

超高エネルギーガンマ線で観る ブラックホールの姿

2026年4月18日(土)

IPMU+ICRR春の合同一般講演会

辻 直美 (東京大学 宇宙線研究所)

自己紹介

東京出身

2011-2015年 立教大学 学部

2015-2020年 立教大学 修士、博士

2020-2022年 理研/iTHEMS 特別研究員

2022-2025年 神奈川大学 特別助教

2025年- 東京大学宇宙線研究所 助教

宇宙を学べる大学/学部を選択

宇宙の観測に興味を持ち、
この分野に進む

立教大卒業式



野辺山電波望遠鏡



チャンドラX線天文衛星



北海道大樹町での気球実験



*研究内容

- X線観測
- ガンマ線観測
- 最近、電波観測も始めました

天の川銀河

銀河：2000億個の星

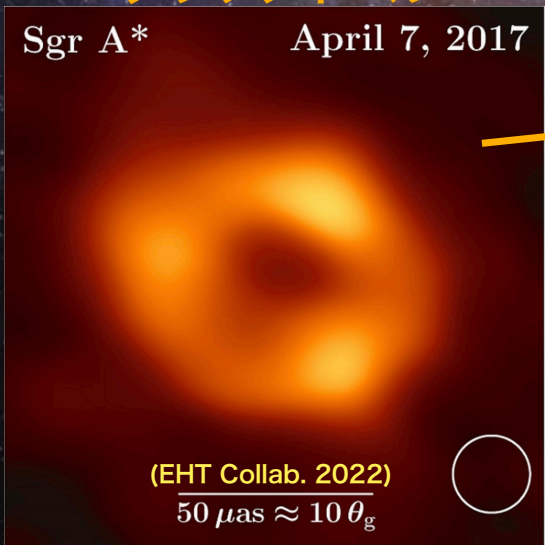
(太陽= 10^{30} kg)

400万太陽質量を持つ

ブラックホール

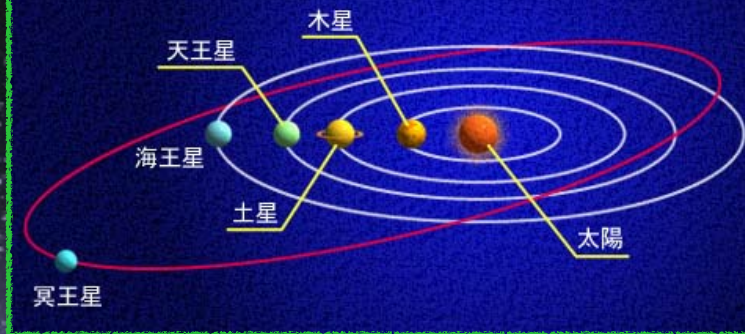
Sgr A*

April 7, 2017



太陽系

冥王星の軌道



銀河中心

距離 26000光年

超新星残骸



天体

宇宙線

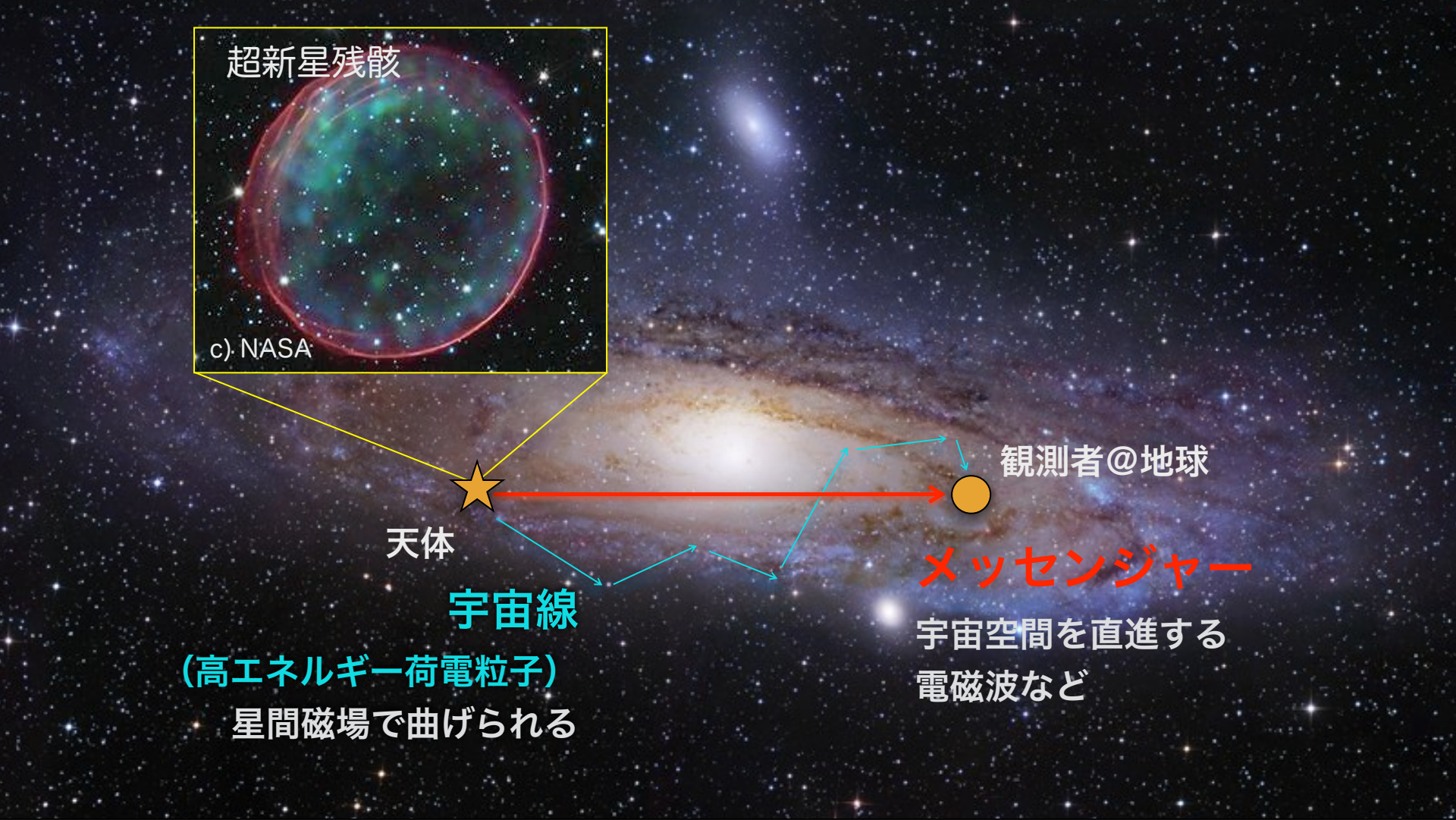
(高エネルギー荷電粒子)

星間磁場で曲げられる

観測者@地球

メッセンジャー

宇宙空間を直進する
電磁波など



超新星爆発とは

星は寿命を迎えると爆発する

(A Hitchhiker's Guide to Space & Plasma Physics)

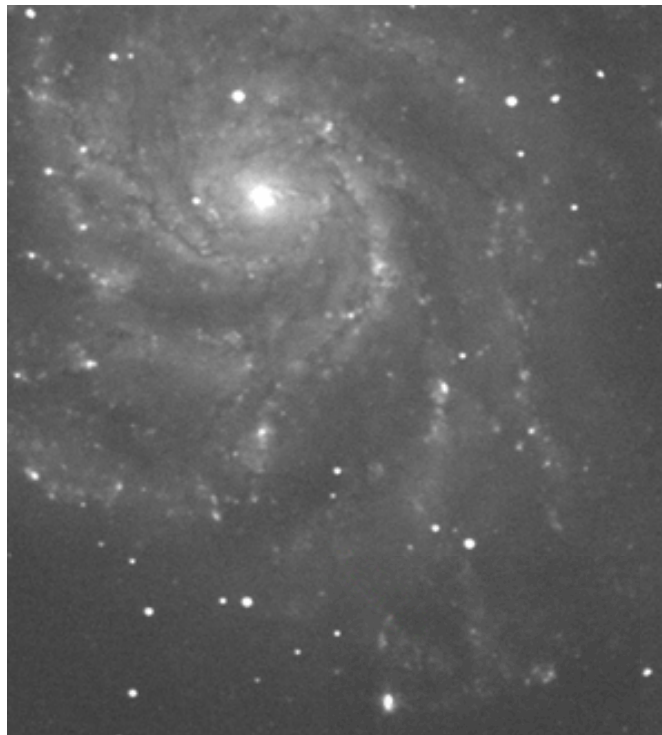


中心=コンパクト天体
ブラックホールなど

爆発放出物
=**超新星残骸**

超新星爆発SN 2011fe @ M101銀河を探せ！

爆発前 (2011年8月22日)



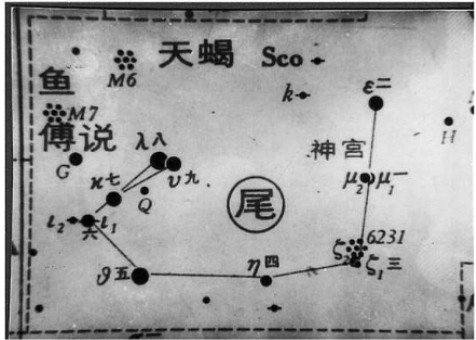
爆発後 (2011年8月24日)



(c) Schmidt telescope/ Palomar Observatory

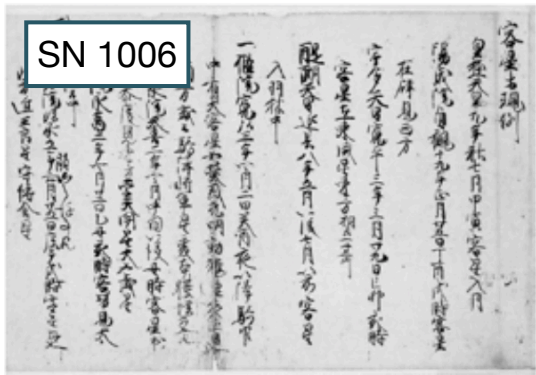
天の川銀河の超新星爆発

SN 185	中国の歴史書
SN 393	
SN 1006	明月記 (藤原定家)
SN 1054	
SN 1572	ティコ・ブライエ
SN 1604	ヨハネス・ケプラー



SN 393

其從弟緒司馬道子由是失勢禍亂成矣
 六年十一月癸巳月奄心前星占曰太子憂是
 常有篤疾
 七年九月丁丑歲星熒惑填星同在亢氏占曰
 是謂驚位絕行內外有兵喪與飢改立王公
 太元十八年正月乙酉熒惑入月占曰憂在宮中非賊
 乃盜也一曰有亂臣若有戮者二十一年九月帝暴崩
 內殿兆庶宣言夫人張氏潛行大逆于時朝政闇緩不
 加顯戮但默責而已又王國寶那夜卒伏其辜
 太元十八年二月有客星在尾中至九月乃滅占曰燕



(Meigetsuki/明月記)

