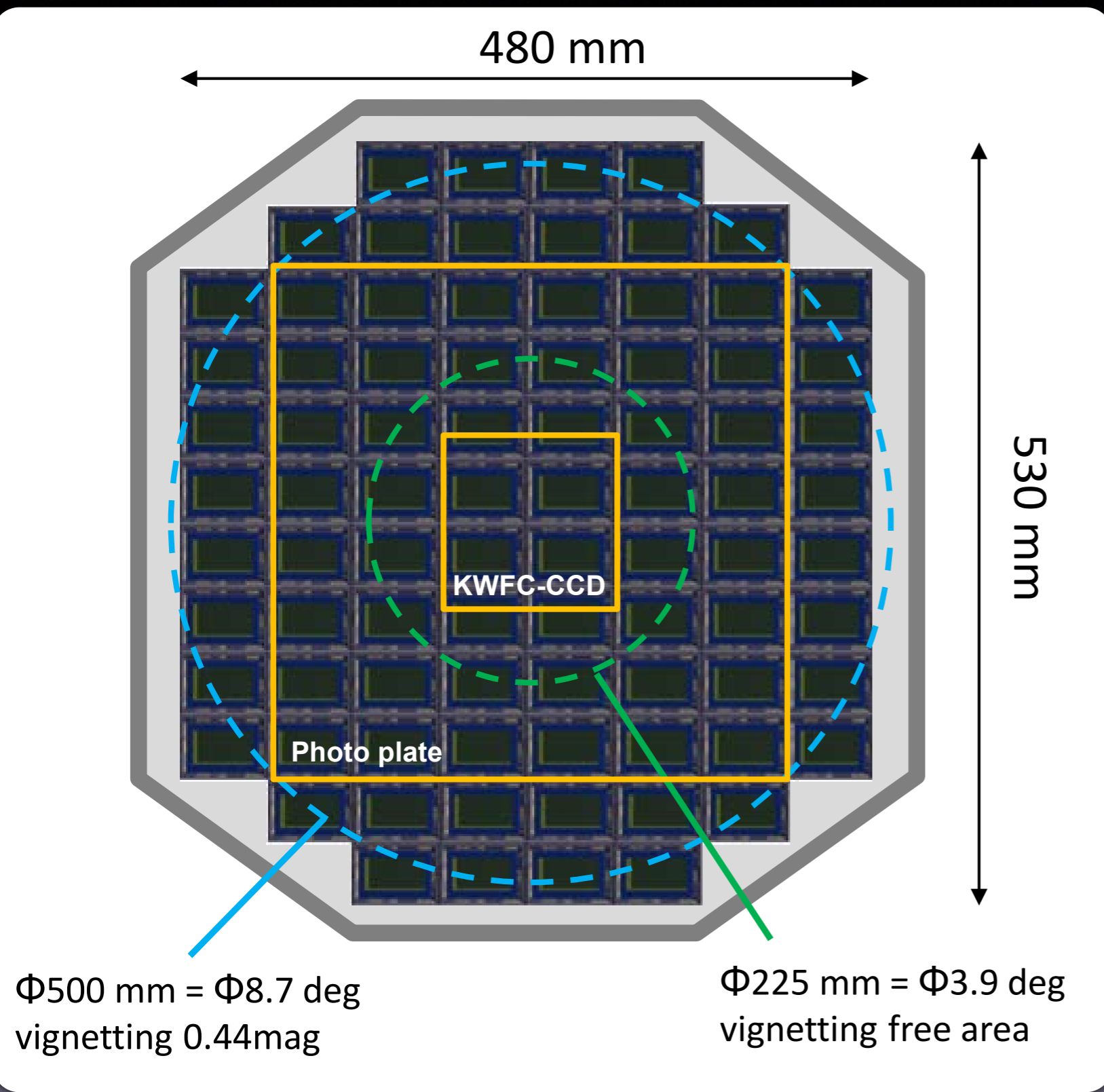
CMOSセンサーを使った広視野カメラ
視野: 4 deg² (CCD) => **20 deg² (CMOS)**

Kiso 1.05m Schmidt telescope

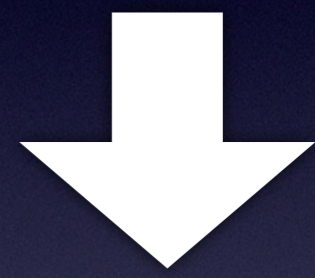


巴御前出陣図
(東京国立博物館)



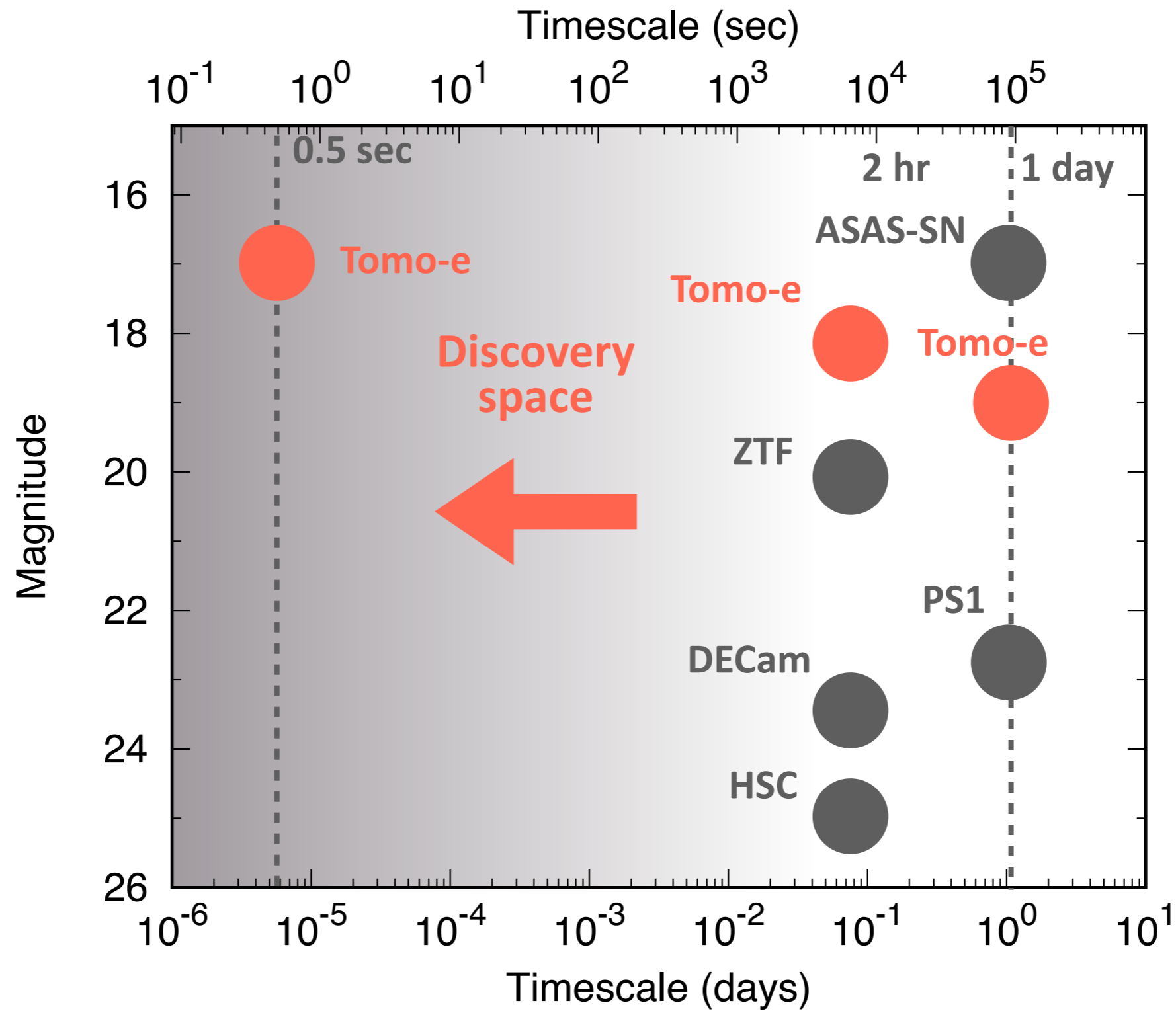


- 冷却の必要がない
- 読み出しが早い



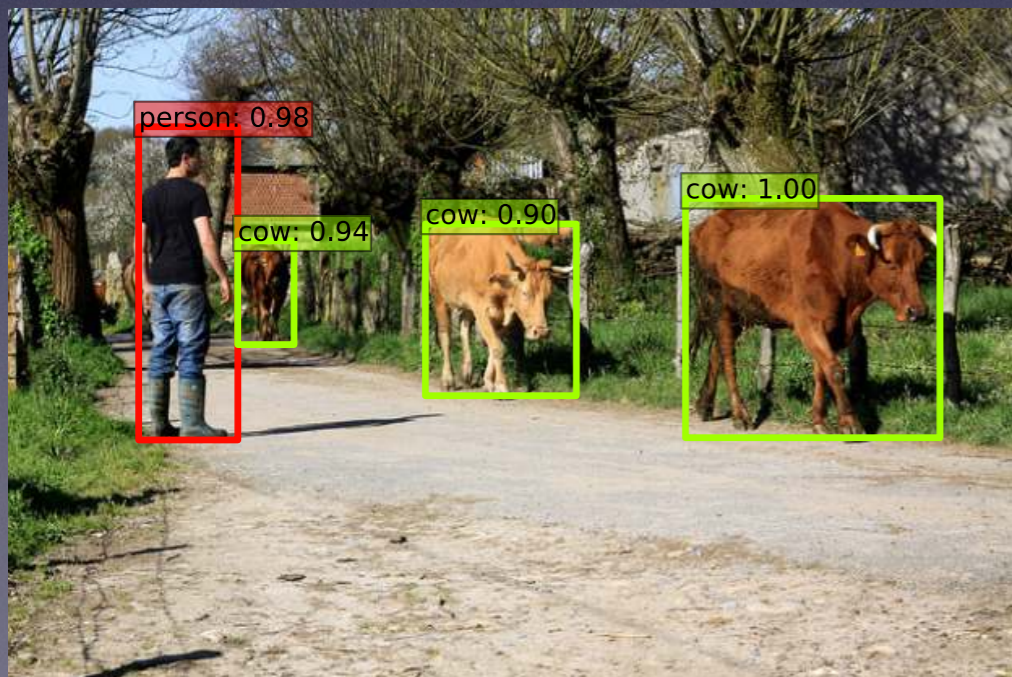
- 広視野 (20 deg²)
- 高効率観測

未知の時間領域へ

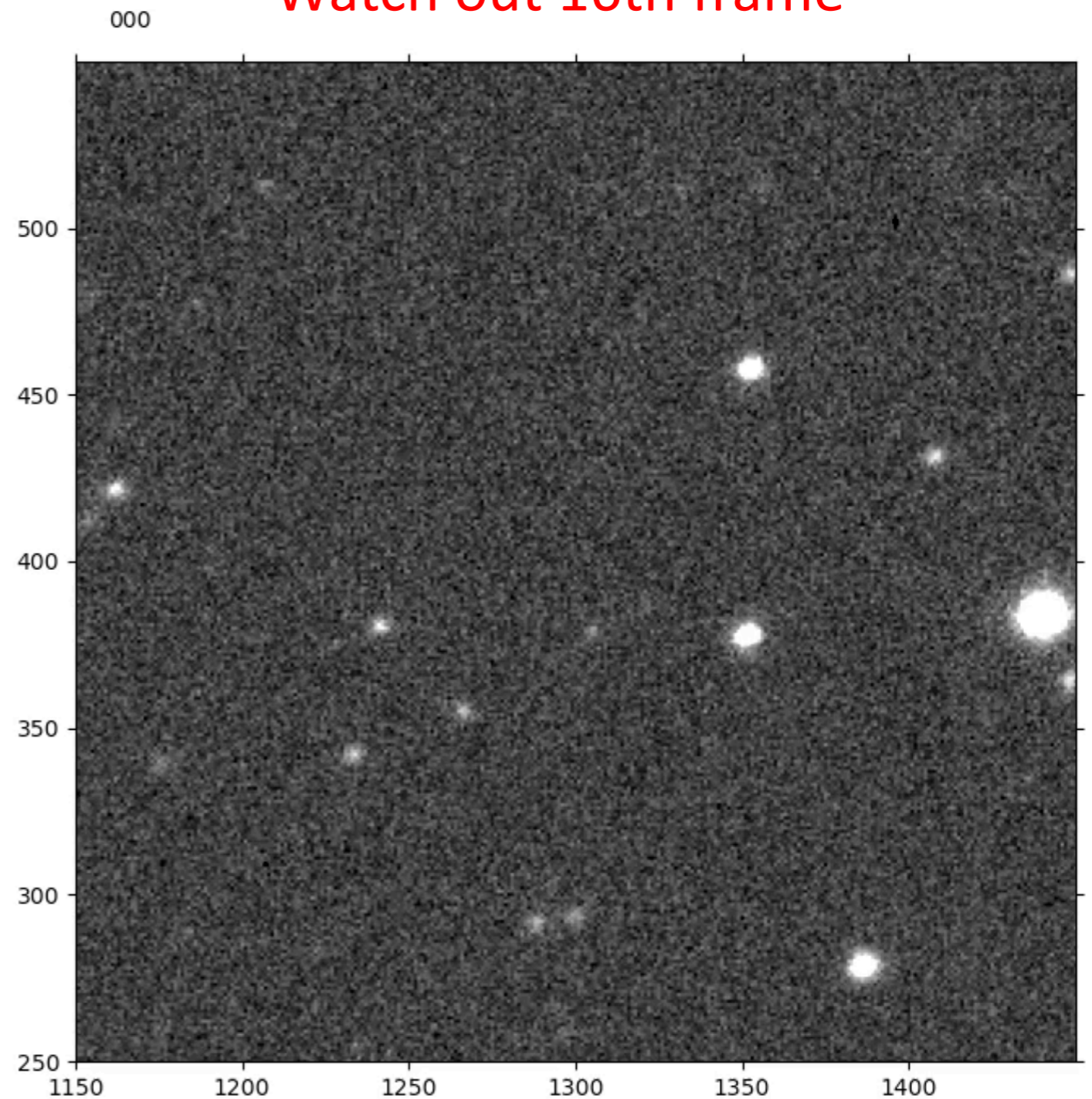


宇宙の「動画」

Application of
object recognition technique
(Single Shot Multibox detector
= SSD, arXiv:1512.02325)



Watch out 16th frame



時間軸天文学：まとめ

● 時間軸天文学の対象

- 変化のタイムスケール<人間のタイムスケール
- 例：変光星、変動天体、突発天体

● 時間軸天文学の3パラメータ

- 広さ、深さ、時間分解能

● 時間軸天文学のフロンティア

- 数時間分解能、全天監視
8m級望遠鏡の深宇宙突発天体探査、、、
(小さい望遠鏡でも最先端のサイエンスができる)
- ビッグデータの時代突入

Section 14.

