

本日のオンライン講義 (zoom)の進め方:

- 毎週金曜日に、ISASで大学院生を対象として行っている「X線天文学演習」と兼ねています。
  - ISASの講義室から、ハイブリッドで行います。
- 「OneNote」を使います。URLは以下で公開します:
  - [https://1drv.ms/u/s!A1c1UR-unXOMITA\\_GVAX3Yya96k](https://1drv.ms/u/s!A1c1UR-unXOMITA_GVAX3Yya96k)
- あらかじめ準備した画面(スライド)に、手書きで「板書」します。ウェブ上の情報も適宜使います。
  - 手書きでノートを取りながら聴いてください。
  - 電卓を手元に。適宜、計算問題を入れます。
  - 講義中に自由に発言、チャットしてください。おしゃべり、ツッコミ歓迎!
  - 「X線天文学演習」の学生も遠慮なく発言してください。あるいは、こちらで指名します!
- 最後に10分くらい、質問タイムを取ります。
  - 遠慮せずに、声を上げて質問してください。シャイな方はチャットで。。。

本日の講義の内容:

高エネルギー天文学 = 高エネルギー宇宙物理学

- 物理学について
- 宇宙について
- 「高エネルギー」天文学
  - 高エネルギーの電磁波 (X線) について
  - 宇宙における高エネルギー現象について
- 高エネルギー天文学に関わるJAXAの科学衛星

1. 物理学について

自然界における最も基本的な3つの定数は何か?

万有引力定数  $G$  [ $m^3/kg \cdot s^2$ ] =  $kg \cdot m^3/s^2$

プランク定数  $h = \frac{hc}{\lambda}$  [ $kg \cdot m^2/s$ ]

光速  $c = 3 \times 10^8$  [m/s] 対応

$E = \frac{cm^2}{\lambda}$

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

$E = h\nu$

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

$G = 6.67 \times 10^{-11}$  [ $m^3/kg \cdot s^2$ ]

$h = 6.626 \times 10^{-34}$  [ $kg \cdot m^2/s$ ]

2. 物理学理論に、これら3つの定数が現れるか?

$G$  ニュートン力学 (長距離で正しい物理の理論)

$h$  量子力学 (短距離で正しい物理の理論)

$c$  特殊相対論 (相対論的運動)

相対論的運動 (相対論的運動)

量子力学 (量子力学)

特殊相対論 (特殊相対論)

一般相対論 (一般相対論)

量子重力 (量子重力)

1. 宇宙の起源

2. ブラックホール

3. 「長さ」、「質量」、「時間」がこれら3つのパラメータで表されることを示し、それらのプランク長、プランク質量、プランク時間の物理的な意味を説明せよ。

$\frac{hc}{G} \approx \left[ \frac{kg \cdot m^2/s \cdot m/s}{m^3/kg \cdot s^2} \right] \approx (kg)^2$

$\sqrt{\frac{hc}{G}} \approx (kg)$  → プランク質量

$\frac{1.05 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{6.67 \times 10^{-11}} [kg]$

$\approx 2.2 \times 10^{-8} [kg]$

自然界に存在するもっとも小さいブラックホール質量

同様に プランク長  $\sqrt{\frac{Gh}{c^3}} \approx 1.6 \times 10^{-35} [m]$  → 自然界で最も短い長さ

プランク時間  $\sqrt{\frac{Gh}{c^5}} \approx 5 \times 10^{-44} [sec]$  → 自然界で最も短い時間

自然界のすべての物理量 (たとえば電流、磁束密度などが)、長さ、質量、時間の組み合わせで表されることに留意せよ!

質量Mの天体 (物体) のシュバルツシルト半径は、 $2GM/c^2$ で与えられる。プランク長と、「プランク質量を持つ粒子のシュバルツシルト半径」を比較せよ。

$\frac{2G}{c^2} \sqrt{\frac{hc}{G}} \approx 2 \sqrt{\frac{hG}{c^3}} \approx 2 \sqrt{\frac{hG}{c^3}} = \text{プランク長}$

自然界における最も基本的な3つの定数すべてを含む物理法則 (式) を示せ。

→ 量子重力を見てみて下さい (尚待、詳細はこれからお話し!)

物体の

量子重力

4. ホーキングによると、質量Mのブラックホールは以下の温度を持って熱輻射をし、いずれ蒸発する。ブラックホールの質量を太陽質量で規格化し、その温度を見積もれ。

$T = \frac{hc^3}{8\pi kGM}$

$= \frac{hc^3}{8\pi kGM} = \frac{hc}{8\pi kGM/c^2} = \frac{hc}{8\pi k \left( \frac{2GM}{c^2} \right) \left( \frac{M}{M_\odot} \right)}$

$= \frac{2.0 \times 10^7}{10 \times 10^{30} \times 10^7} \times \frac{1}{2 \times 10^7} \times \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{-1}$

$= \frac{2 \times 10^7}{(4 \times 10^{37}) \times (2 \times 10^7)} \times \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{-1} [K] = 6 \times 10^{-7} \left( \frac{M}{M_\odot} \right)^{-1}$

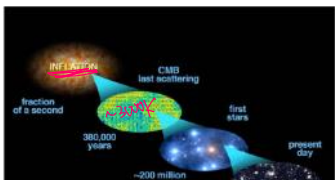
以下の物理量を暗記しておくに便利。光速  $c \approx 3 \times 10^8$  cm/s,  $hc \approx 2000$  eV Å,  $k = 1.38 \times 10^{-16}$  erg/K,  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-12}$  erg (太陽のシュバルツシルト半径 =  $2GM_\odot/c^2 \approx 3 \text{ km}$ ,  $M_\odot$  は太陽質量)。

現時点で、ブラックホールからのホーキング輻射は観測されているか?