「客星が急に現れた！」
 「月が二つになった！」
 「夜が消えた！」

本日の講演タイトル

超高エネルギーガンマ線で観る ブラックホールの姿

観る・観測する
≠見る

「見る」



人間が見ることのできる光

赤→波長=700ナノメートル

⋮

紫→波長=380ナノメートル



「見る」



人間が見ることのできる光

赤→波長=700ナノメートル

⋮

紫→波長=380ナノメートル

夜中の人間の視界



蛇が見ることのできる光

赤外線→波長>780ナノメートル

夜中の蛇の視界



<https://gigazine.net/news/20131120-animals-see-world/>

「観る」 = 光(電磁波)の観測

電波 赤外 可視 紫外 X線 ガンマ線

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

光のエネルギー: E

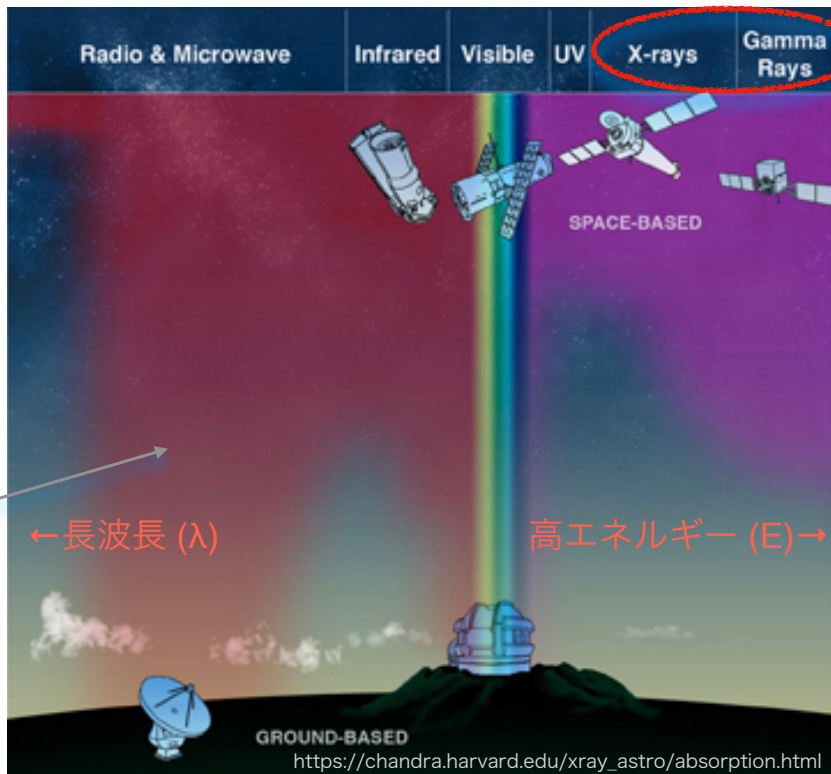
光の周波数: ν

光の波長: λ

プランク定数: $h=6.6 \times 10^{-34}$ Js

光速: $c=3 \times 10^8$ m/s

光は地球大気で
吸収されてしまう

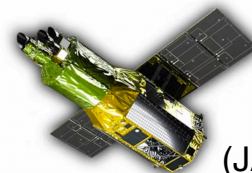
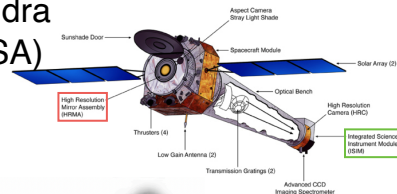


高エネルギー天文学

X線やガンマ線を捉える
には気球や衛星が必要

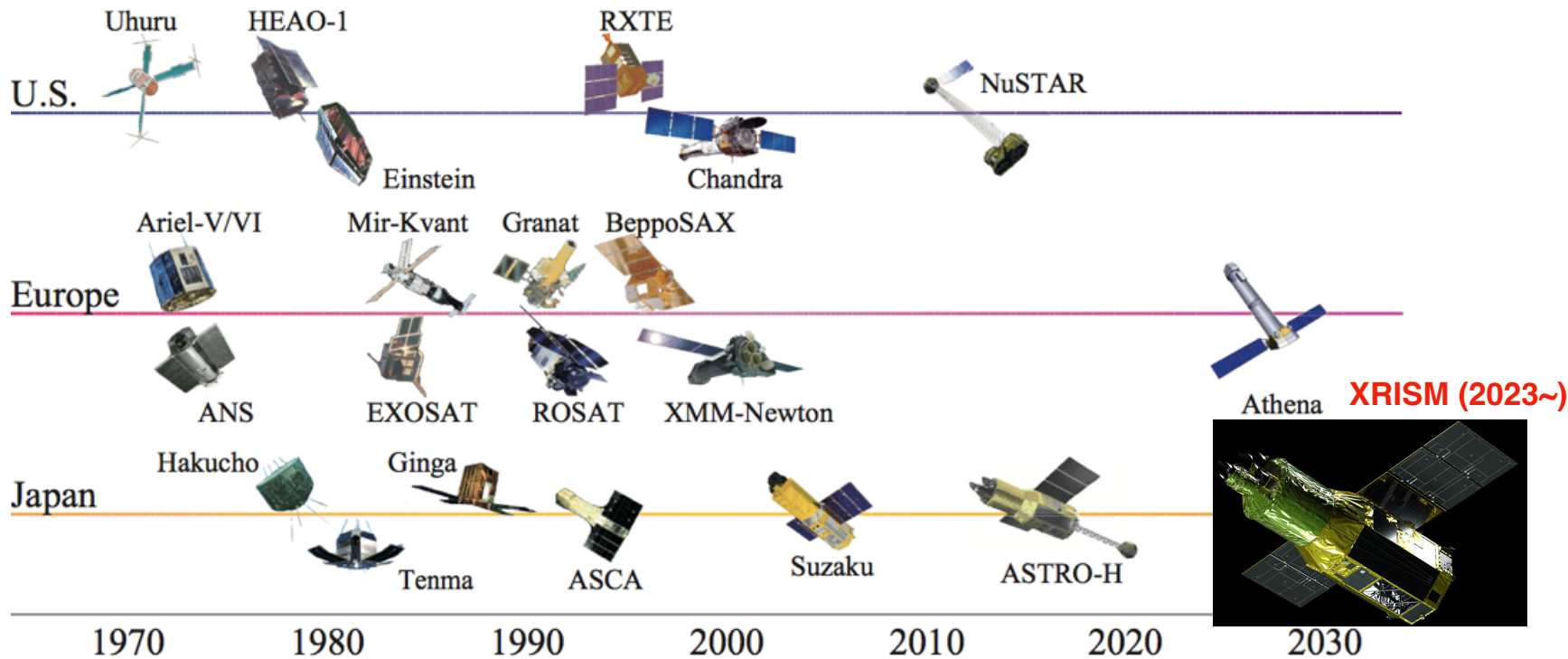
X線衛星

Chandra
(NASA)



XRISM
(JAXA/NASA)

X線観測の歴史



超新星爆発とは

星は寿命を迎えると爆発する

(A Hitchhiker's Guide to Space & Plasma Physics)



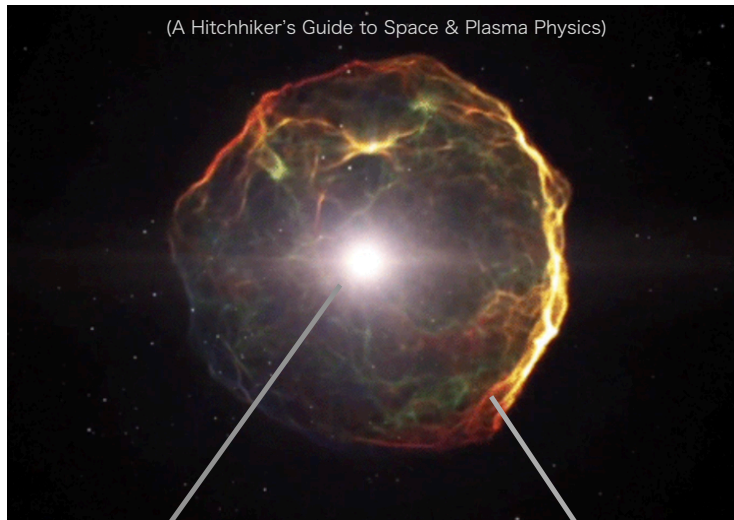
中心=コンパクト天体
ブラックホールなど

爆発放出物
=**超新星残骸**

超新星残骸を観る

星は寿命を迎えると爆発する

(A Hitchhiker's Guide to Space & Plasma Physics)



中心=コンパクト天体
ブラックホールなど

爆発放出物
= **超新星残骸**

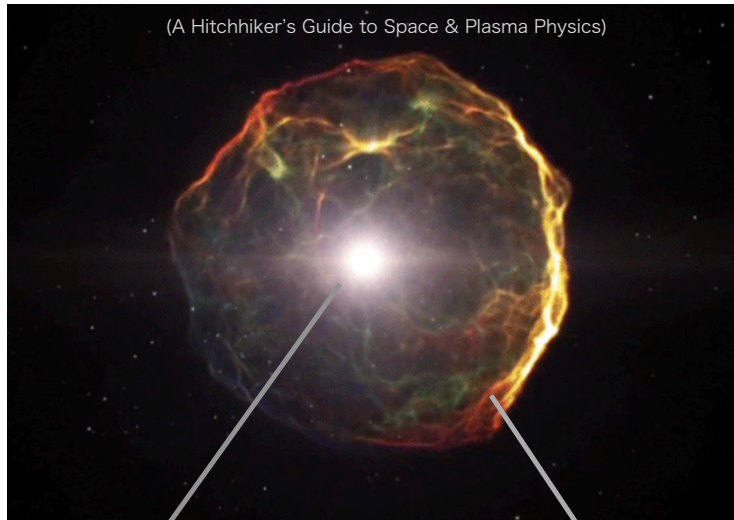


Digitized Sky Survey (DSS)による可視光画像
(c) X-ray: NASA/CXC/RIKEN & GSFC/T. Sato et al; Optical: DSS

超新星残骸を観る

星は寿命を迎えると爆発する

(A Hitchhiker's Guide to Space & Plasma Physics)



中心=コンパクト天体
ブラックホールなど

爆発放出物
=超新星残骸

ティコ・ブライエが1572年に発見した超新星残骸

ティコの超新星残骸

超新星残骸の温度は、
百万～数千万度！
→X線で明るく輝く

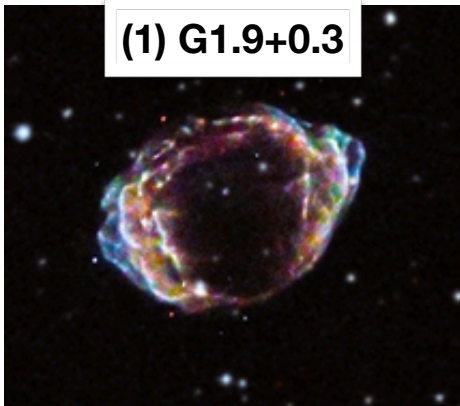


チャンドラ衛星によるX線イメージ

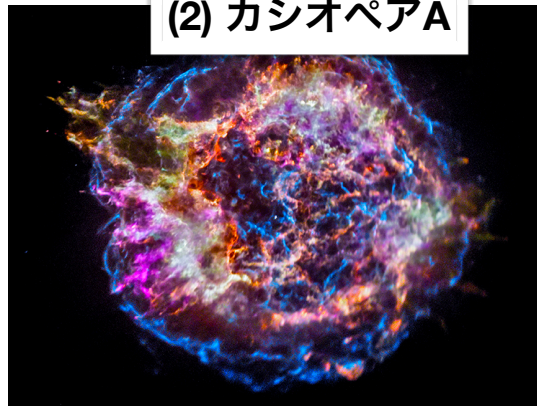
Digitized Sky Survey (DSS)による可視光画像
(c) X-ray: NASA/CXC/RIKEN & GSFC/T. Sato et al; Optical: DSS