時間領域天文学と

マルチメッセンジャー天文学

14.1 時間領域天文学

14.2 マルチメッセンジャー天文学

14.3 中性子星合体の

マルチメッセンジャー観測

宇宙からの様々なシグナル

電磁波

荷電粒子の加速度運動

原子核、原子、分子のエネルギーの遷移

ニュートリノ

原子核反応

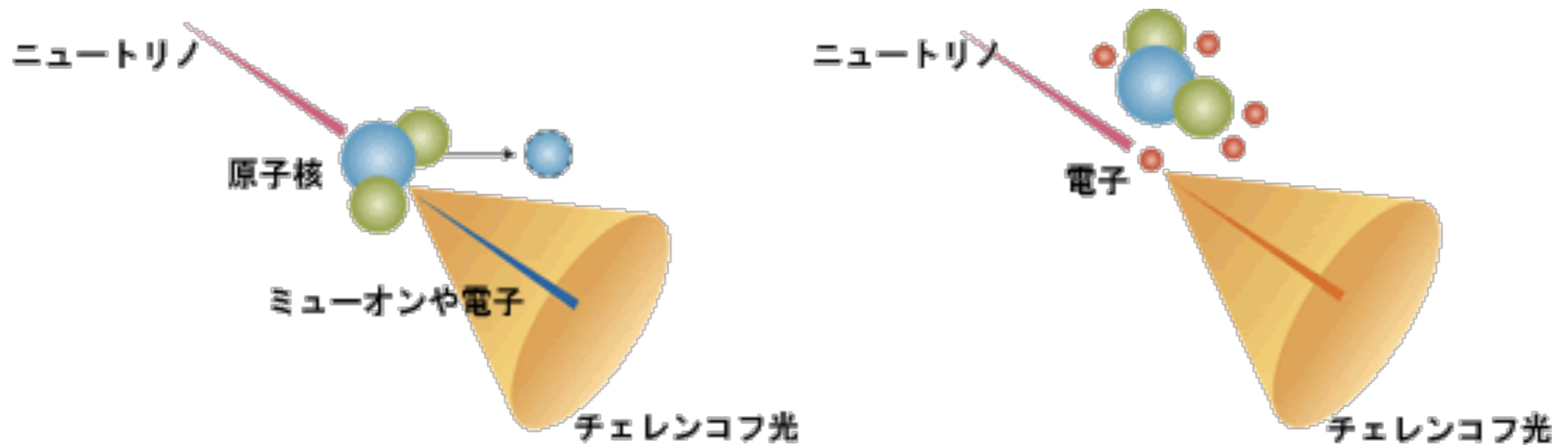
高温物質 (熱ニュートリノ)