色々な超新星残骸

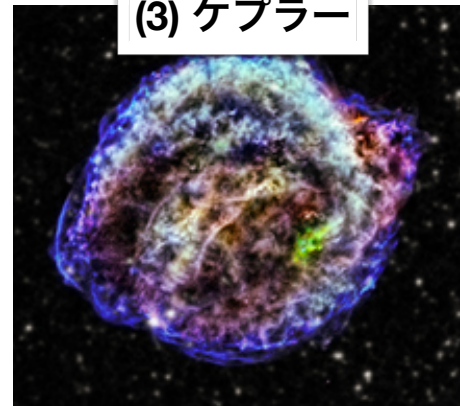
(1) G1.9+0.3



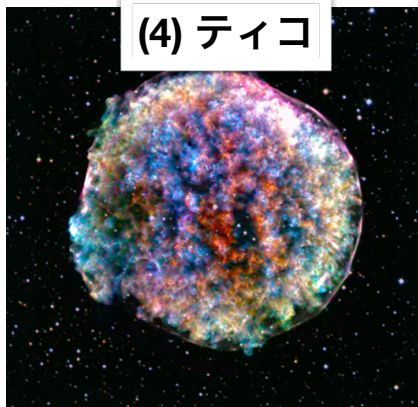
(2) カシオペアA



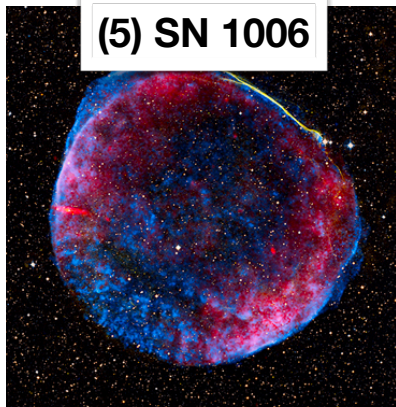
(3) ケプラー



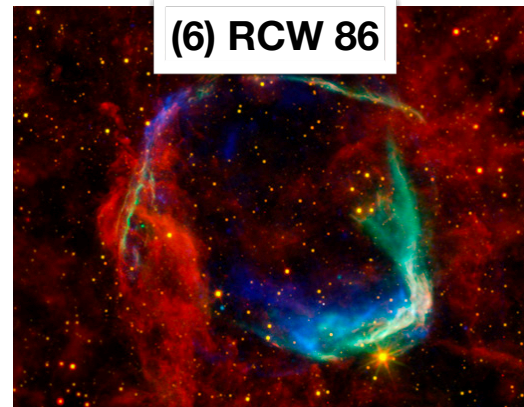
(4) ティコ



(5) SN 1006



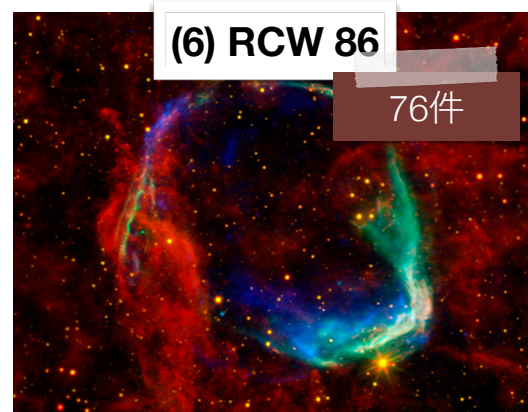
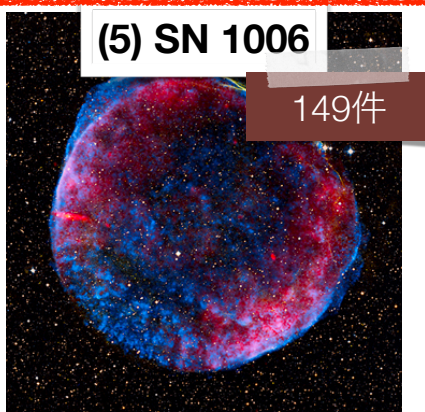
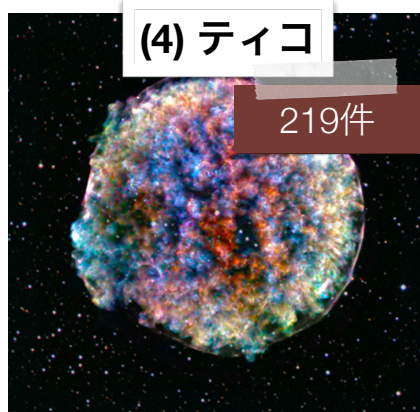
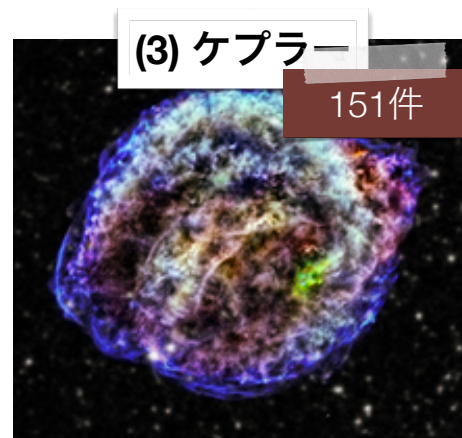
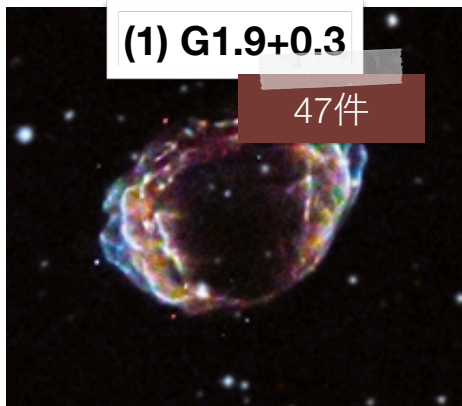
(6) RCW 86



色々な超新星残骸

論文数
一位

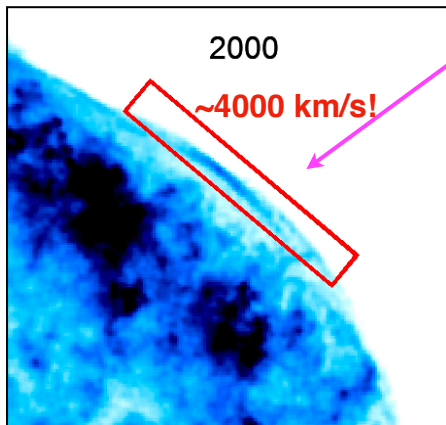
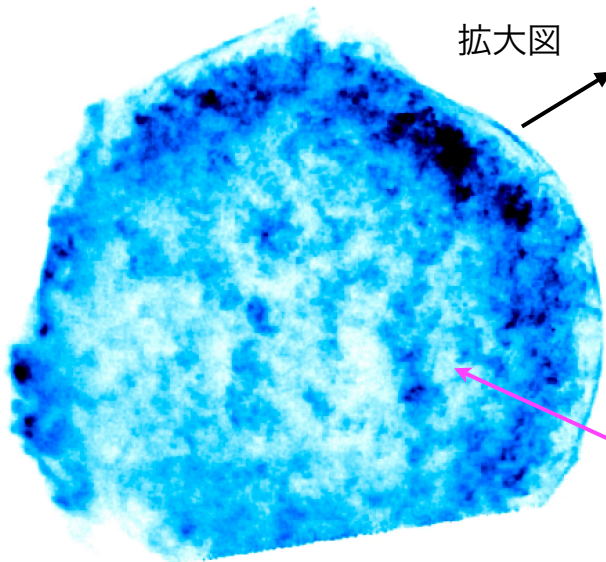
(ADSで“タイトルに名前を含む”
で検索: 2021年まで)



なぜ超新星残骸を研究するの？

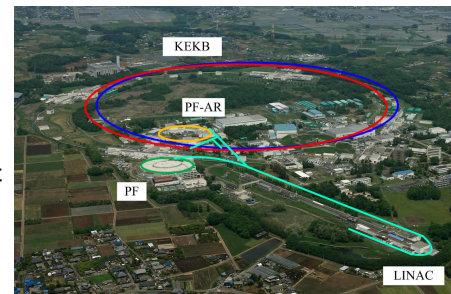
2000

拡大図



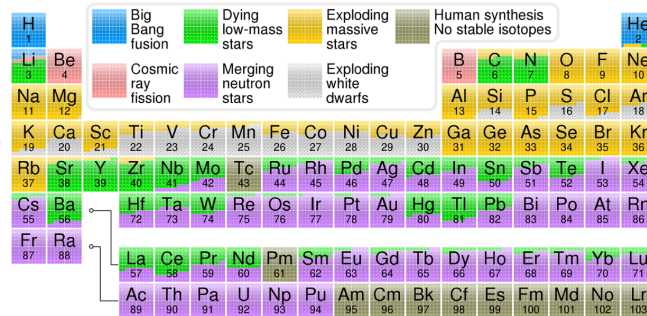
宇宙線の加速現場

日本の大型加速器
高エネルギー加速器研究機構KEK(筑波)→



元素合成の現場

周期表にある100種類の
元素の起源は？



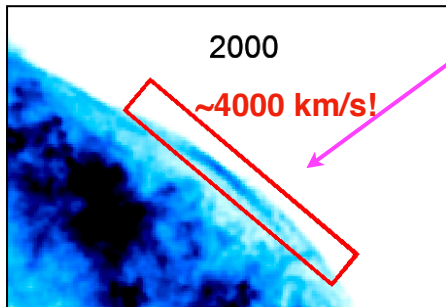
Wikipedia

ティコの超新星残骸

なぜ超新星残骸を研究するの？

2000

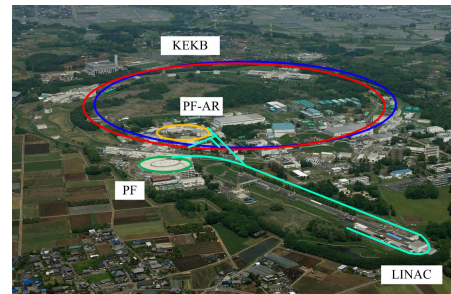
拡大図



宇宙線の加速現場

日本の大型加速器

高エネルギー加速器研究
筑波)→

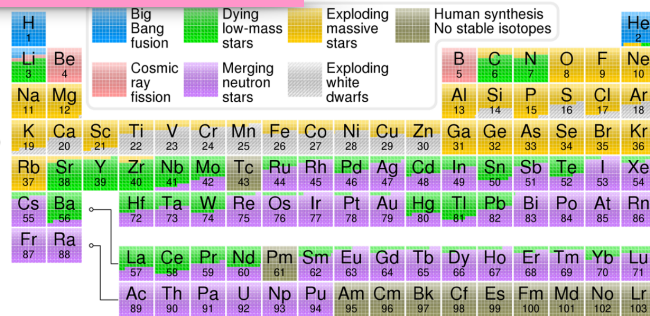


宇宙線加速 → 銀河の進化
元素合成 → 元素の起源

の解明に繋がる

元素合成の現場

周期表にある100種類の
元素の起源は？

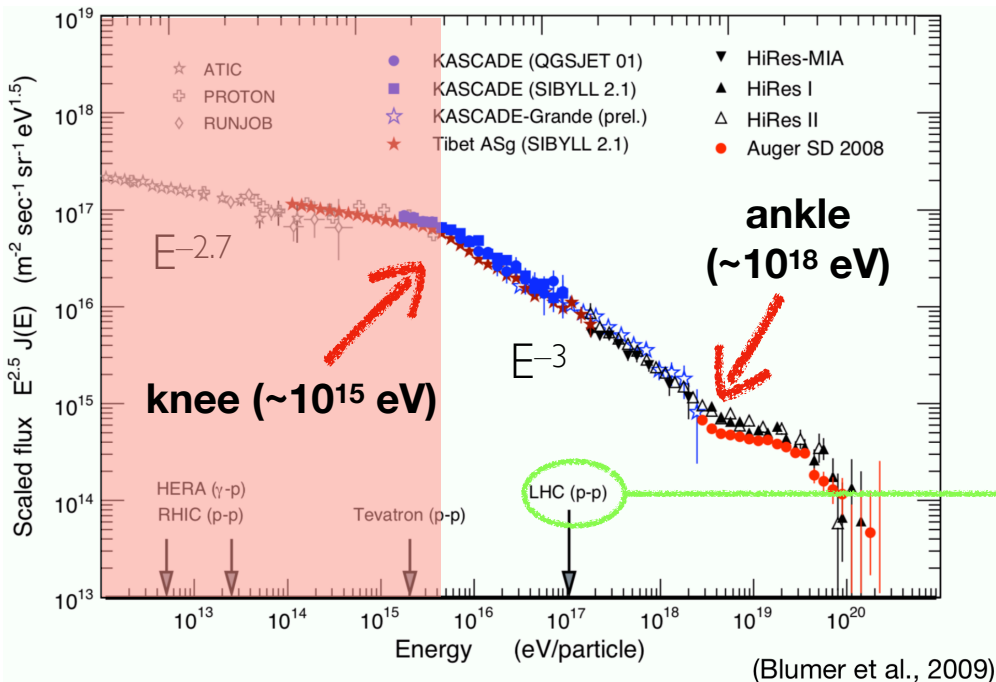


Wikipedia

ティコの超新星残骸

宇宙線

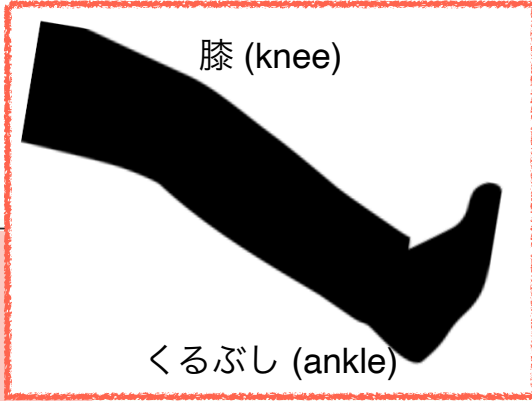
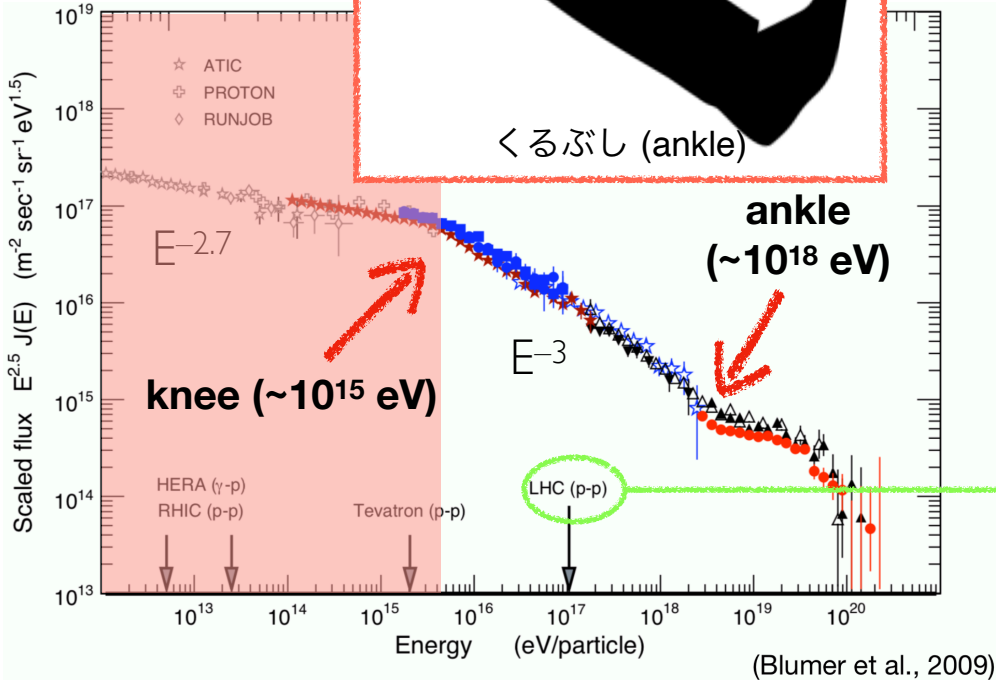
- ☑ 高エネルギーの荷電粒子。9割が陽子
- ☑ 到来頻度 $\sim 600 \text{ events/m}^2/\text{yr}@10^{15} \text{ eV}$
and $\sim 2 \text{ events}/100 \text{ km}^2/\text{yr}@10^{20} \text{ eV}$



地上で最も強力な加速器 LHC @CERN (ジュネーブ)



宇宙線



...。9割が陽子
 $m^2/yr@10^{15}$ eV
 $m^2/yr@10^{20}$ eV



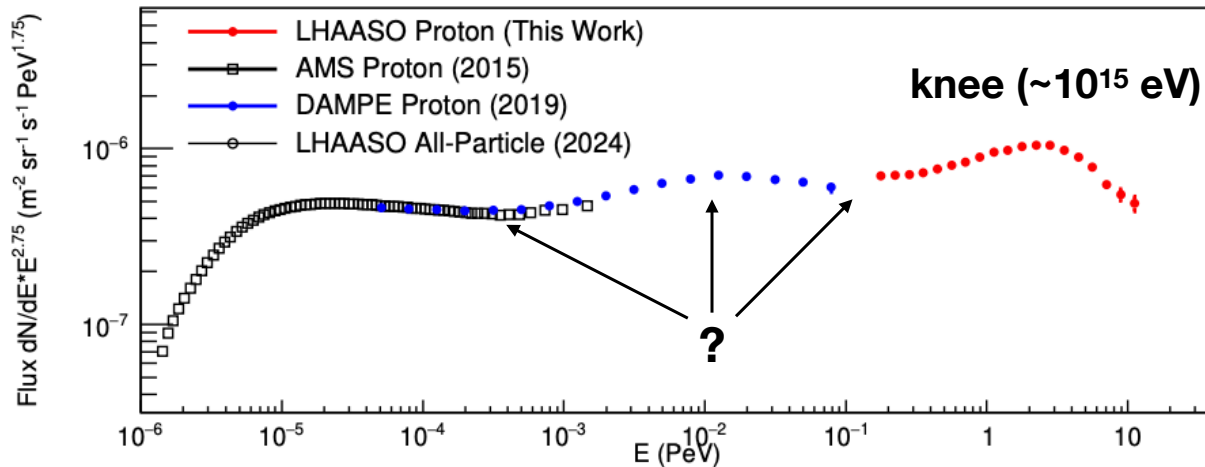
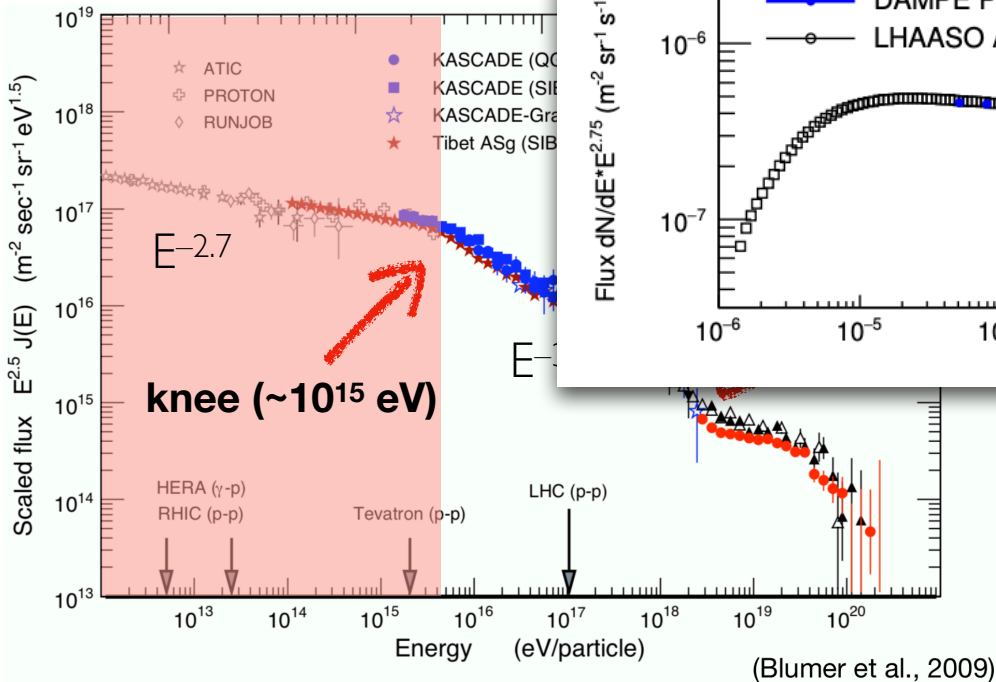
**Knee以下のエネルギーを持つ宇宙線は
 天の川銀河系内の超新星残骸で加速されると
 考えられてきた**

地上で最も強力な加速器 LHC @CERN (ジュネーブ)



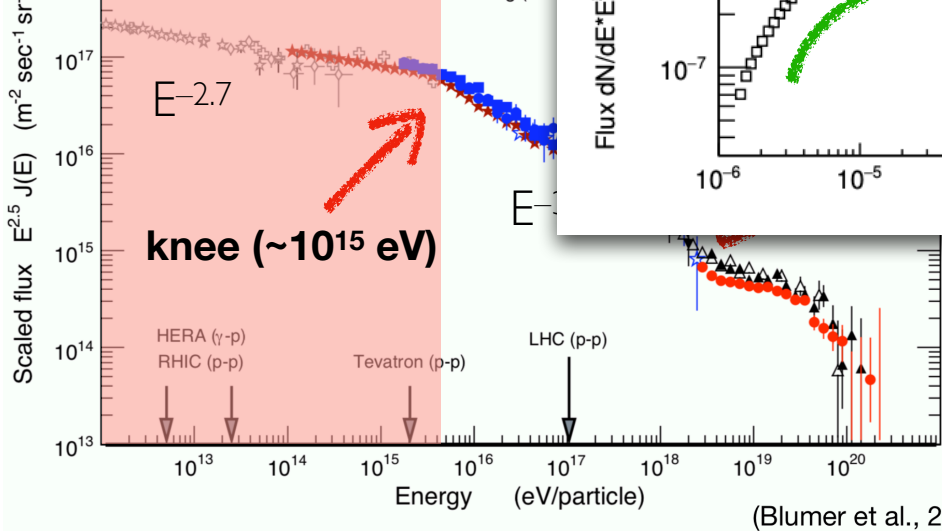
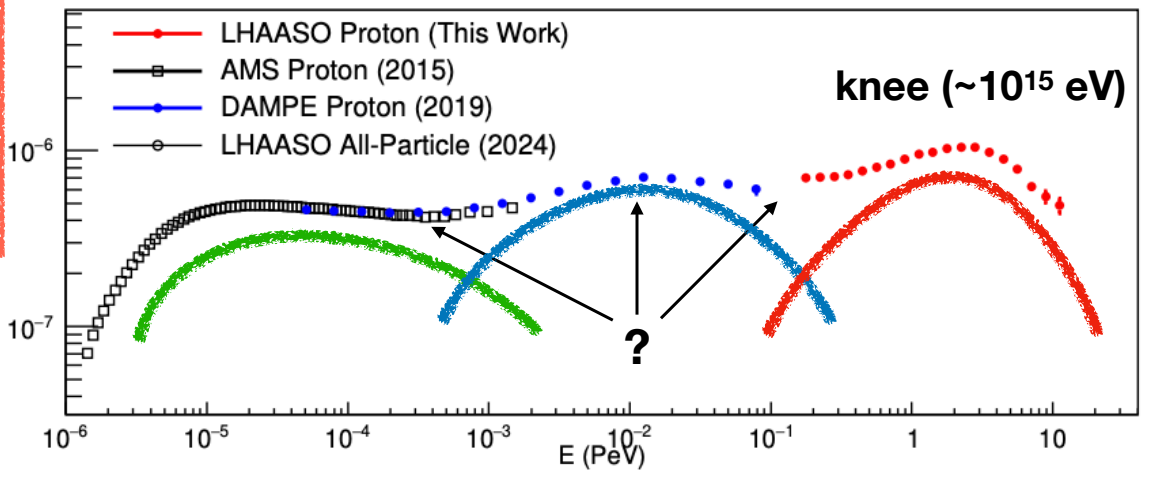
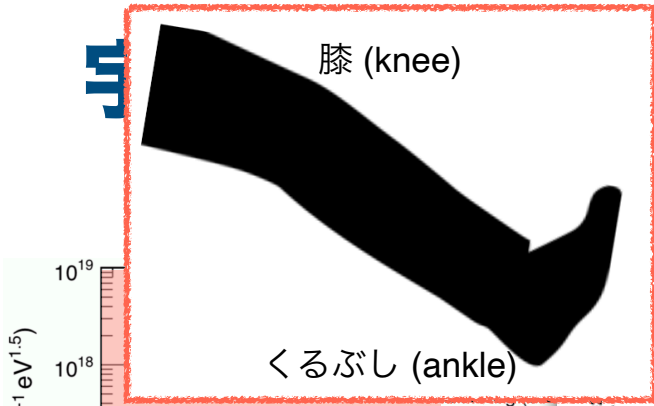
宇宙線

最新の宇宙線エネルギースペクトル (LHAASO Collab. 2025)



(Blumer et al., 2009)

最新の宇宙線エネルギースペクトル (LHAASO Collab. 2025)