重力波

重力の強い天体の激しい運動

ニュートリノ

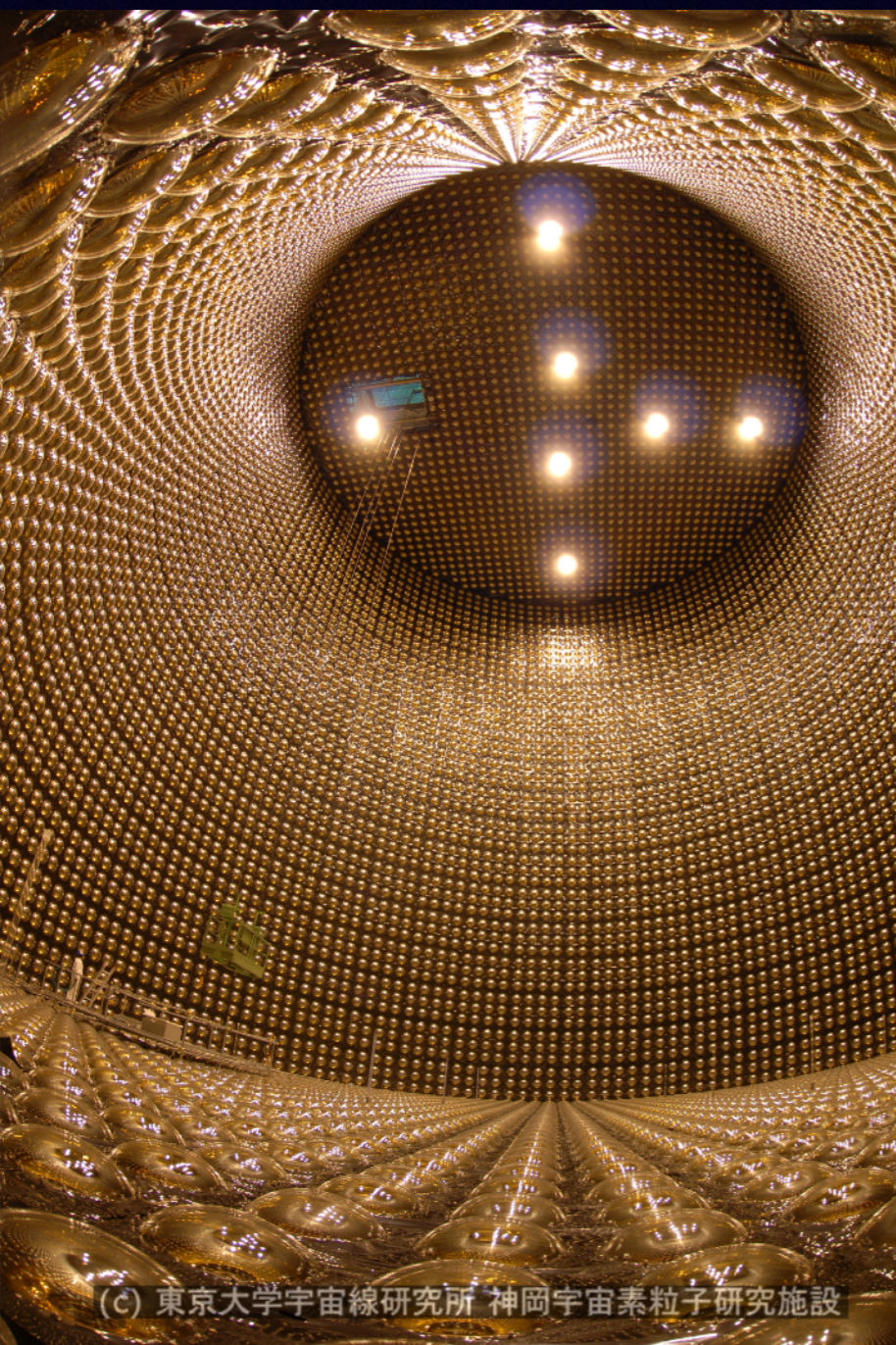
ニュートリノの検出原理



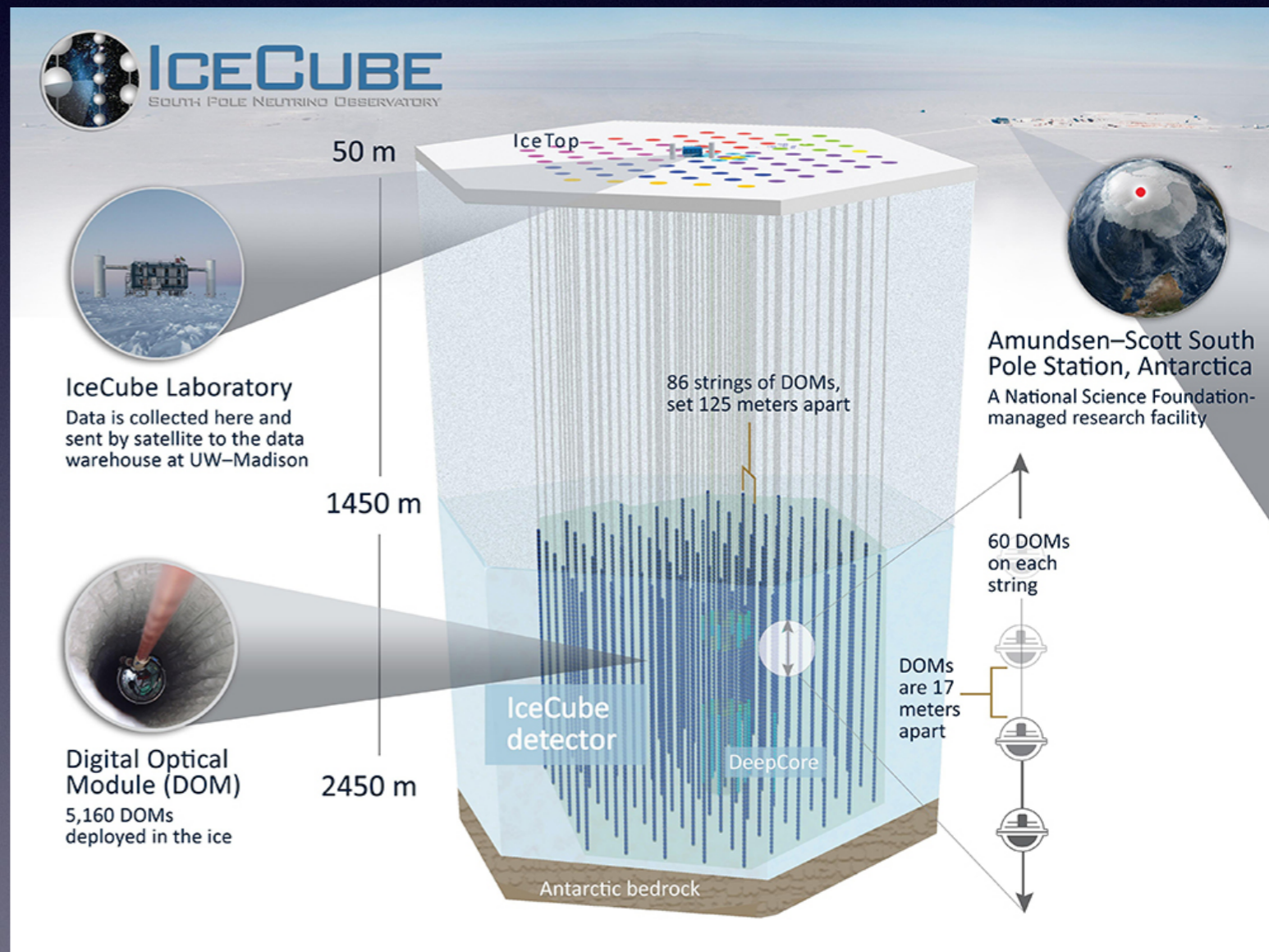
ニュートリノが叩き出した荷電粒子が走ることによってチェレンコフ光が発生します。

ニュートリノ検出装置

スーパーカミオカンデ



IceCube

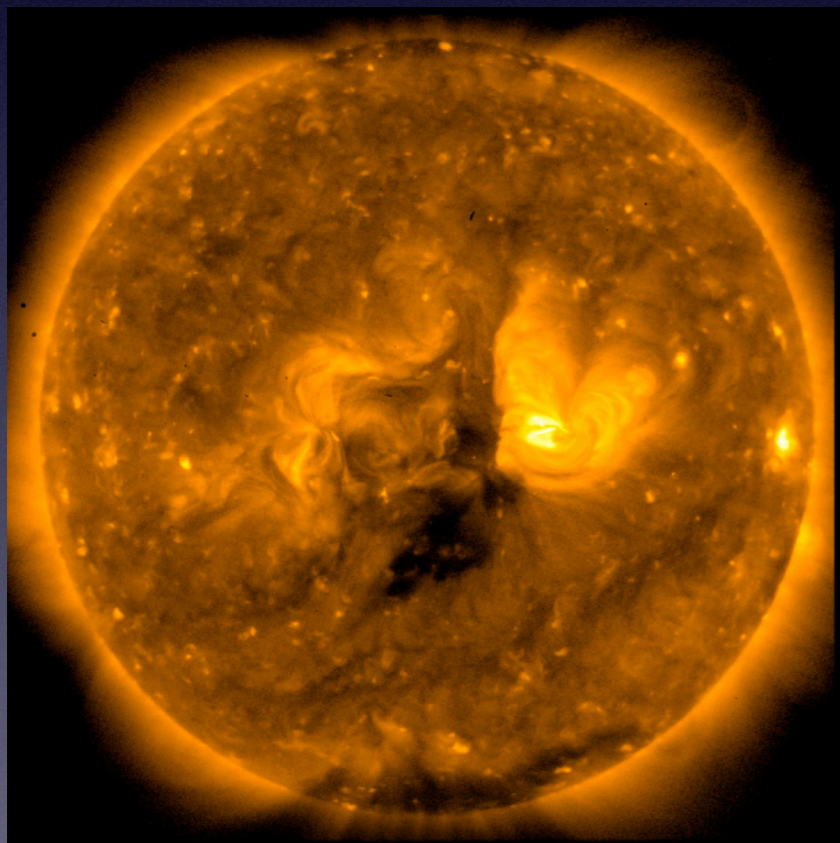


<http://www.icehap.chiba-u.jp/icecube/index.html>

太陽

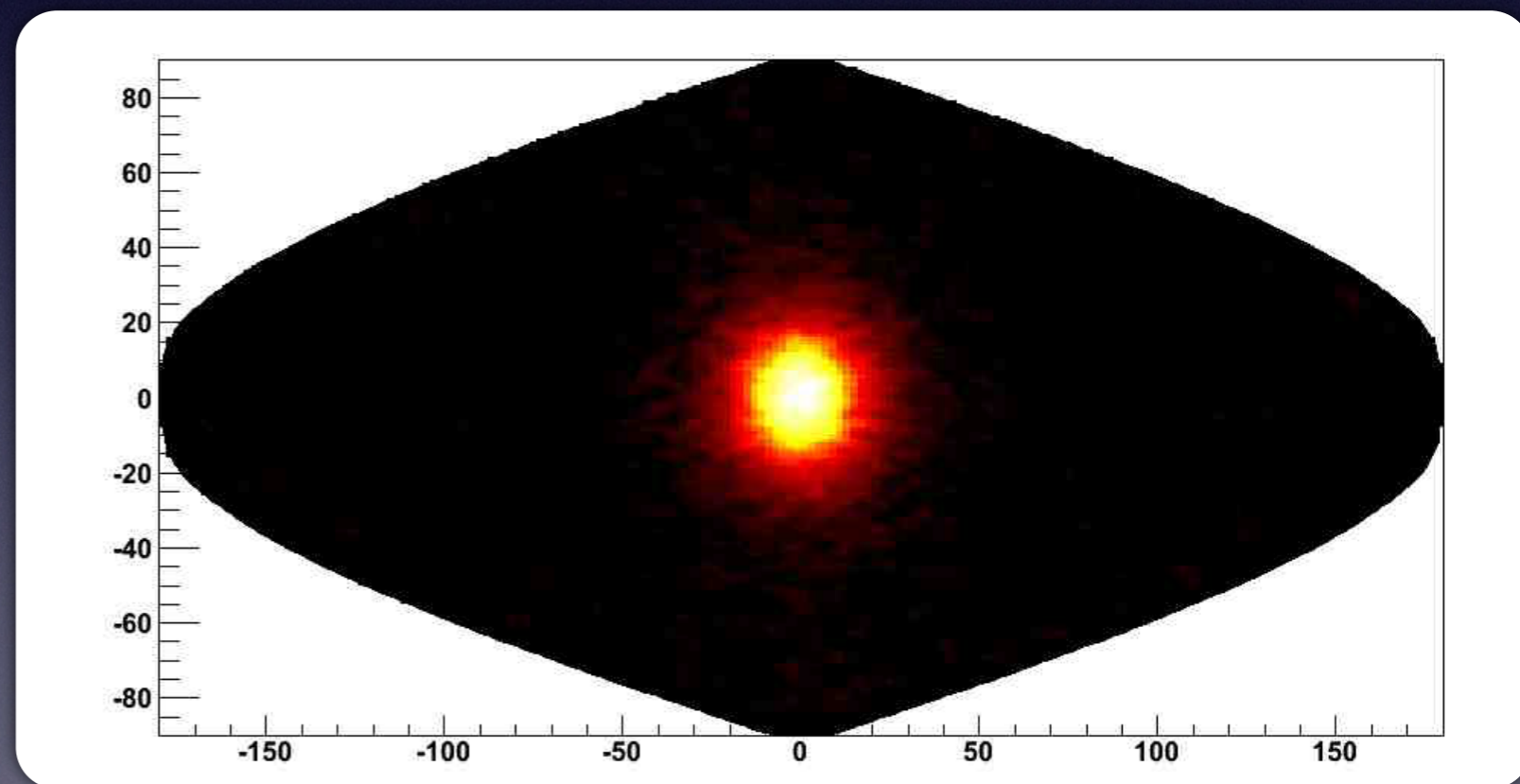
$1.5 \times 10^{11} \text{ m} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$

電磁波



黒体放射

ニュートリノ



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/sk/solar-e.html>

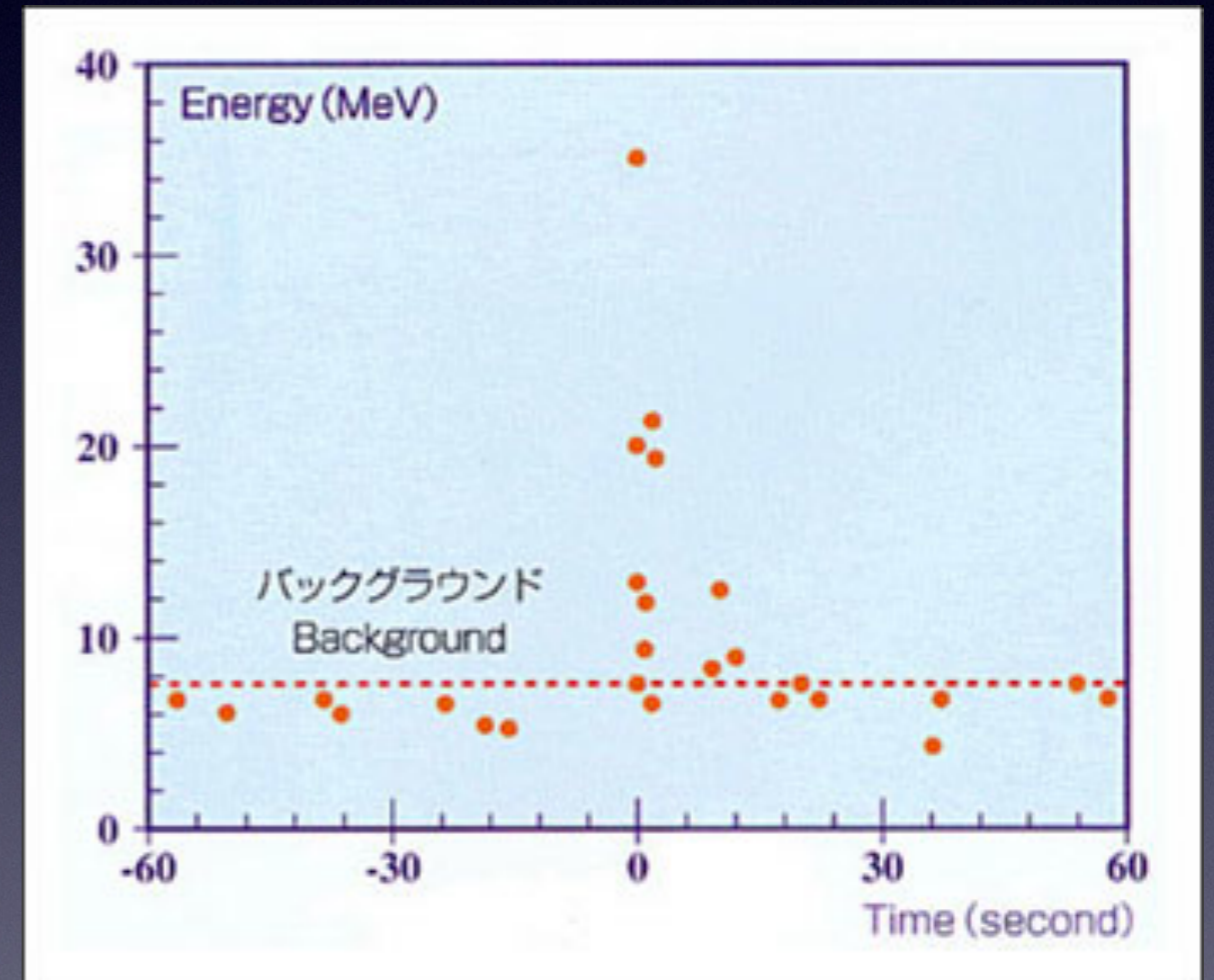
$E \sim 1 \text{ MeV}$ (原子核反応)

超新星爆発

50 kpc ~ 15万光年 ~ 1.5×10^{21} m

電磁波

ニュートリノ



黒体放射

$E \sim 10$ MeV (高温物質)

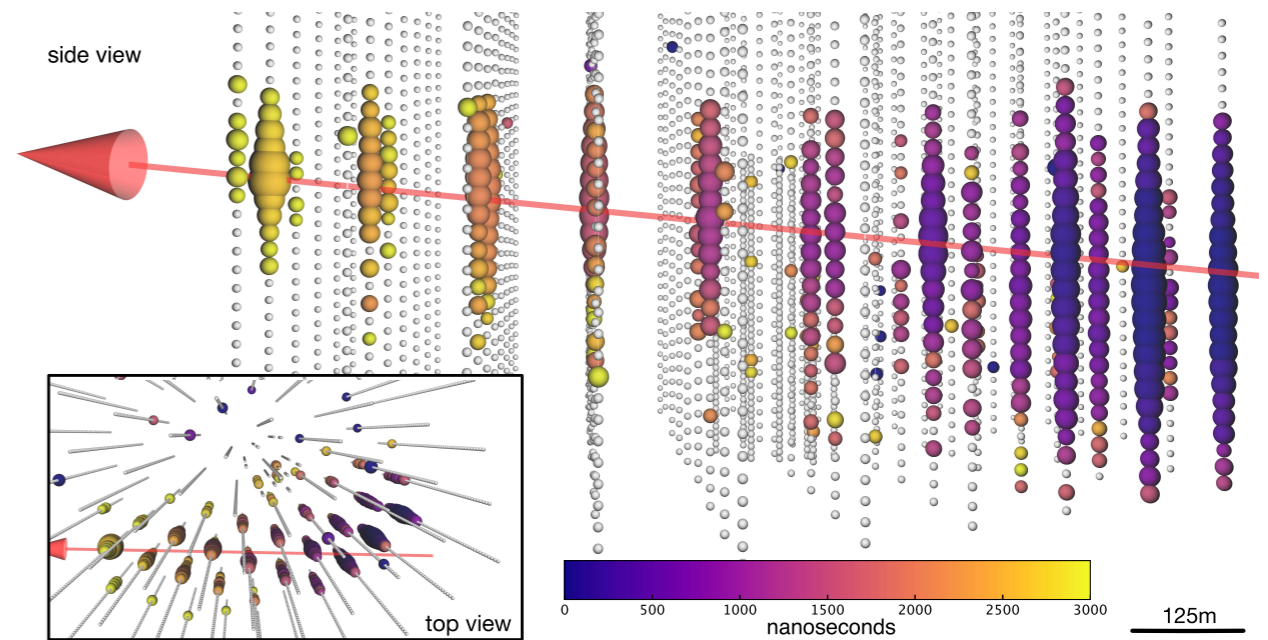
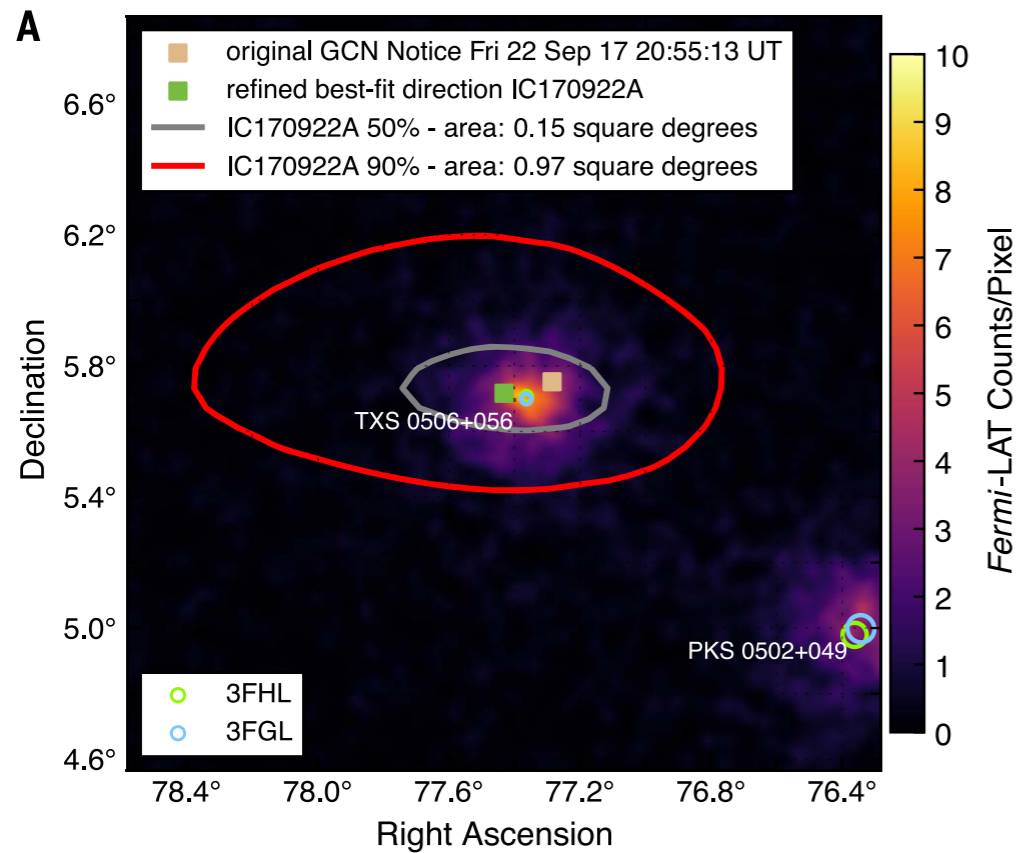
高エネルギーニュートリノ天体

ブレーザー TXS 0506+056

40 億光年 $\sim 4 \times 10^{25}$ m

電磁波

ニュートリノ



The IceCube collaboration+ 2018

シンクロトロン放射など

$E \sim 300$ TeV (高エネルギー宇宙線)