Knee以下にもたくさんの折れ曲がり
 →超新星残骸のみが加速器ではない、、、？

どのように宇宙線の加速器を見つけるか

→ガンマ線観測

高エネルギー粒子を見つけるには、高エネルギー光子（=ガンマ線）を見つければ良い

どのようにガンマ線を検出するか

どのようにガンマ線を検出するか

Qi FengのHEAD2025での講演

「ガンマ線検出は弾丸を捉えるようなもの」

3. 硝煙をキャッチする



1. 弾丸を直接
キャッチする

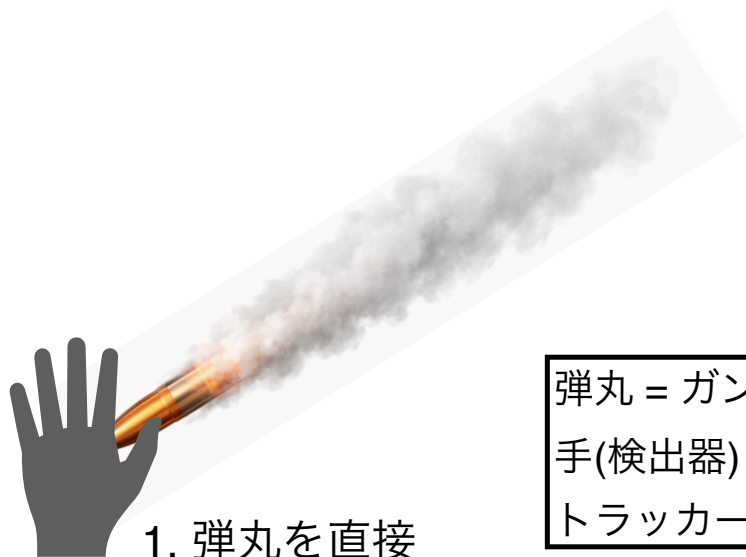
2. 硝煙を観察する



どのようにガンマ線を検出するか

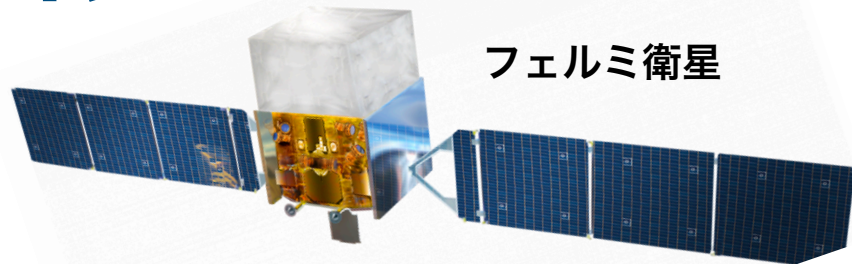
Qi FengのHEAD2025での講演

「ガンマ線検出は弾丸を捉えるようなもの」



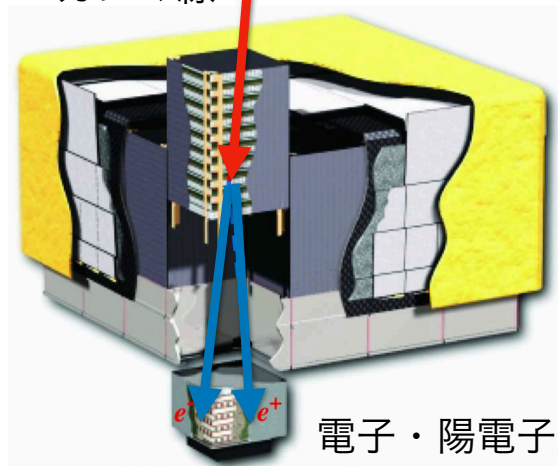
1. 弾丸を直接
キャッチする

弾丸 = ガンマ線
手(検出器) = シリコン
トラッカー・カロリメータ



フェルミ衛星

ガンマ線



電子・陽電子対

どのようにガンマ線を検出するか

大気チェレンコフ望遠鏡

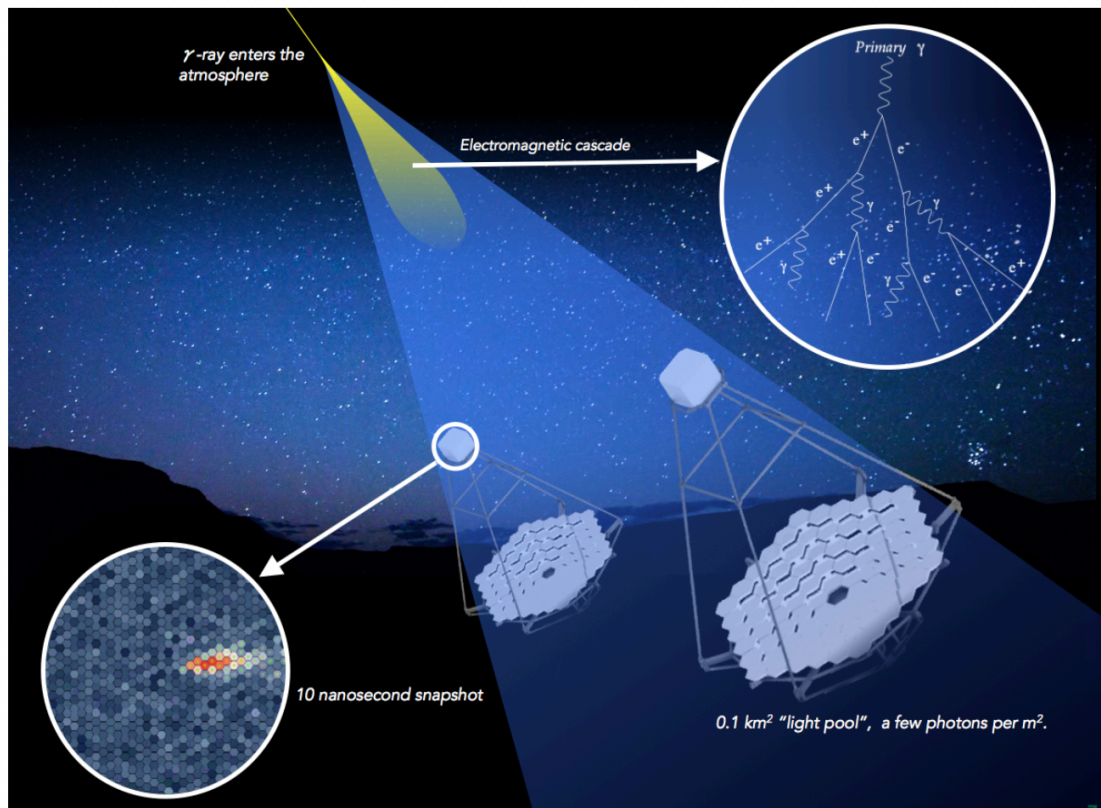
Qi FengのHEAD2025での講演

「ガンマ線検出は弾丸を捉えるように」

2. 硝煙を観察する



硝煙 = 大気シャワー
目 = チェレンコフ光を
捉える地上望遠鏡



どのようにガンマ線を検出するか

Qi FengのHEAD2025での講演

「ガンマ線検出は弾丸を捉えるようなもの」

2. 硝煙を観察する



硝煙 = 大気シャワー
目 = チェレンコフ光を
捉える地上望遠鏡

VERITAS
@アリゾナ

MAGIC @ラパルマ

H.E.S.S. @ナミビア



どのようにガンマ線を検出するか

Qi FengのHEAD2025での講演

「ガンマ線検出は弾丸を捉える。」

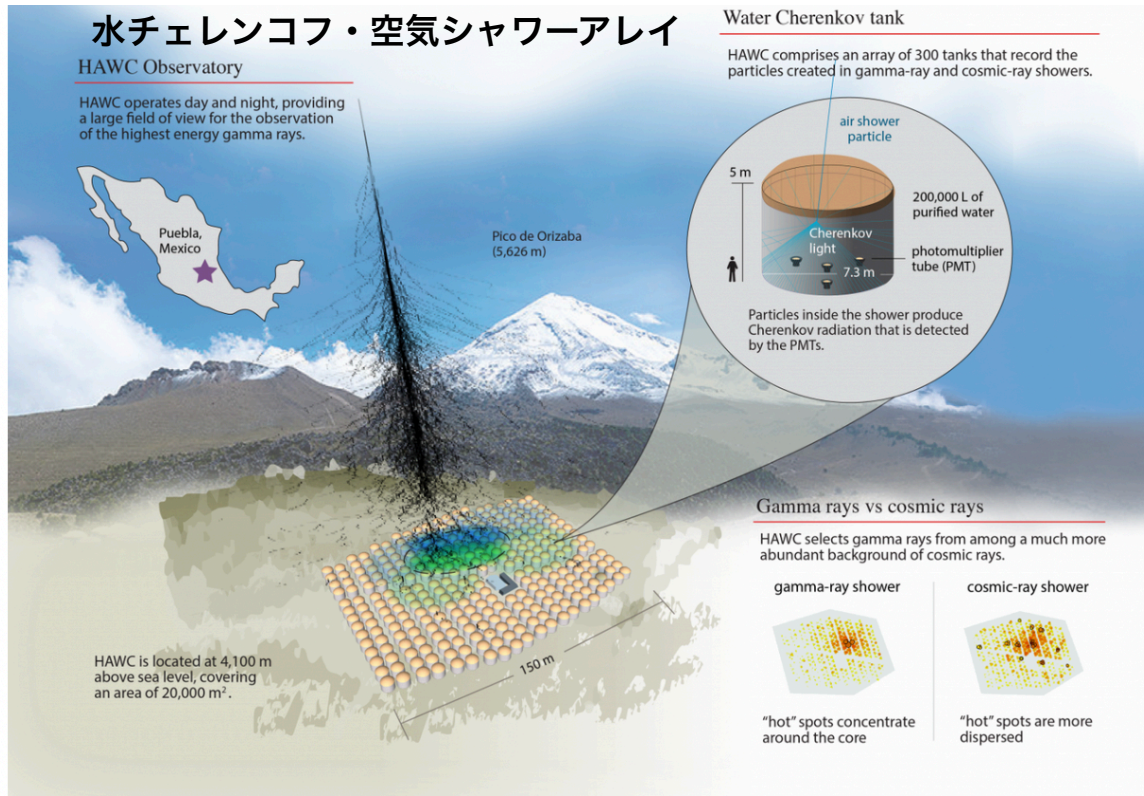
3. 硝煙をキャッチする



硝煙 = 大気シャワー

手 = 大気シャワーを捉える

水タンク・シンチレーター



どのようにガンマ線を検出するか

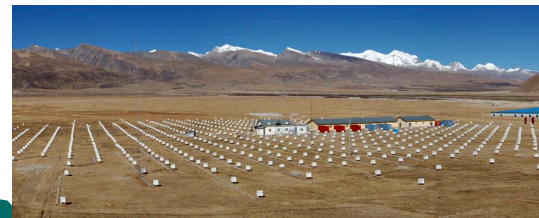
Qi FengのHEAD2025での講演

「ガンマ線検出は弾丸を捉えるようなもの」

3. 硝煙をキャッチする



硝煙 = 大気シャワー
手 = 大気シャワーを捉える
水タンク・シンチレーター



Tibet ASy @チベット

HAWC
@メキシコ



LHAASO @中国四川省



どのようにガンマ線を検出するか

Qi FengのHEAD2025での講演

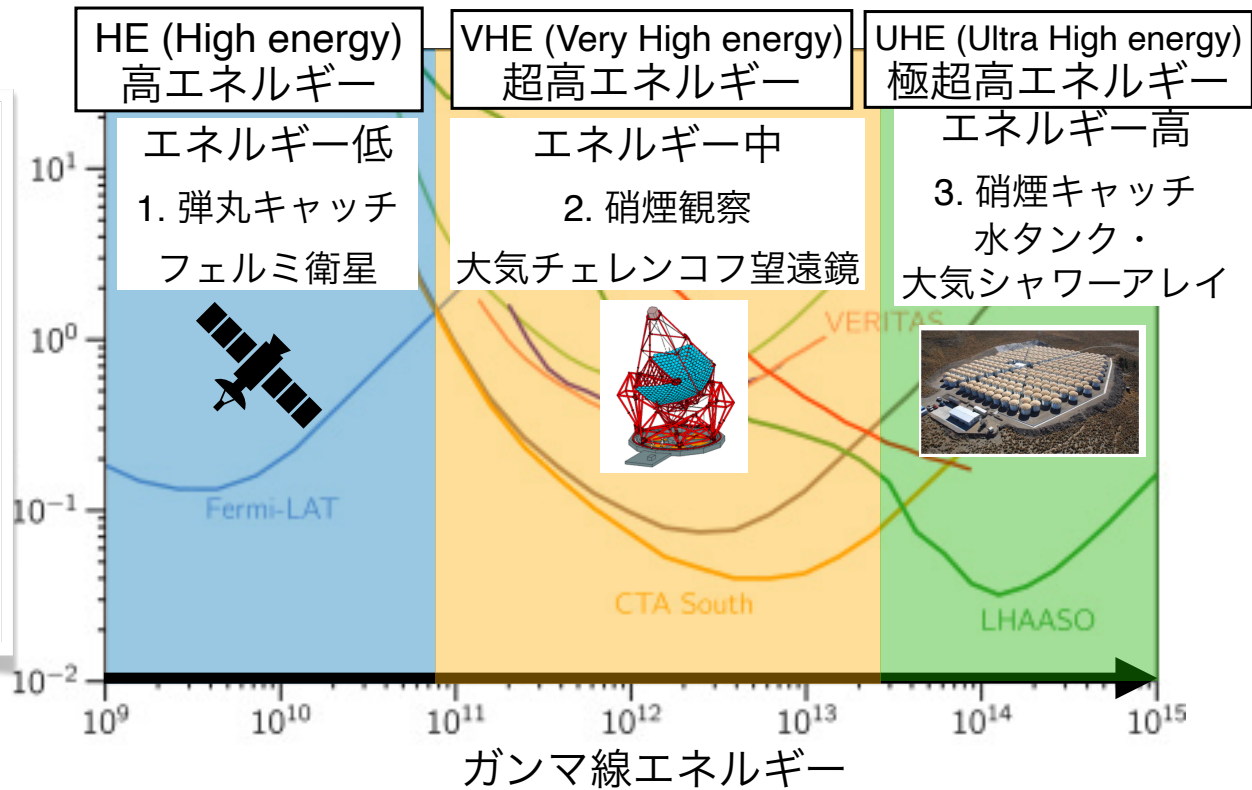
「ガンマ線検出は弾丸を捉えるようなもの」

3. 硝煙をキャッチする



1. 弾丸を直接
キャッチする

2. 硝煙を観察する



ブラックホール

星は寿命を迎えると爆発する

(A Hitchhiker's Guide to Space & Plasma Physics)



中心=コンパクト天体
ブラックホールなど

爆発放出物
= 超新星残骸

- **超高密度**な天体

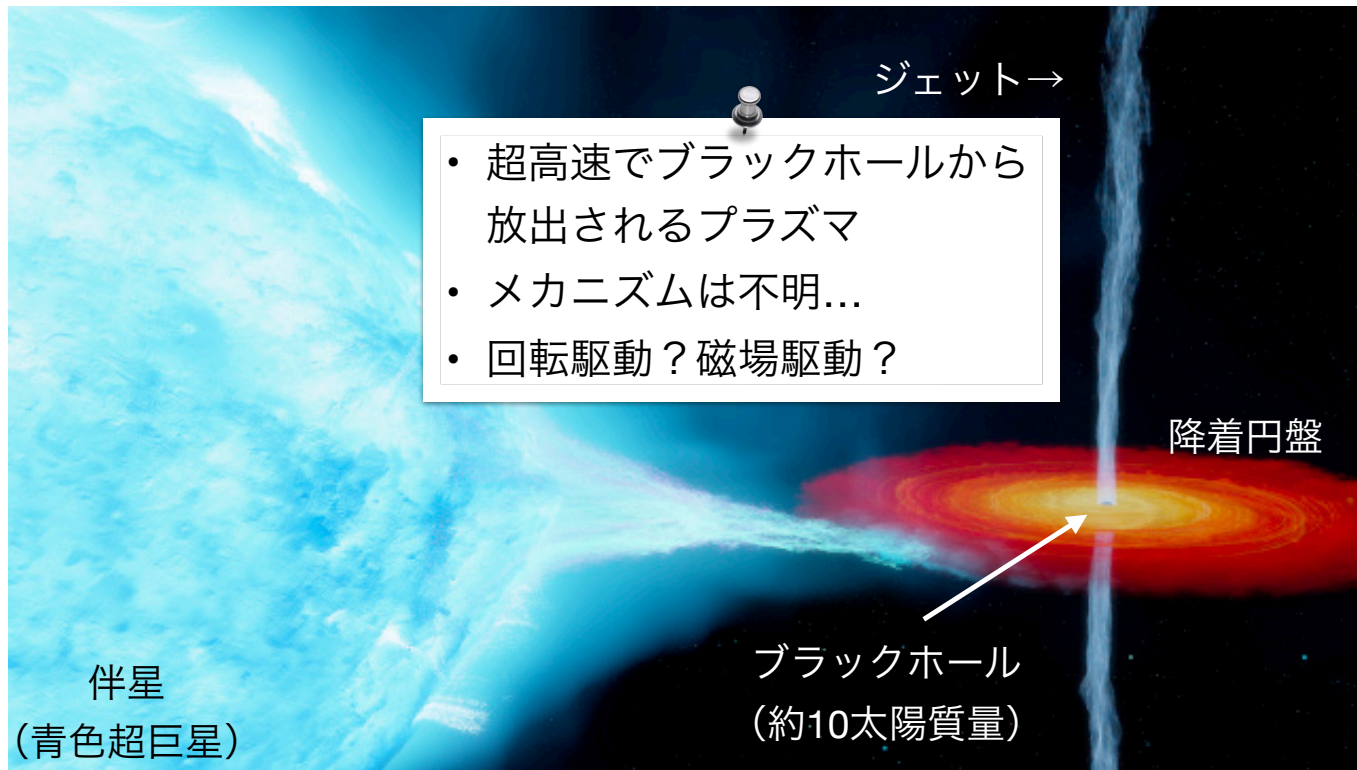
地球を角砂糖くらいまでつぶすのと同程度

10太陽質量のBHが東京上空にあると、、、



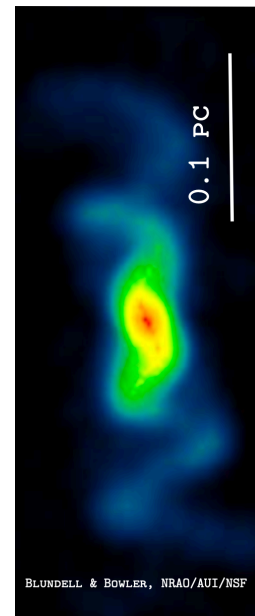
- 重力が強すぎて光も抜け出せない
- ただし、周りの物質は光を発する

ブラックホール

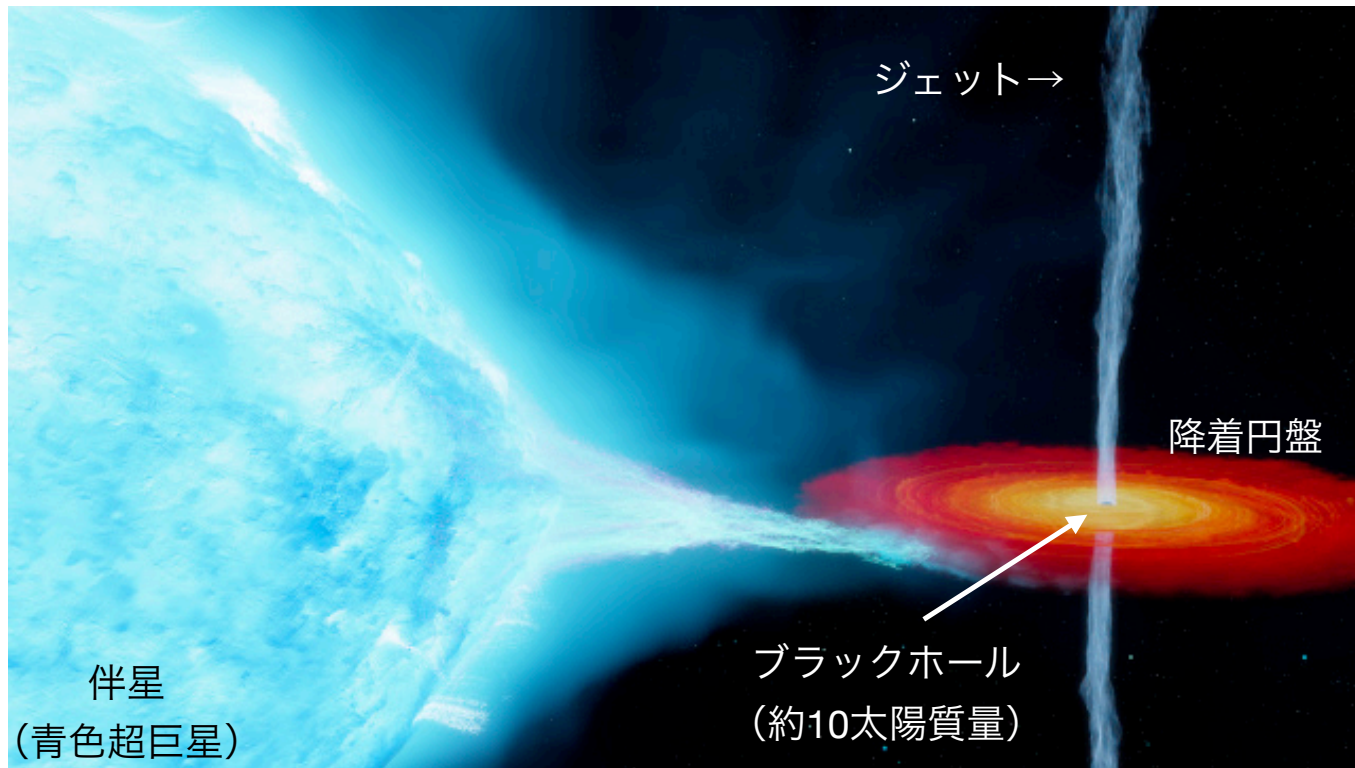


電波観測

光速の26%もの速さの
ジェットが捉えられる

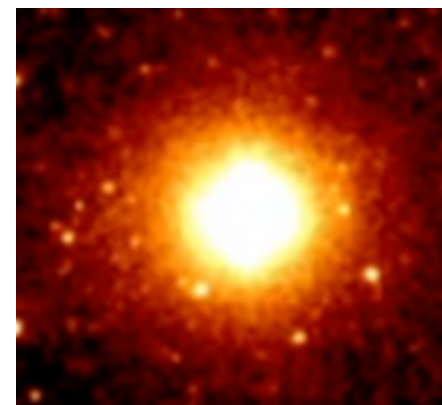


ブラックホール

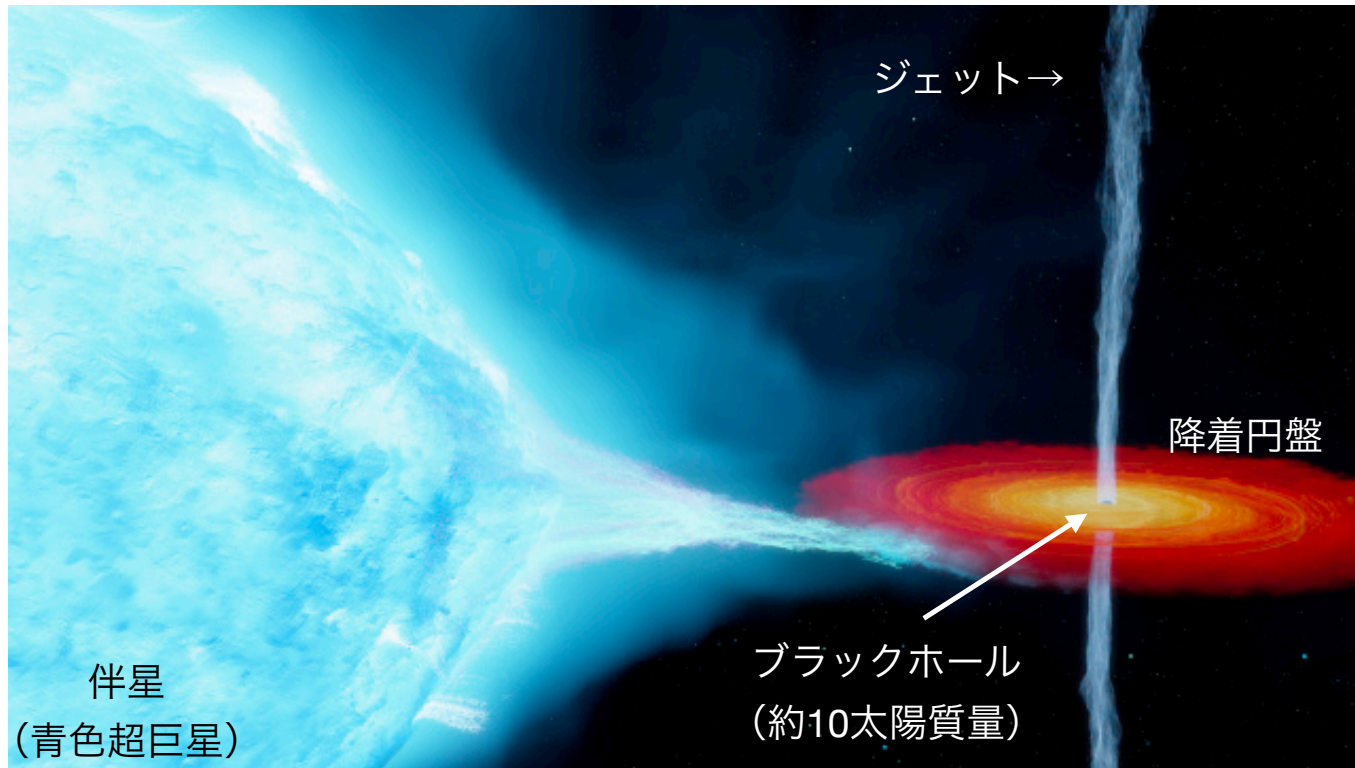


X線観測

高温の降着円盤からの
光が捉えられる

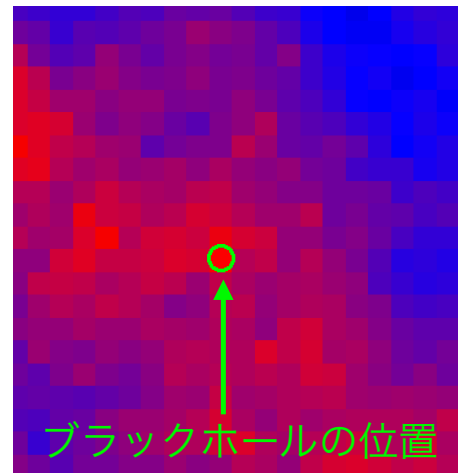


ブラックホール

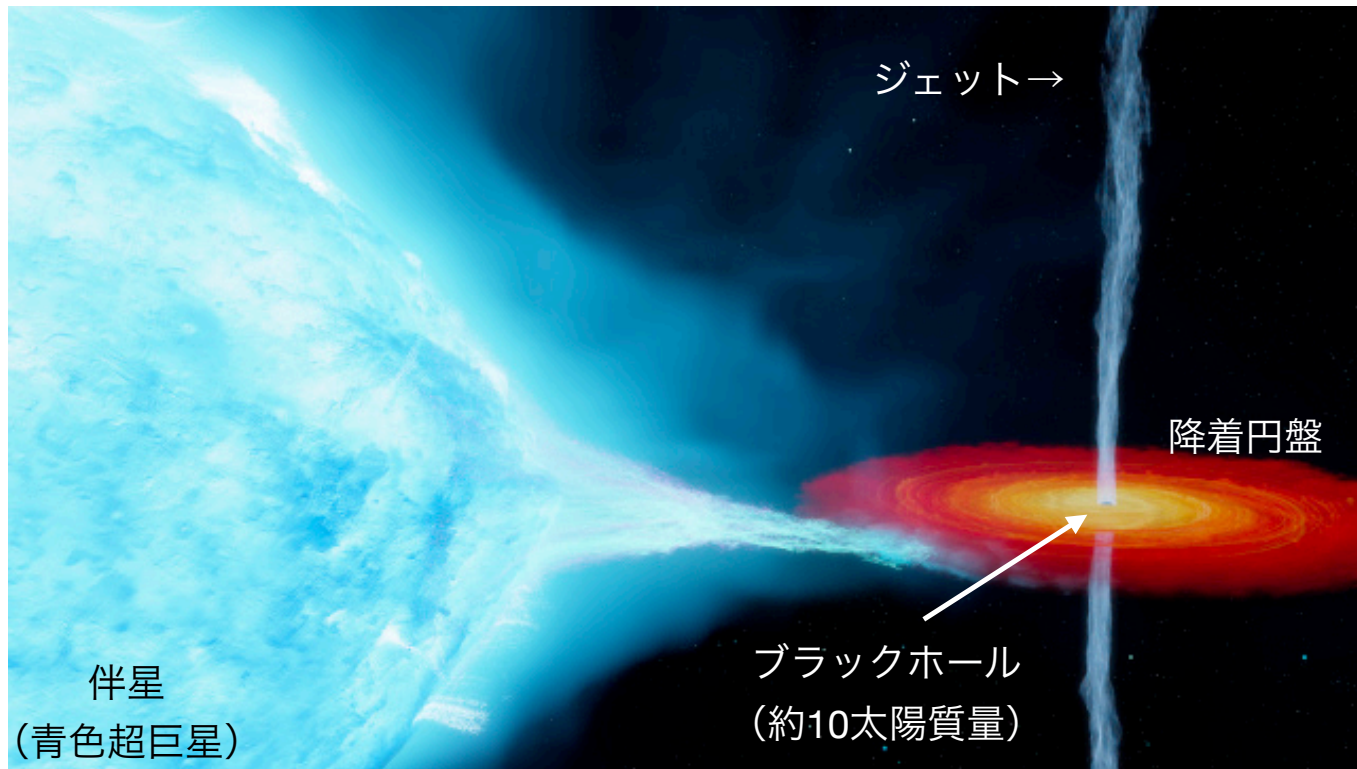


ガンマ線観測

ブラックホールからは
何も出ていない



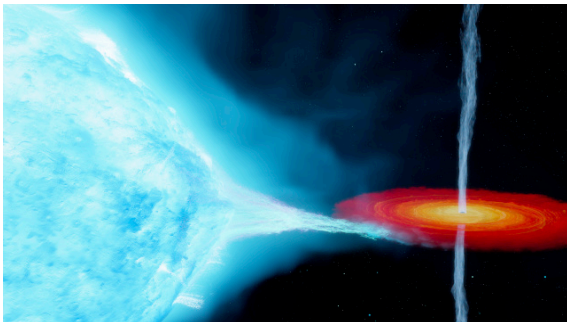
ブラックホール



~100万km

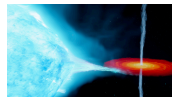
ブラックホール

ズームアウトして、



ブラックホール

ズームアウトして、



ブラックホールジェット (SS 433)


ものすごく
ズームアウトする



ブラック