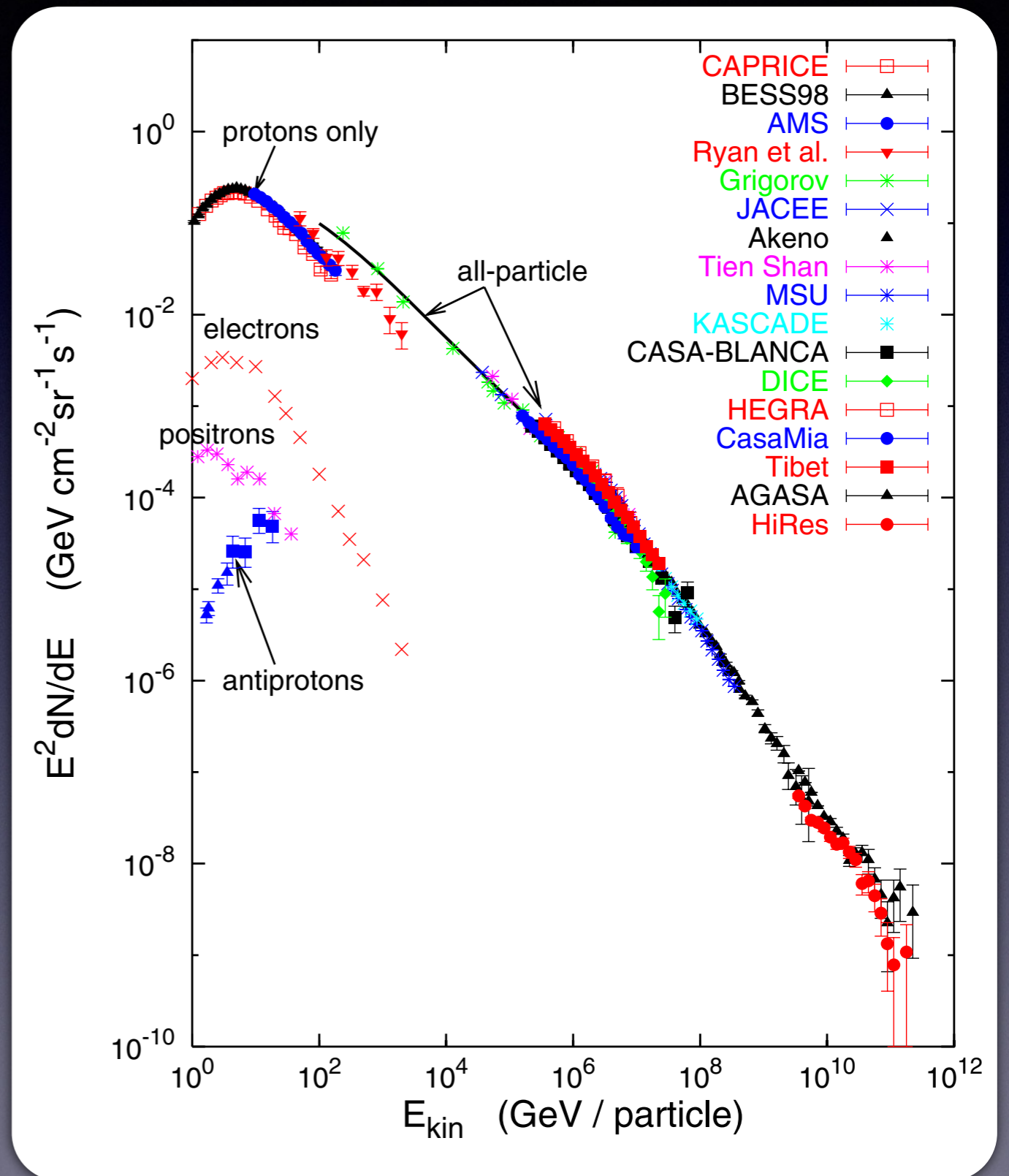
宇宙を飛び交う「宇宙線」

Gaisser 2006

1粒子が 10^{20} eV ~ 10 J

時速100 kmの
野球のボールと
同じぐらいのエネルギー！

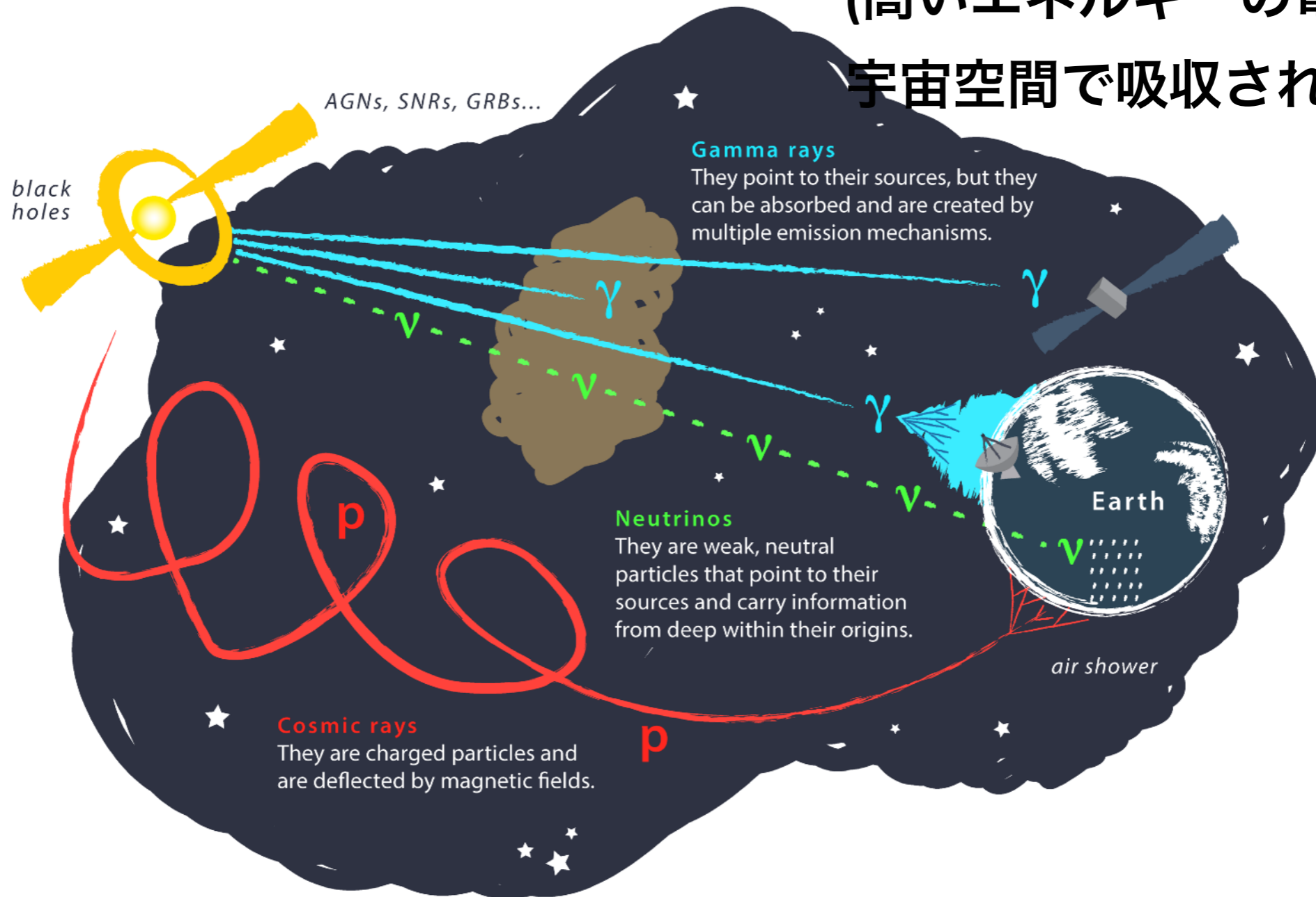
宇宙のどこで
できているのか？
未解明の大問題



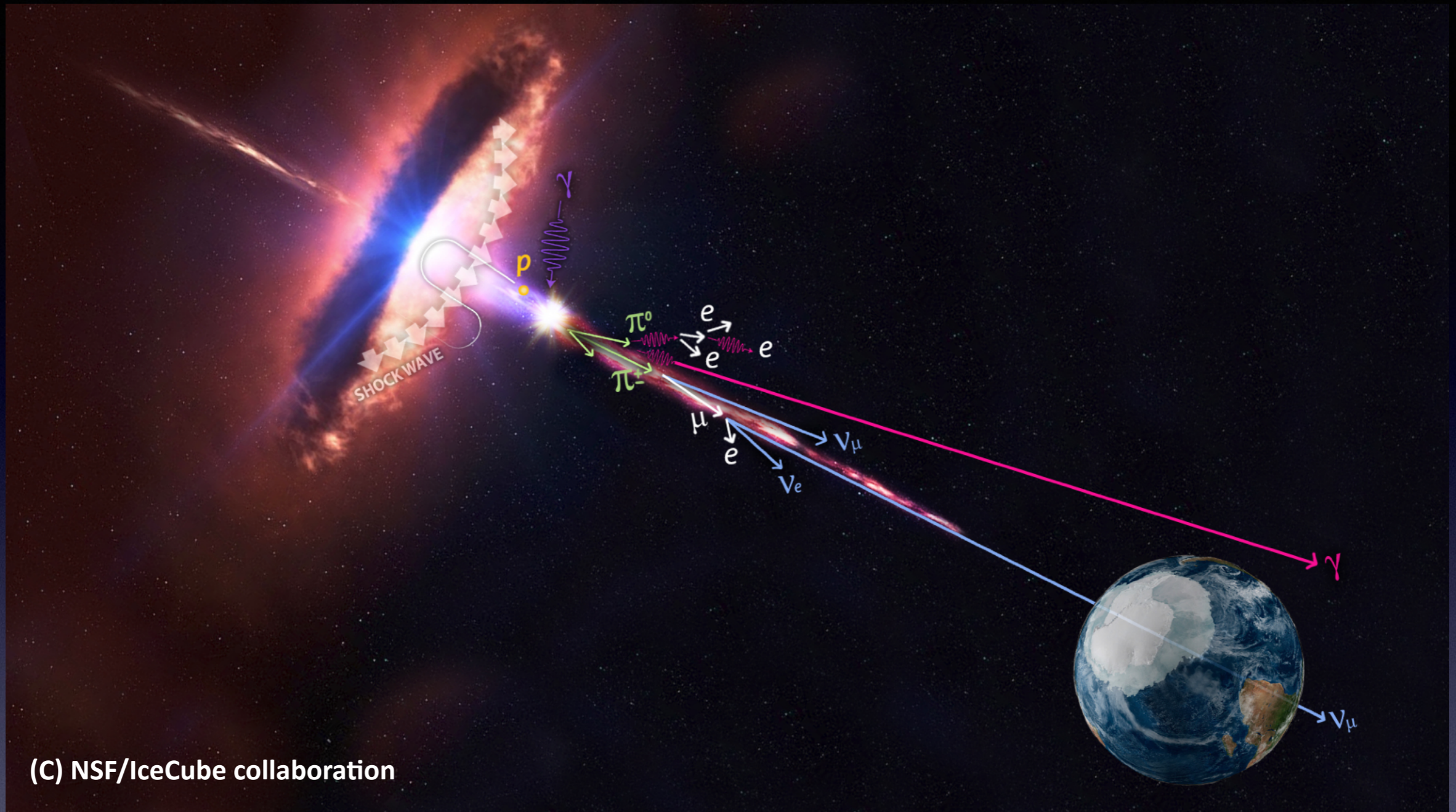
ニュートリノ = 天体を同定するもっとも有効なメッセンジャー

電磁波

(高いエネルギーの電磁波は宇宙空間で吸収されてしまう)



宇宙線 (磁場で曲がってしまう)