ホール

ブラックホールジェット (SS 433)

700光年
(10^{16} km)

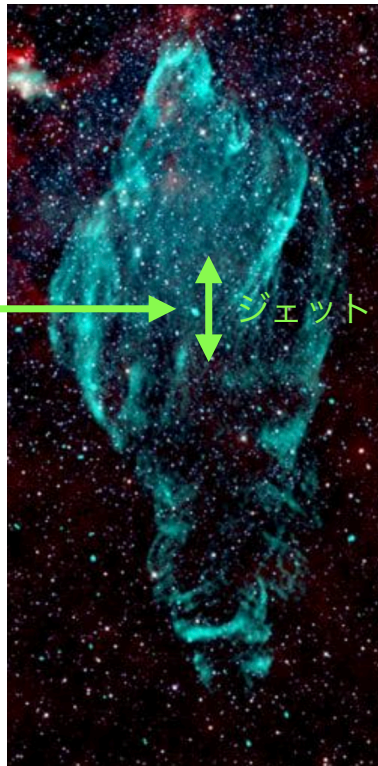

ブラック
ホール

ブラックホールジェット (SS 433)

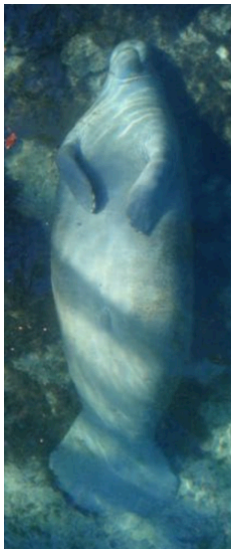
電波ローブ

700光年
(10^{16} km)

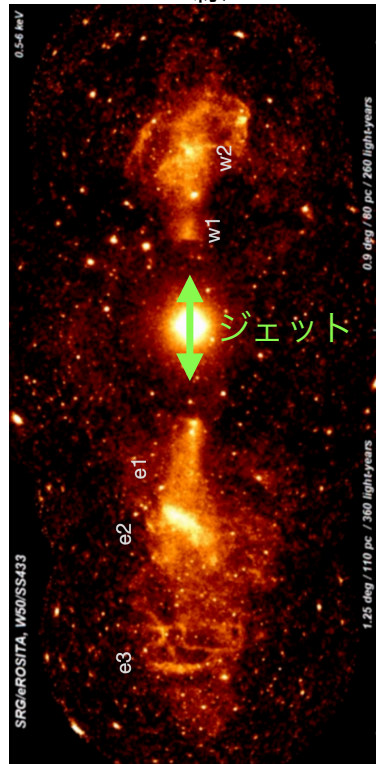
ブラック
ホール



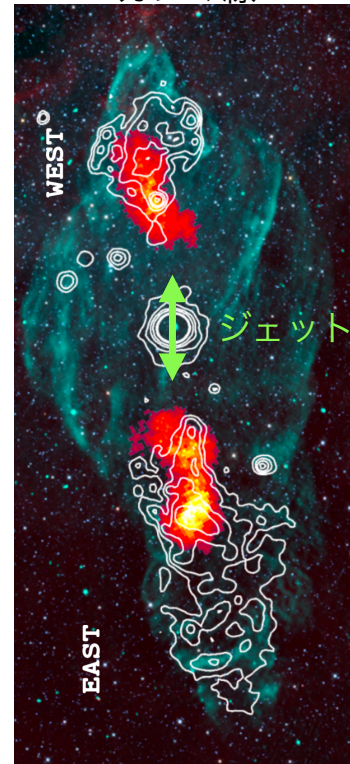
別名:
マナティ星雲



X線

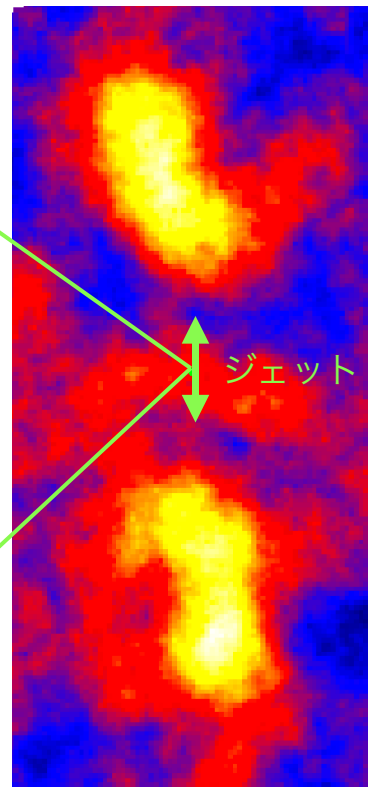
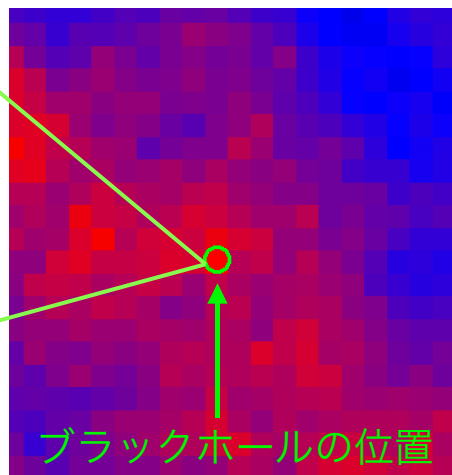
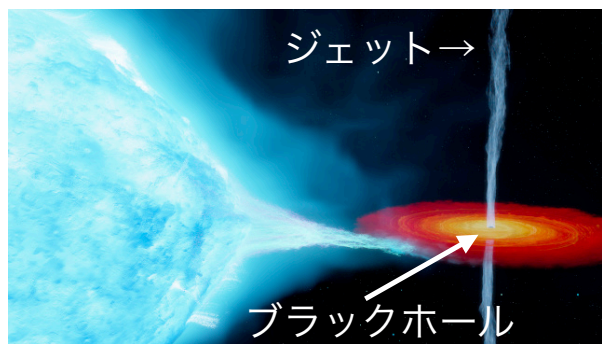


ガンマ線



本日の講演タイトル

超高エネルギーガンマ線で観る ブラックホールの姿




ガンマ線放射

✗ ブラックホール本体

○ ジェットのどこか

→ ジェットが粒子加速の鍵？

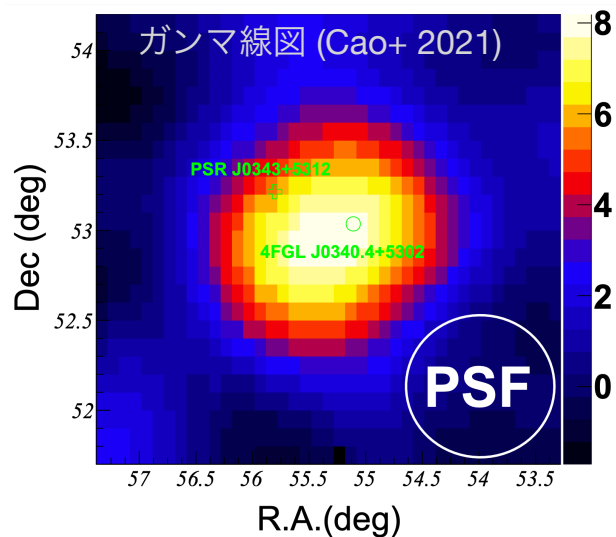


black hole

type A supergiant

正体の分からないガンマ線天体

- ガンマ線観測は、“観測driven”の分野
(新しい望遠鏡や衛星による新しい観測で、新しい発見がある)
- ブラックホールジェットからのガンマ線の発見はここ数年の話
- 他に正体不明のガンマ線天体多数 → **X線・電波観測を実施中**