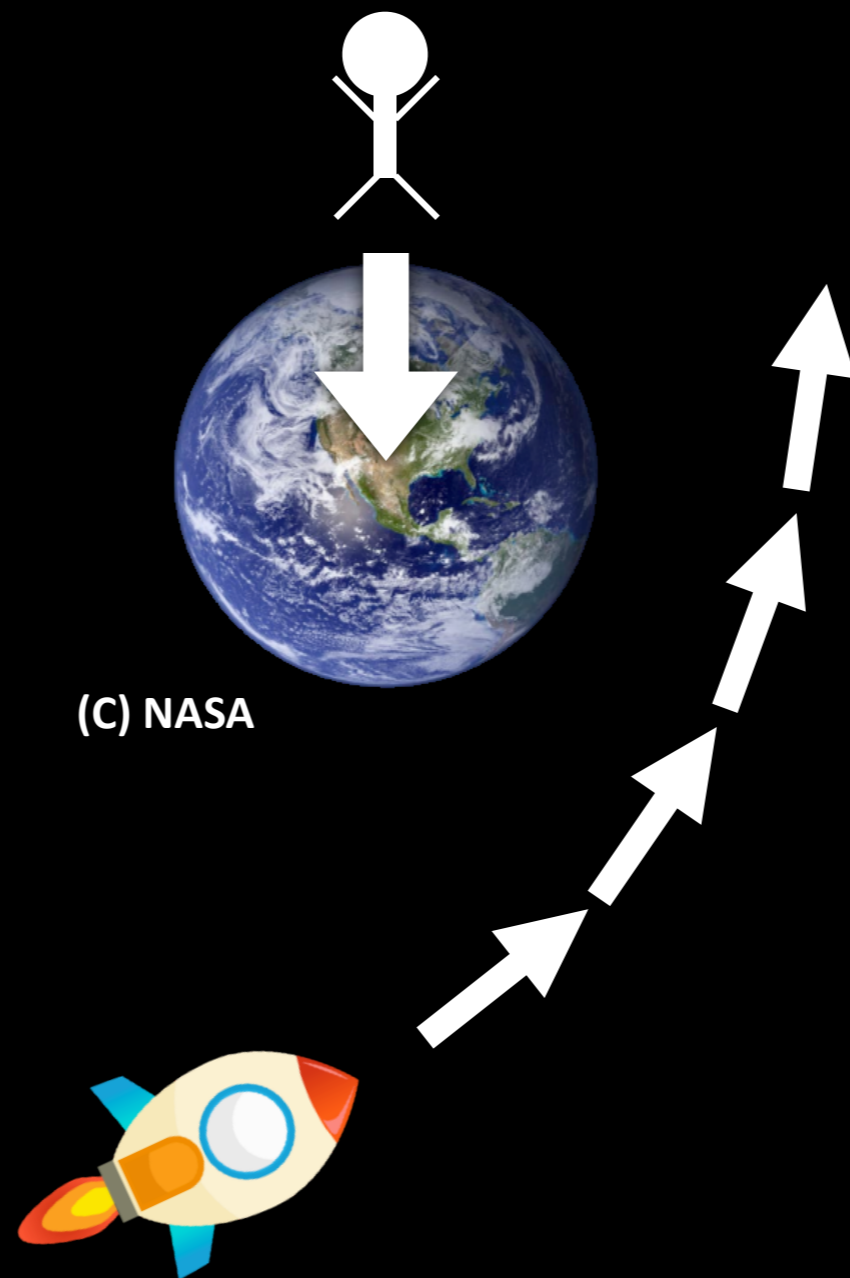
高エネルギーニュートリノ天体の同定

=> 宇宙を飛び交う

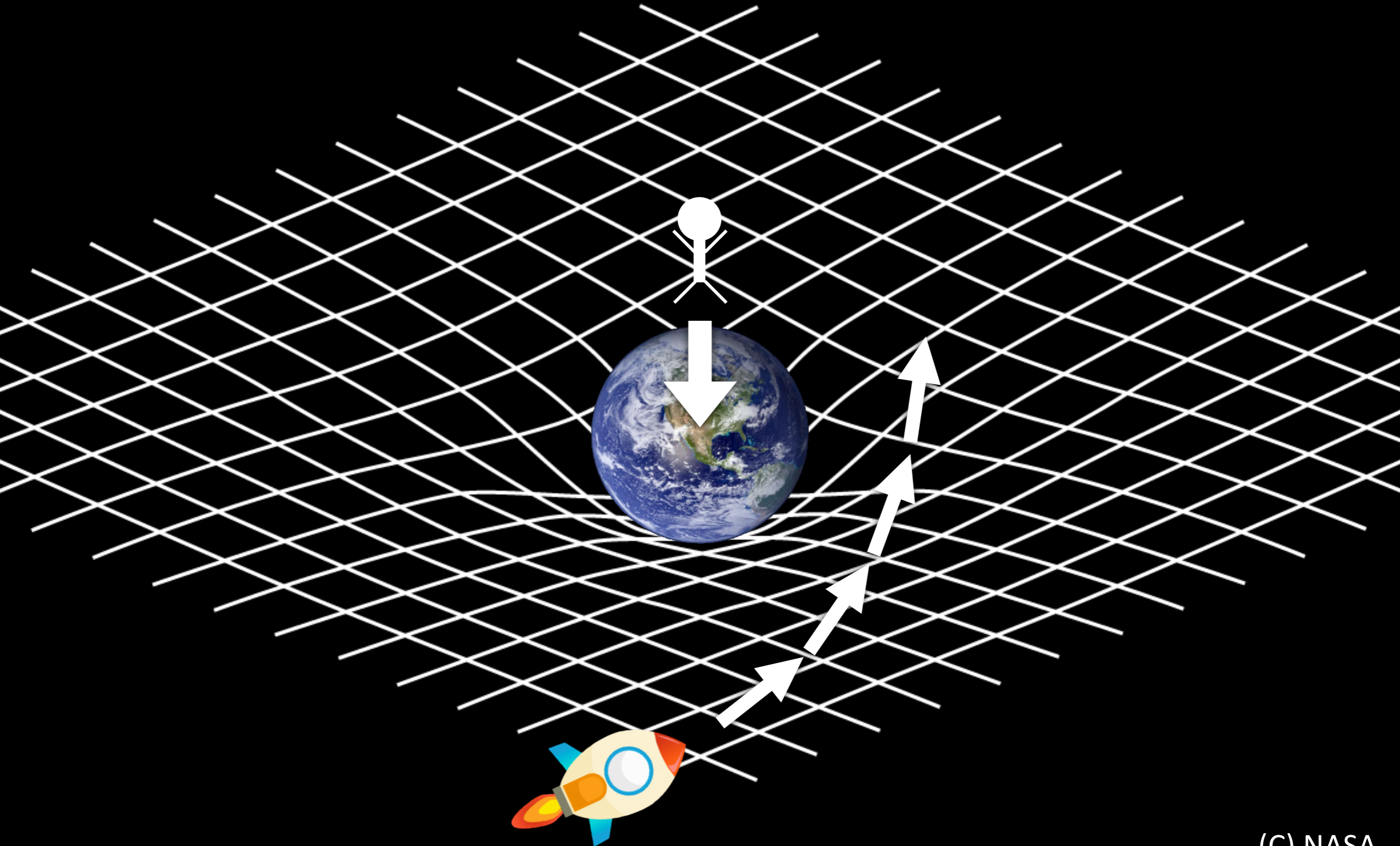
高エネルギー粒子(宇宙線)の起源

重力波

重力

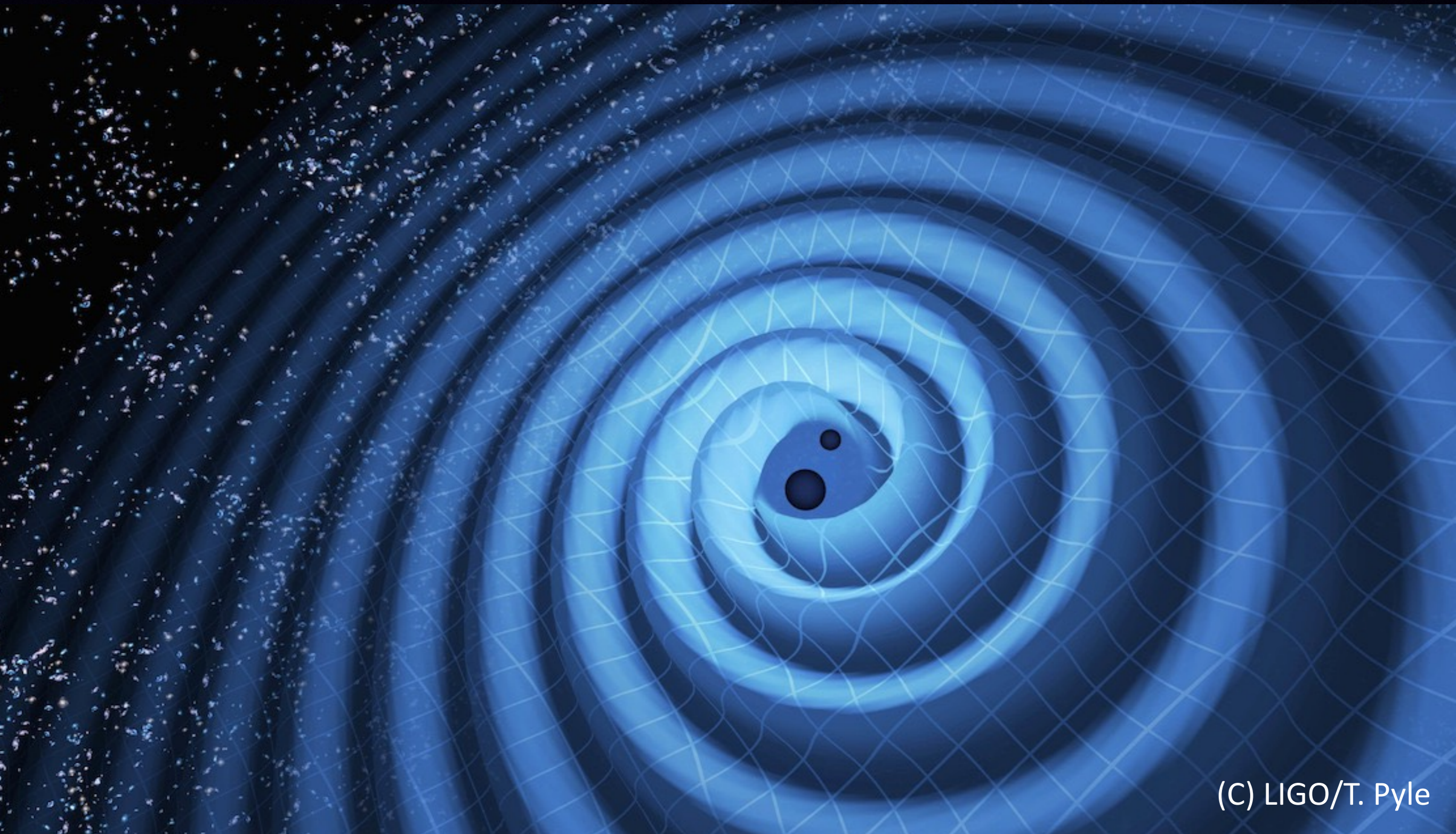


重力：時空のゆがみ



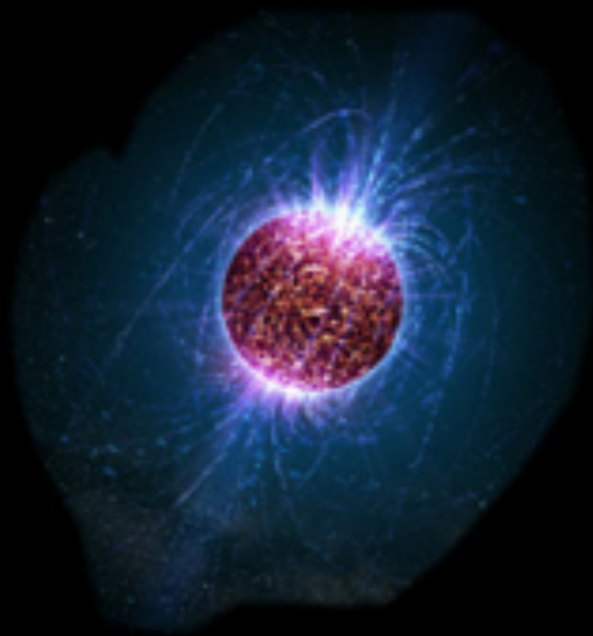
重力波：時空のゆがみの伝播

重力の強い天体が激しく動き回ると、強い重力波が発生



宇宙の二大「強重力天体」

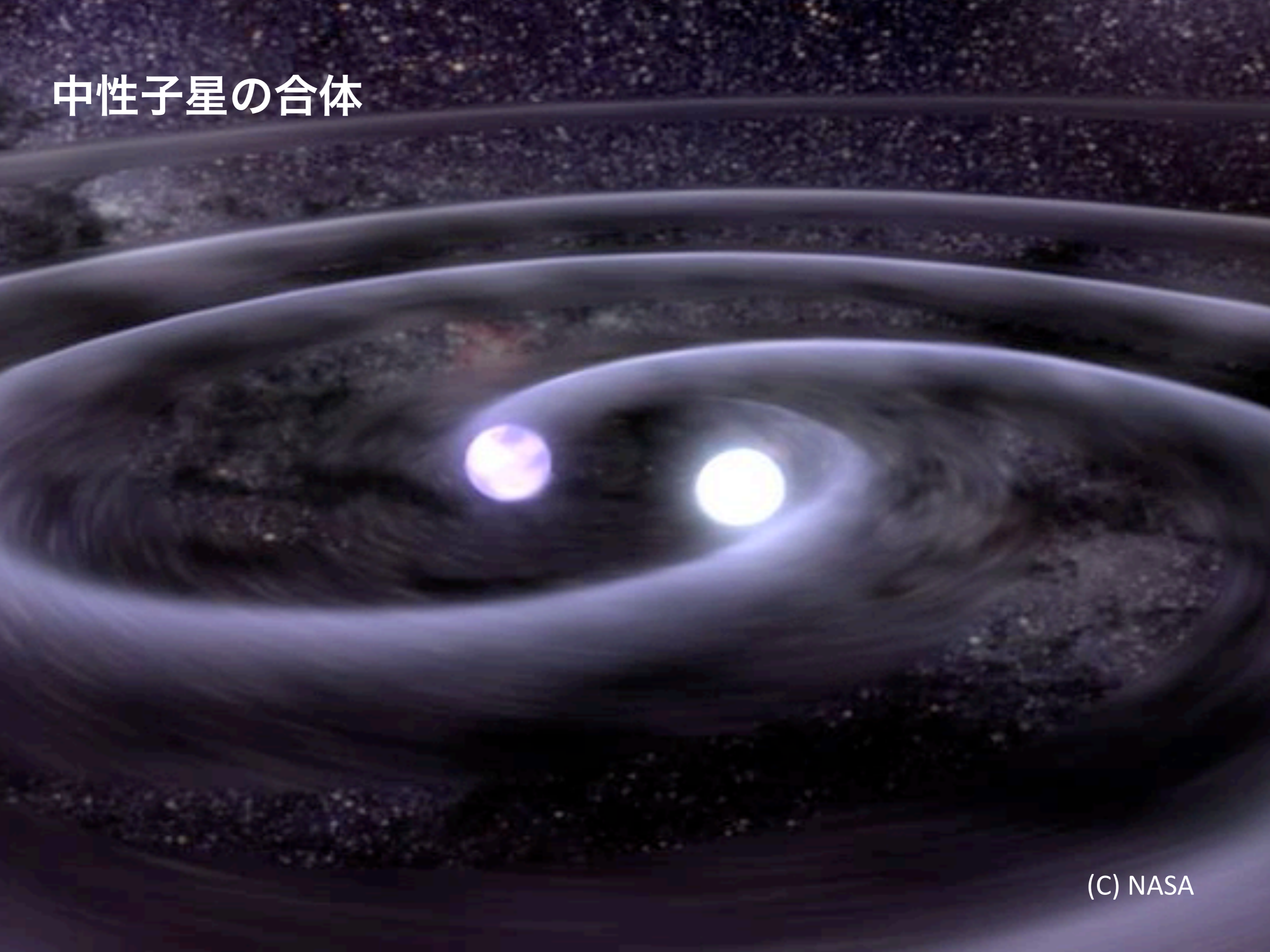
中性子星



ブラックホール



中性子星の合体



重力波検出装置

Advanced Virgo
(ヨーロッパ、2017-)



(C) Virgo

Advanced LIGO
(アメリカ、2015-)

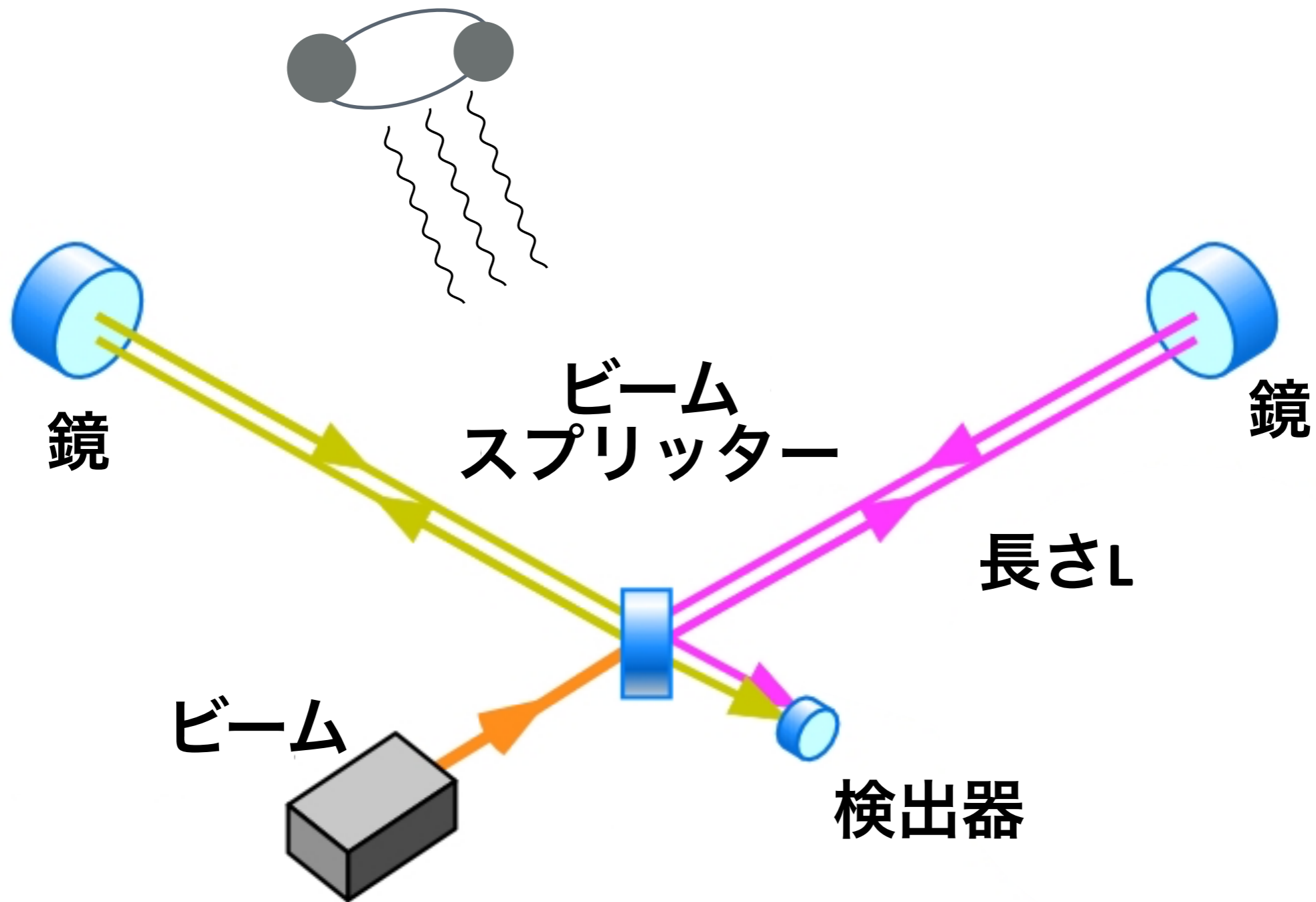


(C) LIGO

KAGRA (日本)

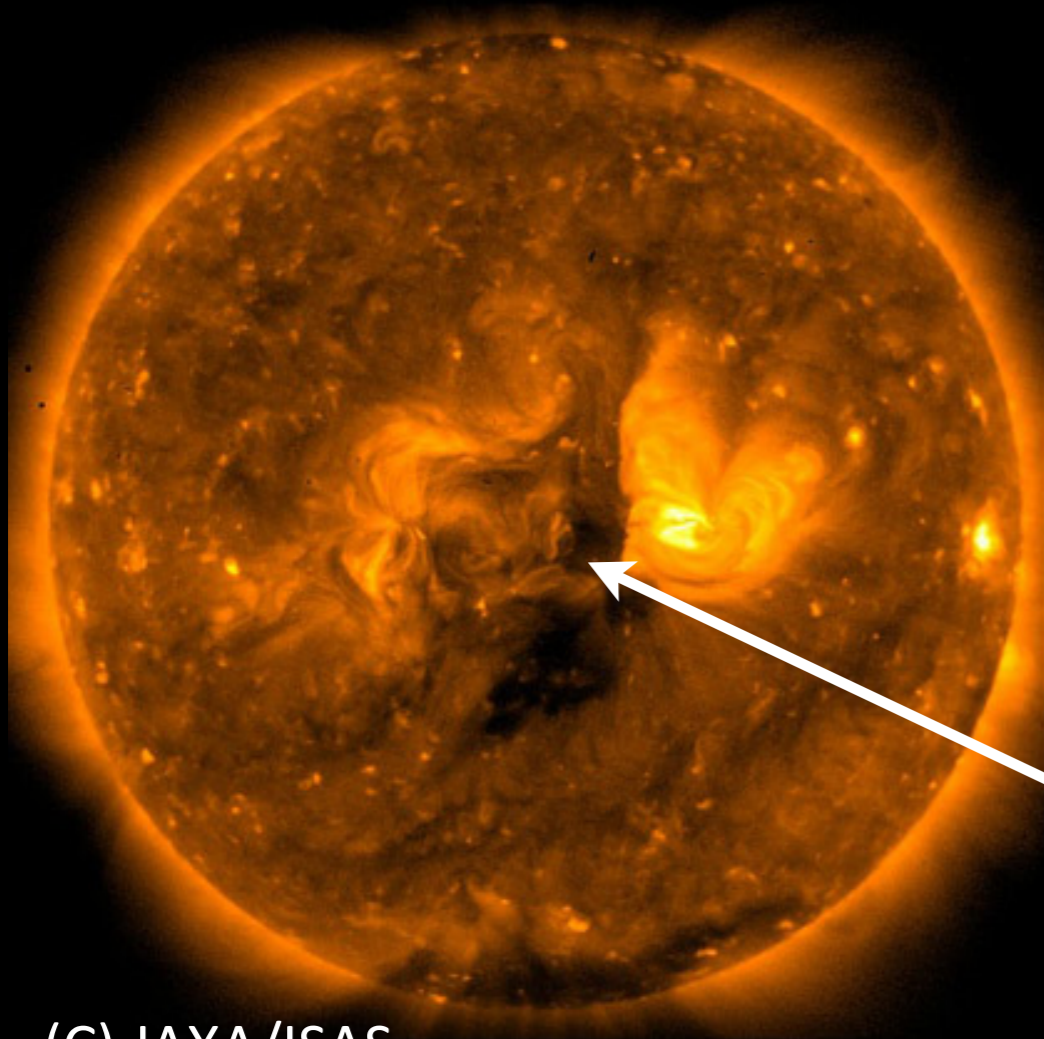


(C) KAGRA



(C) 東京大学 宇宙線研究所

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>



(C) JAXA/ISAS

1億5000万km
(1.5×10^{11} m)



(C) NASA

水素原子1つ 1A (= 0.1 nm = 10^{-10} m)

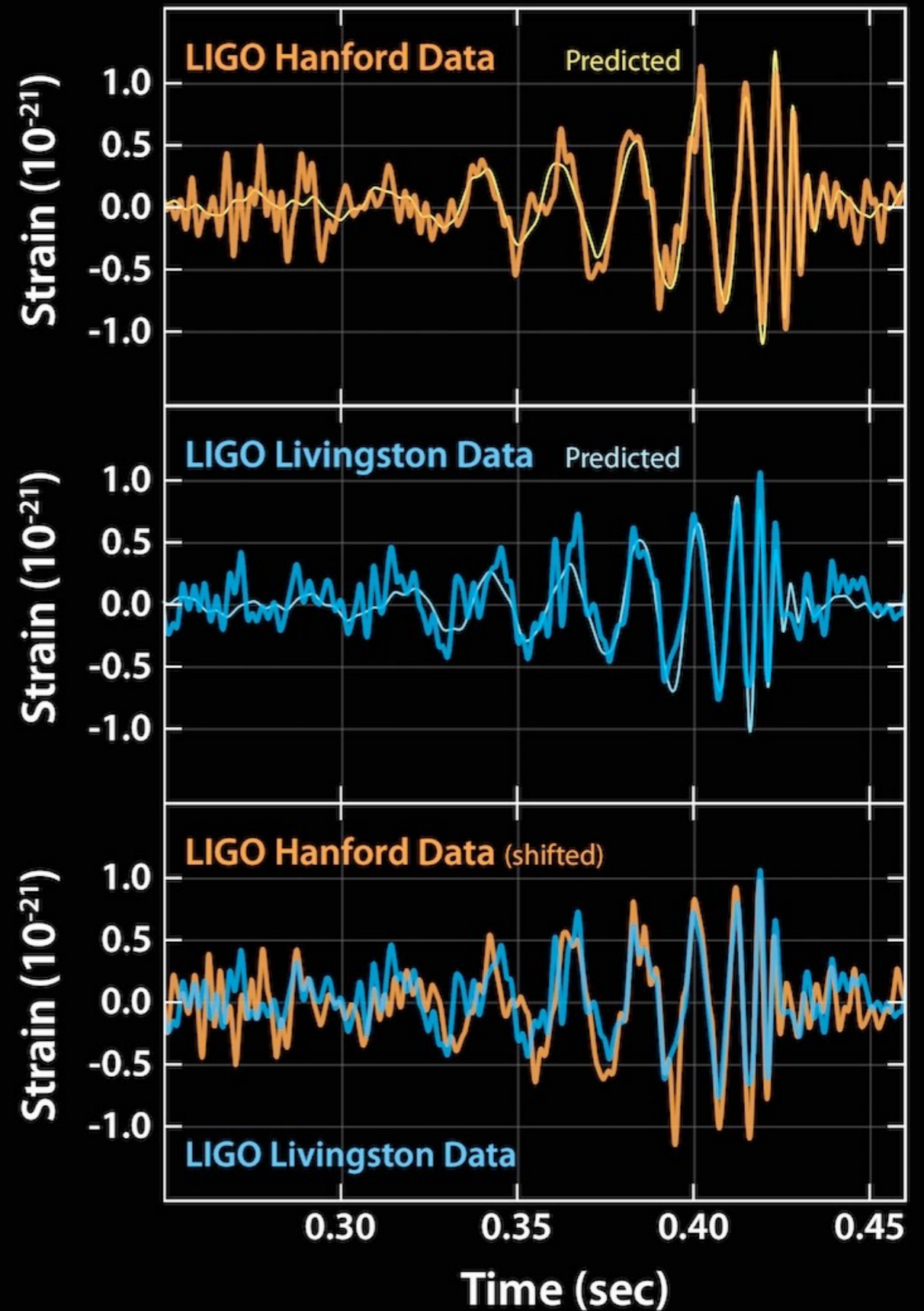
10^{-21} =

地球と太陽の距離 (1.5×10^{11} m)

2015年9月14日

重力波 初の直接観測

ブラックホールの合体



LIGO Scientific Collaboration
and Virgo Collaboration, 2016, PRL, 061102

2017年10月



The Nobel Prize in Physics 2017

Rainer Weiss, Barry C. Barish, Kip S. Thorne

Share this: 991

The Nobel Prize in Physics 2017



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Rainer Weiss
Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Barry C. Barish
Prize share: 1/4



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Kip S. Thorne
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne *"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*.

https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2017/

ノーベル物理学賞

重力波観測への貢献に対して

マルチメッセンジャー天文学

- 1960年台 太陽ニュートリノ+電磁波
- 1987年 超新星ニュートリノ+ 電磁波
- 2015年 ブラックホール合体からの重力波
- 2017年 中性子星合体からの重力波 + 電磁波
- 2017年 高エネルギーニュートリノ + 電磁波

マルチメッセンジャー天文学の時代に突入！

Section 14.