XMMニュートンX線衛星

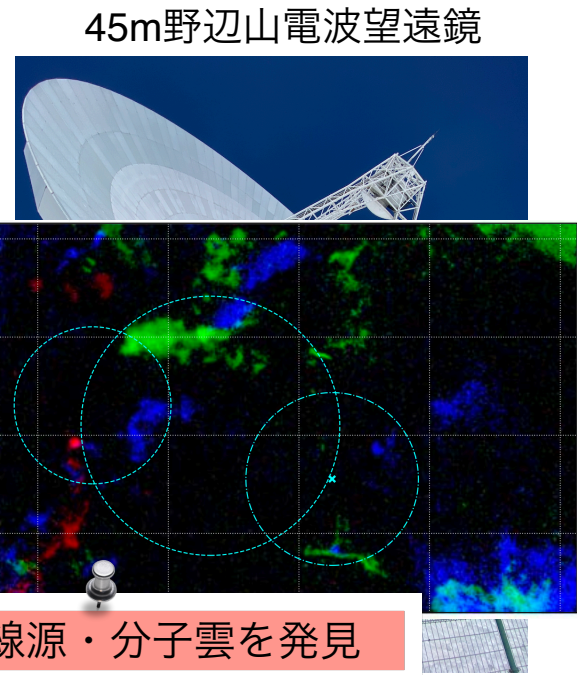
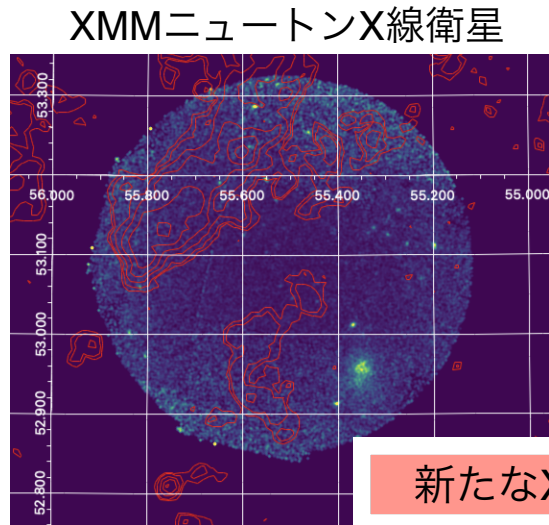
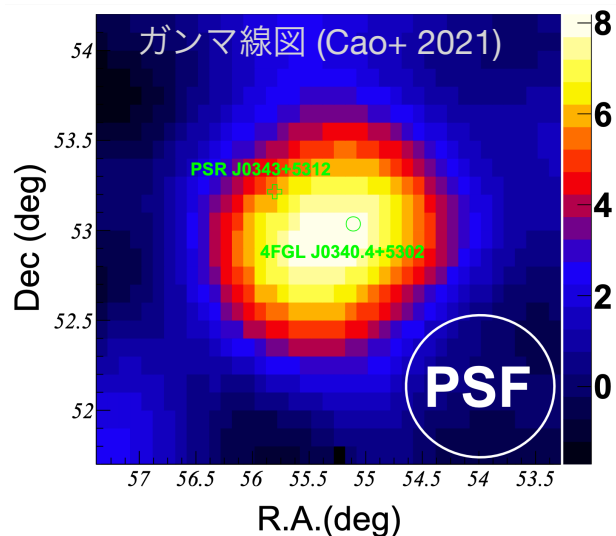


45m野辺山電波望遠鏡



正体の分からないガンマ線天体

- ガンマ線観測は、“観測driven”の分野
(新しい望遠鏡や衛星による新しい観測で、新しい発見がある)
- ブラックホールジェットからのガンマ線の発見はここ数年の話
- 他に正体不明のガンマ線天体多数 → X線・電波観測を実施中



実際に観測・データ取得はどう行う？

主に以下の2通り

1. データ即公開（誰でもすぐにデータ解析ができる）
 2. 観測公募制（書類を書いて観測時間を獲得する。半年~1年後にはデータが公開される）
-

* X線衛星

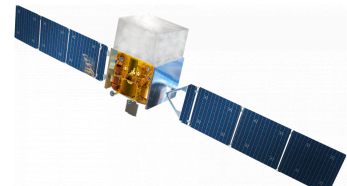
- ・観測公募制
- ・年に一度公募がかかる
(チャンドラ衛星は3月が締切)
- ・応募件数 数百件、採択率15-20%



* ガンマ線

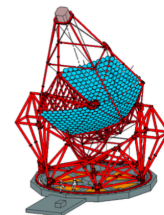
フェルミ衛星

- ・全天モニター型の衛星
- ・データ即公開



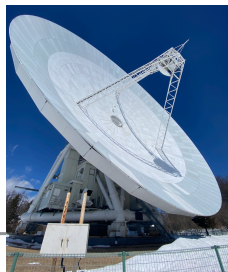
地上望遠鏡

- ・観測公募制
- ・コラボレーション(数百人)に閉じている
- ・CTAOでデータ公開



* 電波望遠鏡

- ・多くが観測公募制
- ・野辺山はチャージ制



ガンマ線の将来計画

CTAO

(Cherenkov Telescope Array Observatory)

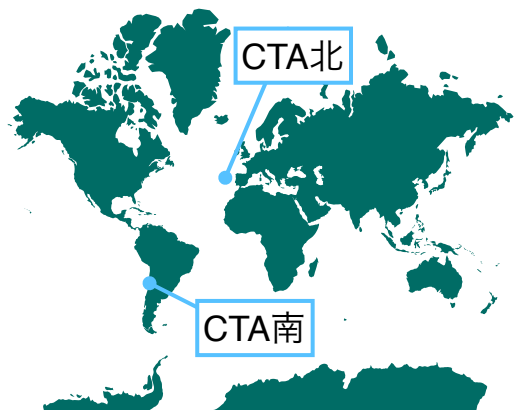
- 北半球サイト：LaPalma (Spain) 0.5km x 0.5 km



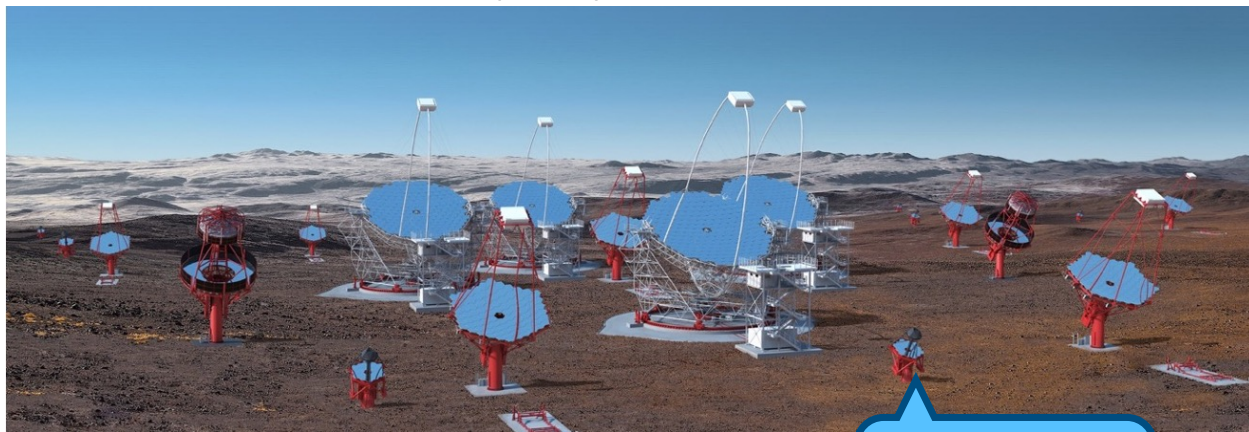
LST (23 mφ)

MST (9.7 mφ)

MAGIC Telescope



- 南半球サイト：Paranal (Chile) 2 km x 2 km



SST (4.3 mφ)

	北 (台数)	南 (台数)	ガンマ線 エネルギー
LST	4	2→4	低
MST	9→15	14→25	中
SST	0	42→70	高

LST: Large-Sized Telescope
MST: Medium-Sized Telescope
SST: Small-Sized Telescope

25か国 1500名以上

CTA-Japan 127名

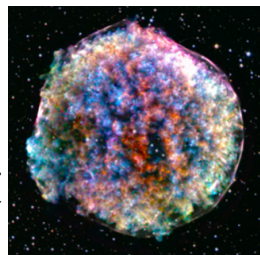


最後に

宇宙には興味深い天体がたくさん

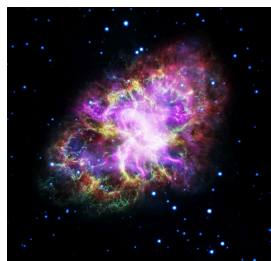


超新星爆発

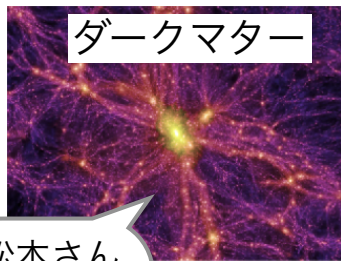


超新星残骸

パルサー
星雲



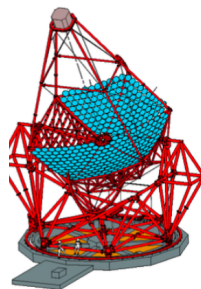
ダークマター



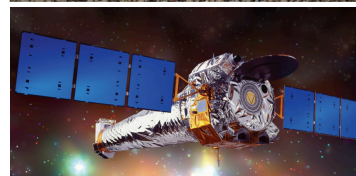
松本さん
の講演

天体を観るのは楽しい

ガンマ線望遠鏡



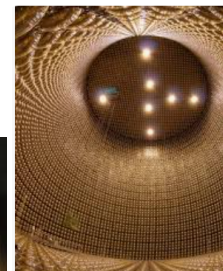
X線衛星



電波望遠鏡



ニュートリノ・
重力波

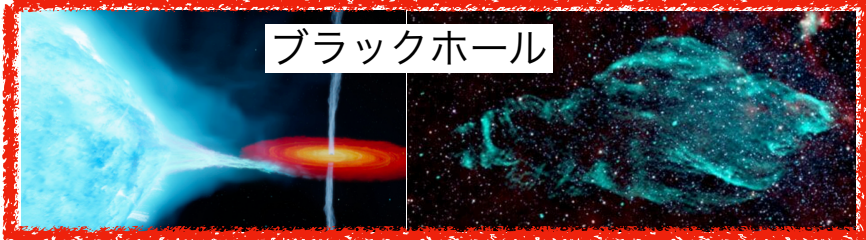


最後に

宇宙には興味深い天体がたくさん

本講演
「ブラックホール x ガンマ線」

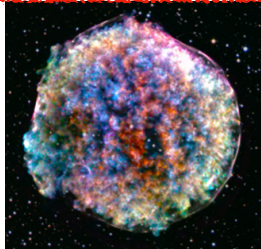
天体を観るのは楽しい



ブラックホール

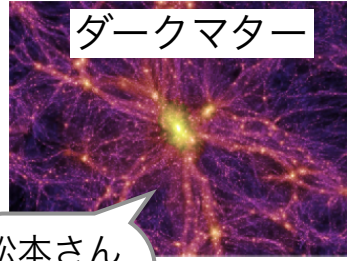


超新星爆発



超新星残骸

パルサー
星雲



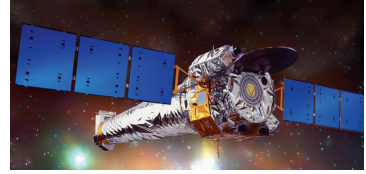
ダークマター

松本さん
の講演

ガンマ線望遠鏡



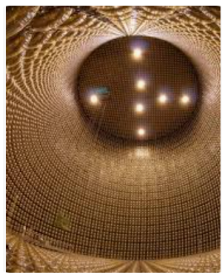
X線衛星



電波望遠鏡



ニュートリノ・
重力波



ご清聴ありがとうございました！