時間領域天文学と

マルチメッセンジャー天文学

14.1 時間領域天文学

14.2 マルチメッセンジャー天文学

14.3 中性子星合体の

マルチメッセンジャー観測

中性子星が合体 => 物質が吹き飛ぶ

流体力学
相対性理論

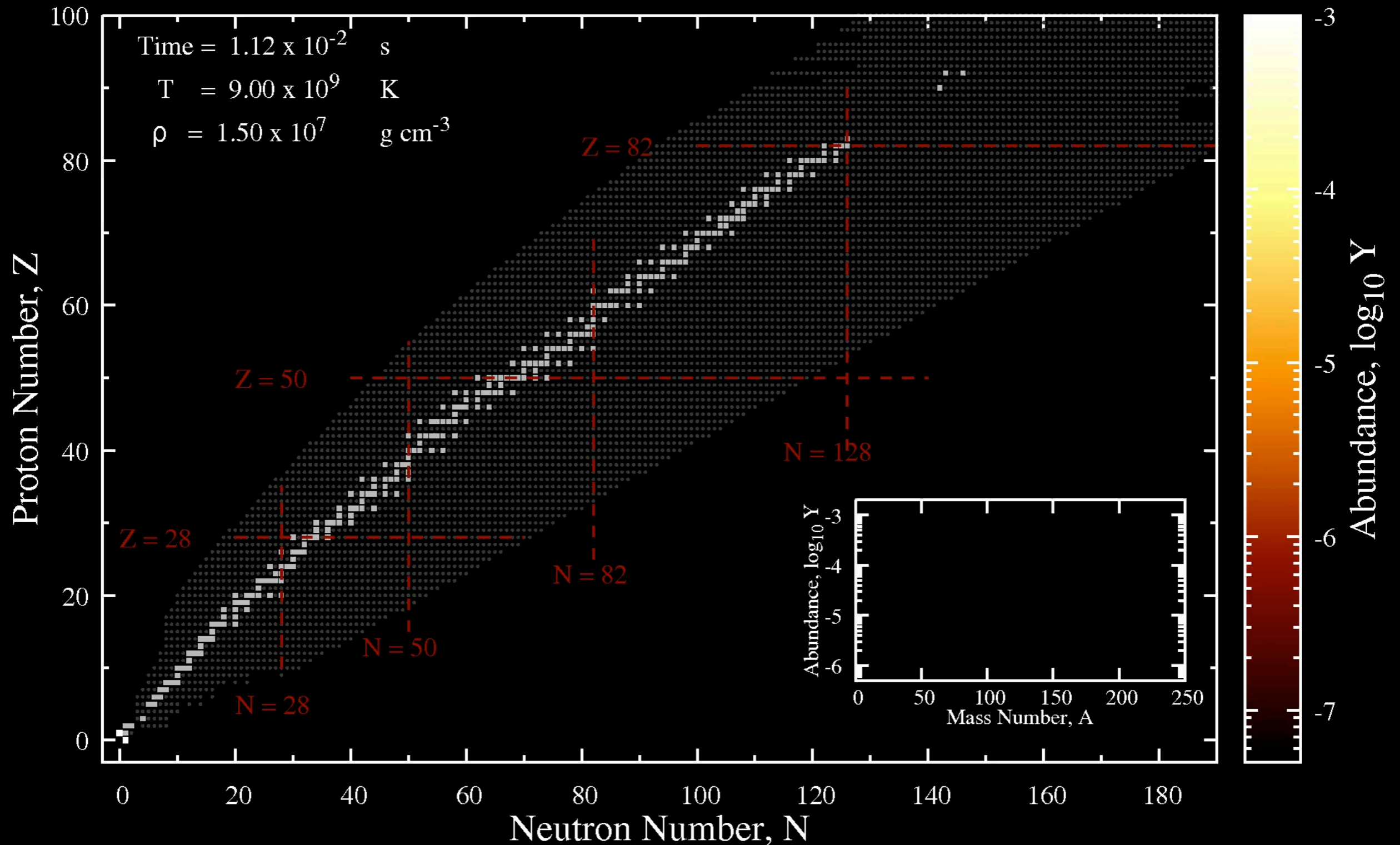


質量 $\sim 0.01 \times$ 太陽質量

速度 $\sim 0.2 \times$ 光速

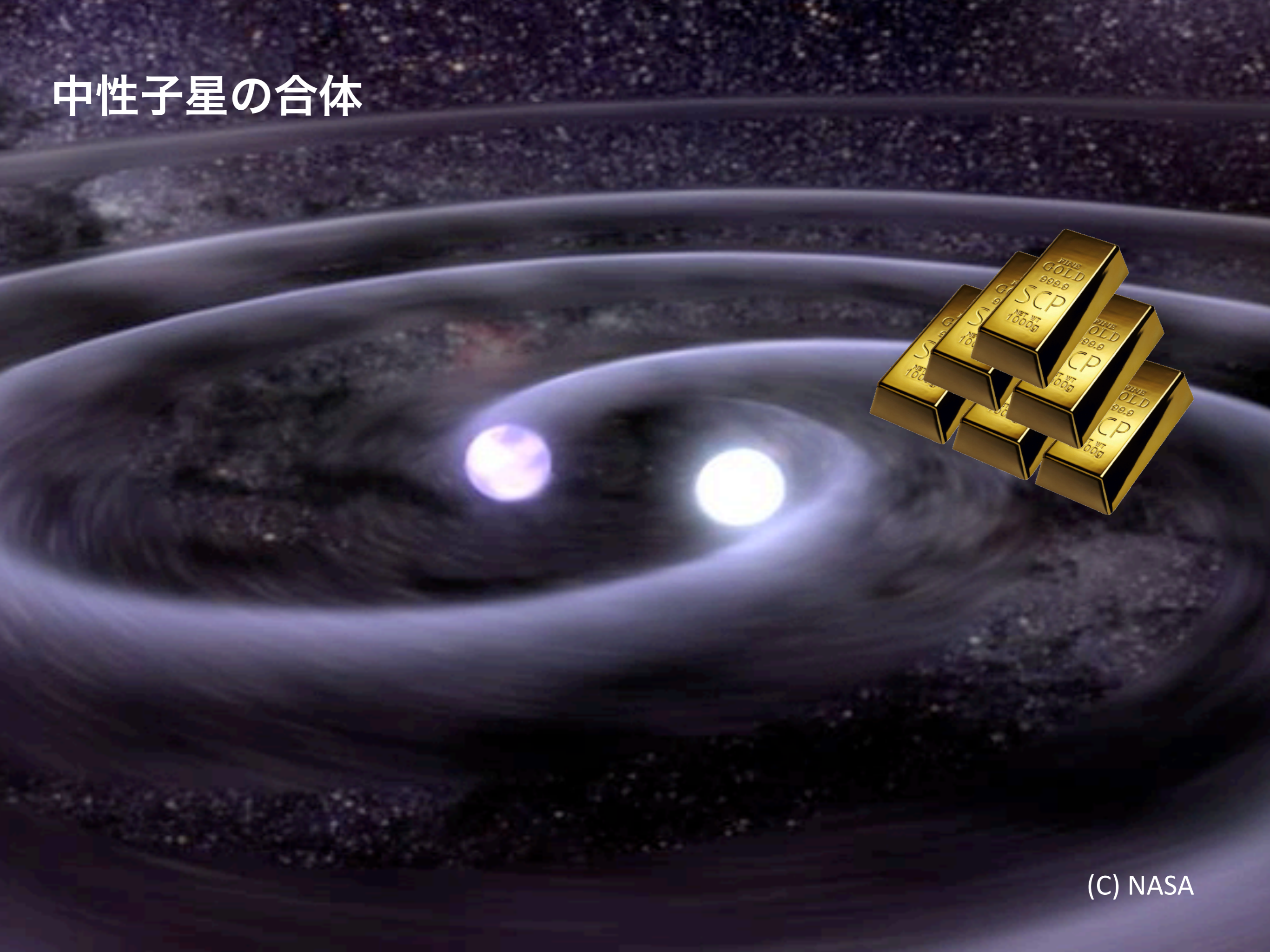
r-process元素合成

原子核物理学



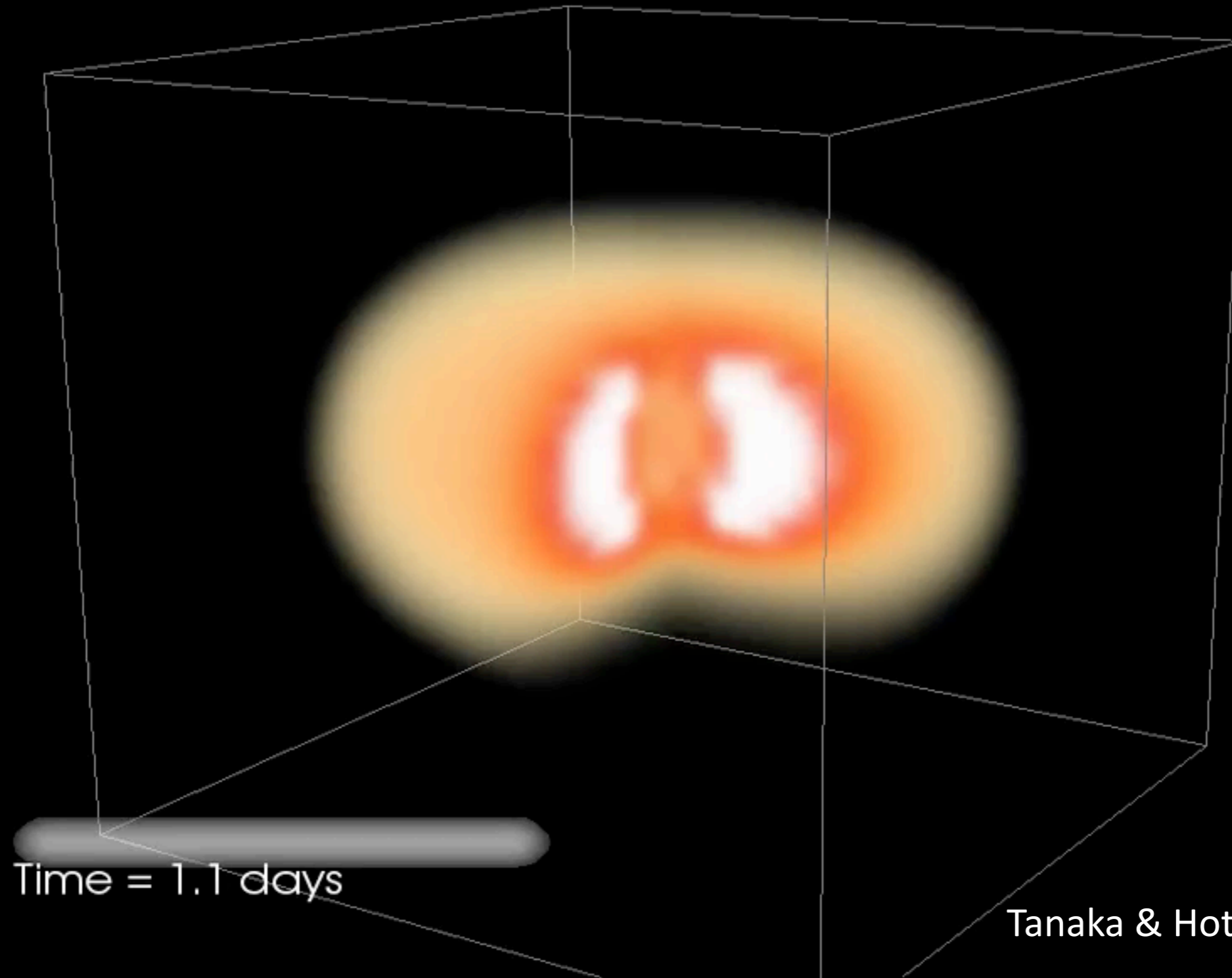
(C) Nobuya Nishimura

中性子星の合体



中性子星合体が金やプラチナを合成

=> 放射性崩壊エネルギーで輝く「キロノバ」



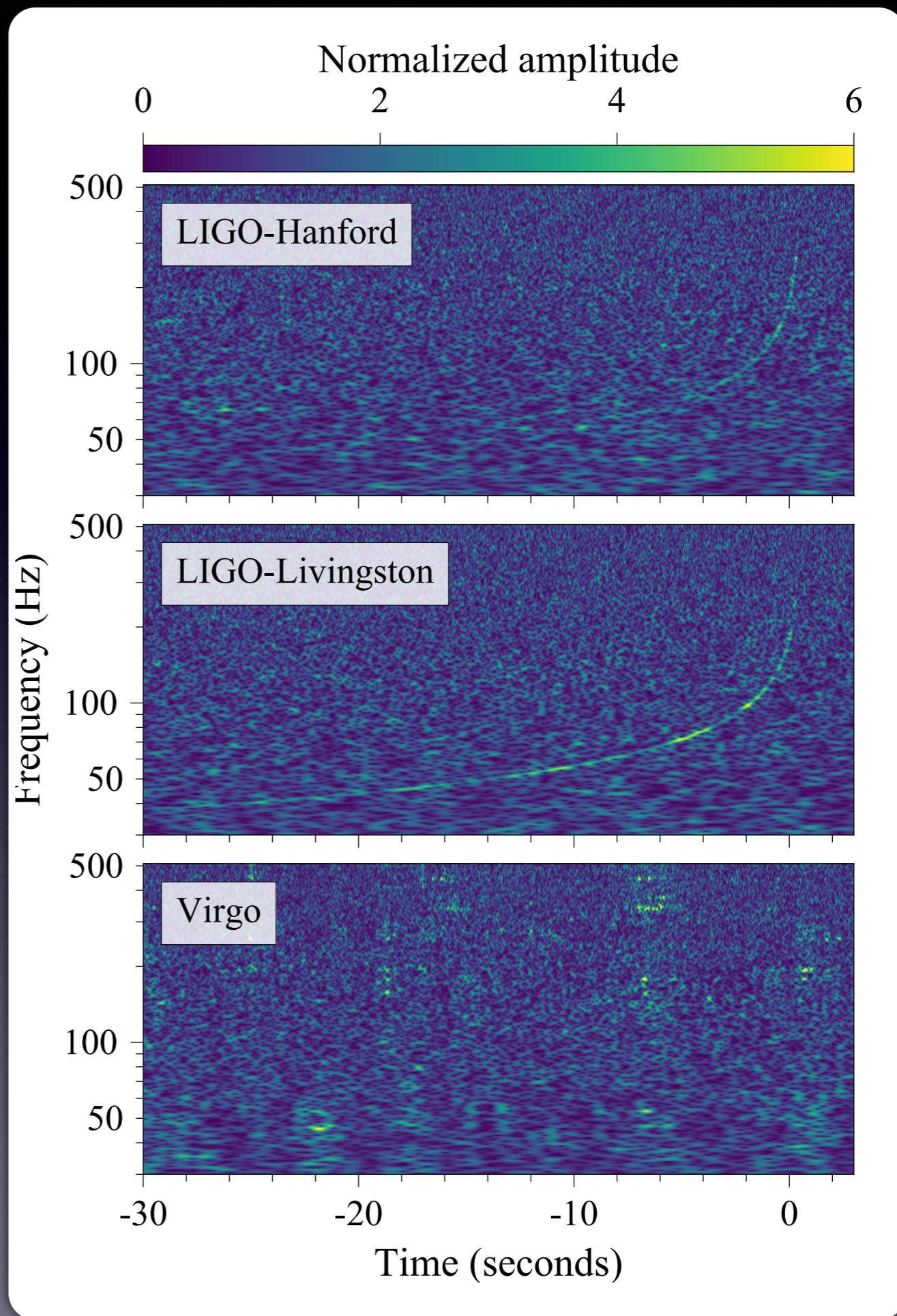
中性子星合体はどうやって探すの？

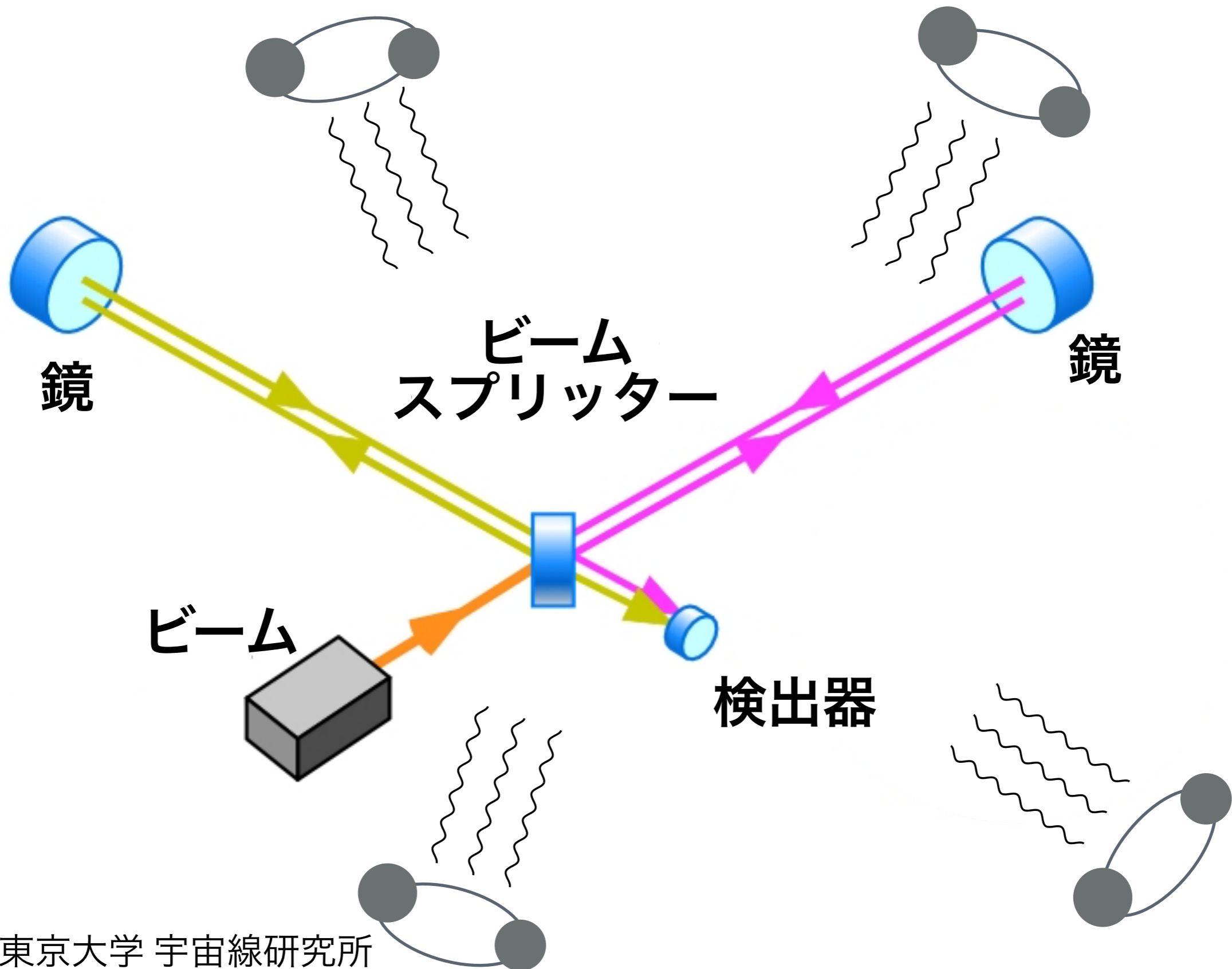
重力波！

2017年8月17日

中性子星合体からの
重力波初検出
GW170817

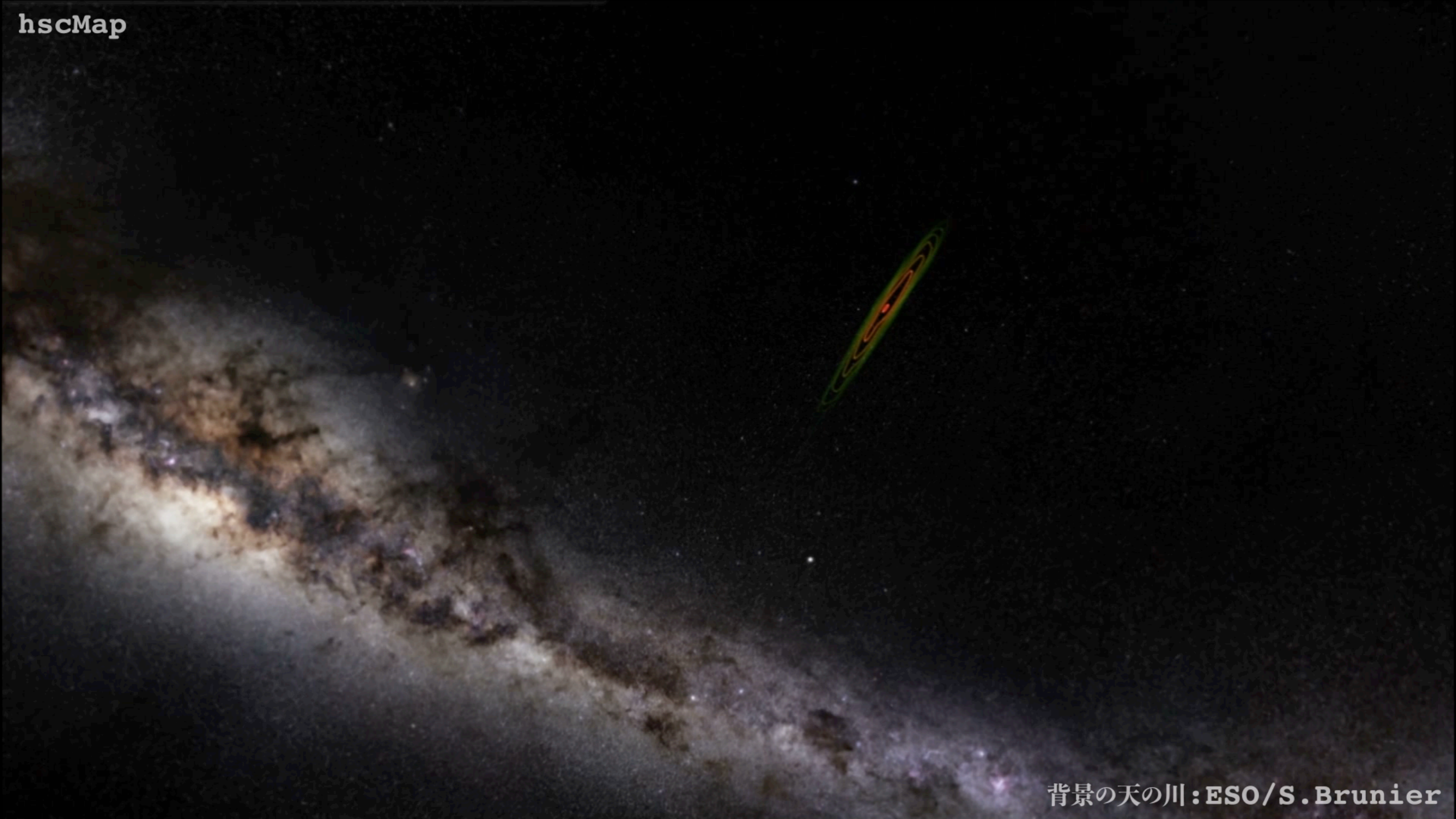
LIGO Scientific Collaboration
and Virgo Collaboration, 2017, PRL





(C) 東京大学 宇宙線研究所

hscMap

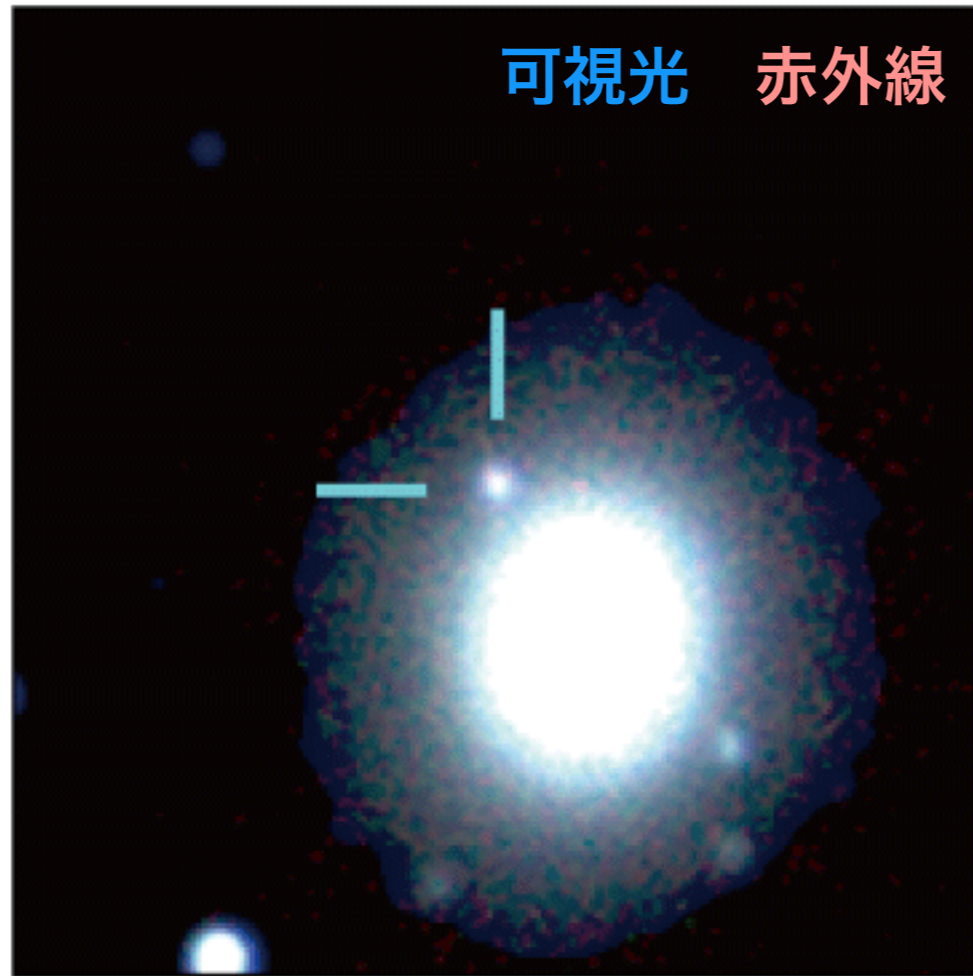


背景の天の川:ESO/S.Brunier

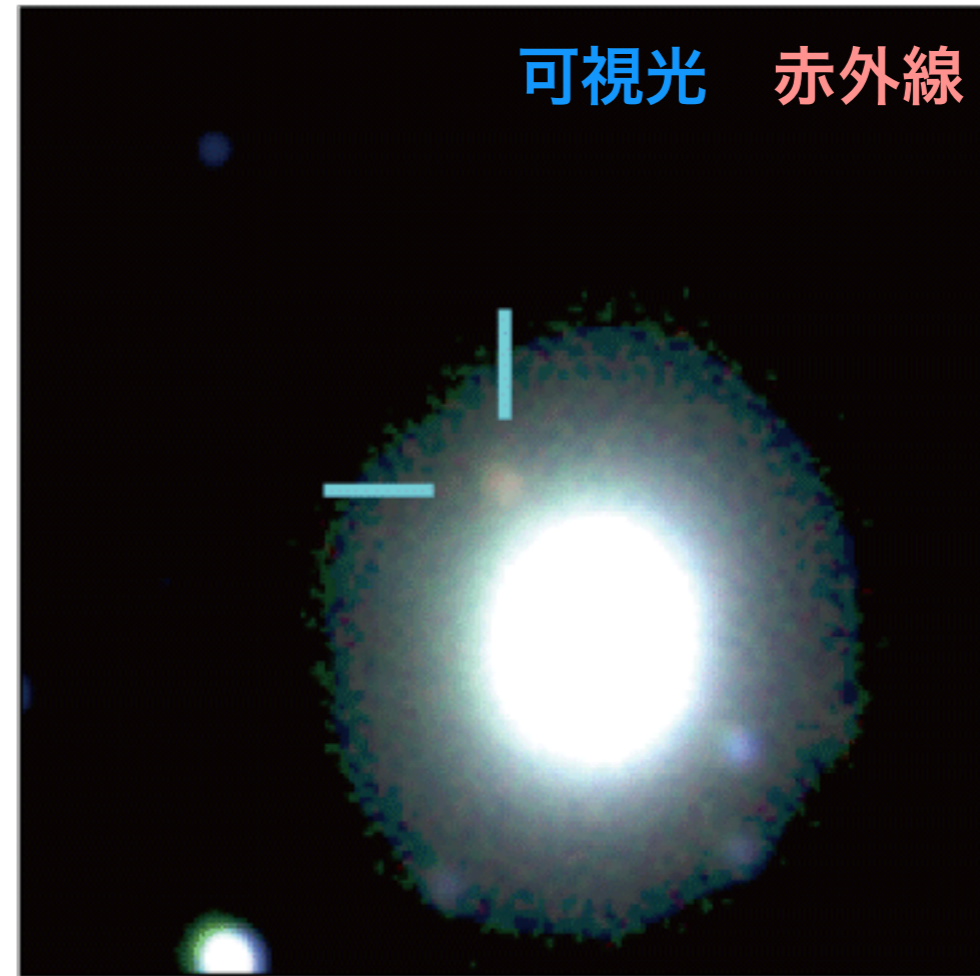
(C) Michitaro Koike (NAOJ/HSC)

中性子星合体からの「光」 (1億3000万光年)

2017.08.18-19



2017.08.24-25

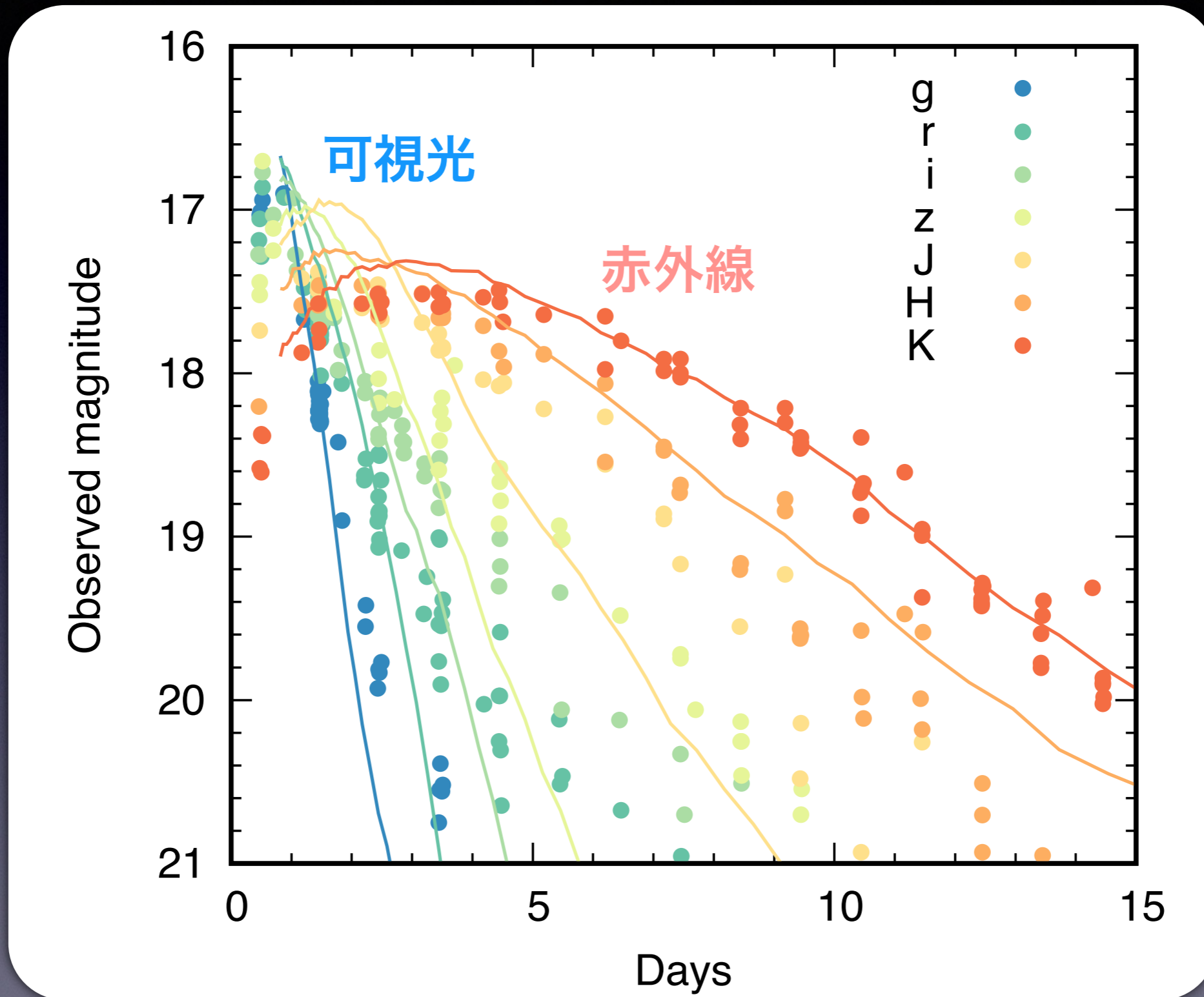


すばる望遠鏡HSC + IRSF望遠鏡 (Utsumi, Tanaka et al. 2017)

鉄より重い元素の合成現場が初めて捉えられた！

(放出された総質量は地球の1万倍)

理論的な予想との比較



Kawaguchi+
2018, 2020

中性子星合体でr-processが起きた強い証拠が得られた

中性子星合体のマルチメッセンジャー観測

- **金やプラチナの起源：50年以上続く「謎」**
 - 中性子星の合体が候補の一つ
 - 2017年：中性子星合体からの重力波が検出
=> 重元素合成の兆候が初めて捉えられた
- **まだまだ「謎」がたくさん**
 - いつも同じ元素、同じ量ができる？
 - 宇宙に存在する元素の量を説明できる？

元素の起源を解明するため、研究が進行中

「宇宙の爆発現象」

- 恒星の性質と進化の概要を理解する
- 星の爆発で何が起きているのかを理解する
 - 爆発のメカニズム
 - 電磁波放射のメカニズム
- 宇宙の元素の起源を理解する
- 「時間軸天文学」や
「マルチメッセンジャー天文学」の
最新的话题に触れる

様々な疑問を物理を使って理解しよう

- なぜ星は「進化」するのか？
- なぜ質量で運命が変わるのか？
- なぜ星は爆発するのか？
- 超新星の膨大なエネルギーはどこからきたのか？
- 超新星はなぜ非常に明るくなるのか？
- なぜ中性子星合体は輝くのか？
- ...

熱力学

統計力学

力学

電磁気学

宇宙物理学
天体物理学

流体力学

原子核物理学

量子力学

相対論