いい

5. 宇宙について

宇宙は138億年前にインフレーションで誕生したと考えられている。インフレーションモデルは(まだ)仮説。このモデルによると、宇宙は誕生した瞬間に、原子の大きさが太陽系の大きさになるほど、指数関数的に膨張した。



宇宙で最も短い時間

138億年

1年  $\approx \pi \times 10^7$  sec

$138 \times 10^8 \times 3 \times 10^7$  sec

$\approx 400 \times 10^5 \approx 4 \times 10^{17}$  sec

$\approx 3 \times 10^{17}$  sec

もっと短い  $\Rightarrow 4 \times 10^{17}$  [sec]

もっと短い  $\Rightarrow 4 \times 10^{44}$  [sec]

$\approx 10^{61}$

宇宙の大きさ (10<sup>26</sup> m)

レポート

の件数

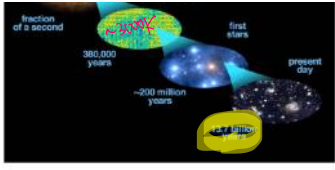


Fig. 4. Stages in the evolution of the Universe. From Task Force On Cosmic Microwave Background Research, National Academies 2005. <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2006-1.pdf>

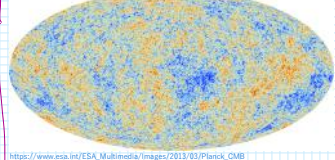
$$13.9 \times 10^9 \times 3 \times 10^7 \text{ (sec)} \approx 4.17 \times 10^{17} \text{ (sec)}$$

Handwritten notes:  $\sim 10^{17}$  秒,  $\sim 3 \times 10^{10}$  年

- 宇宙誕生時のインフレーションの証拠を見つけることが、現代の天文学のもっとも大きな課題のひとつ。  
→ JAXAの衛星が世界で初めて、それを成し遂げるかも! (後述)
- インフレーション後のビッグバンの名残である宇宙背景放射 (Cosmic Microwave Background) が観測されている
  - 宇宙誕生から約38万年後、宇宙の大きさが今の約1/1000のとき、宇宙は約3000 Kの黒体放射に満ちていた。宇宙が約1000倍に膨張して、温度が約1/1000になった (宇宙赤方偏移)
- 宇宙全体から等方的に約2.7 Kの黒体放射が観測されている。
  - 宇宙背景黒体放射の発見 → 1978年ノーベル物理学賞
  - <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1978/pre-8ss-release/>
- 宇宙黒体放射の正確な温度と温度ゆらぎの測定 → 2006年ノーベル物理学賞
  - ノーベル賞アナウンスと同時に、popular informationとadvanced informationが発表されます。
  - これらはいへん優れたテキストなので、ぜひ読んでみてください。
  - <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/popular-physicsprize2006-1.pdf>
  - <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2006-1.pdf>

宇宙の年齢は宇宙背景放射の温度ゆらぎデータに宇宙論モデルを適用して、正確に計算できる。  
→ 宇宙の年齢は138億年

ヨーロッパのPlanck衛星による宇宙背景放射の温度ゆらぎ → 宇宙モデル → 宇宙の年齢 = 138億年



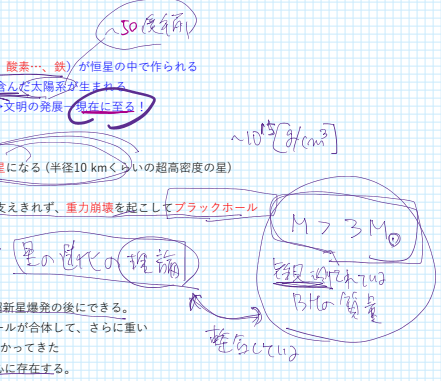
$$2.7 \text{ K} \pm 10^{-6} \text{ K} (?)$$

- 宇宙の歴史を簡単におさらい:
  - インフレーション → ビッグバン (水素とヘリウムしかなかった) → 初代星・初代銀河の誕生
  - 宇宙には数千億の銀河があり、各銀河は数千億の星から成る。銀河と銀河の間 (銀河間空間) はスカスカ (とって良い)。

すばる望遠鏡超高分野主焦点カメラによるアンドロメダ銀河(M31) 私たちが住んでいる天の川銀河も、このような渦巻き銀河

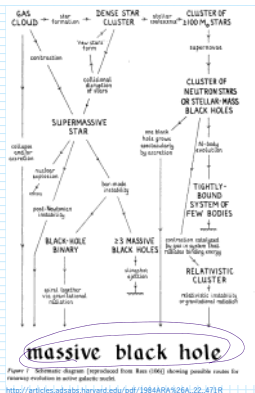


- 恒星の中で熱核融合反応による元素合成 → 重元素 (炭素、窒素、酸素...、鉄) が恒星の中で作られる
  - 超新星爆発で重元素が星間空間にまき散らされる → 重元素を含んだ太陽系が生まれる
  - 太陽と惑星が形成される → 地球上で生命が進化 → 人類の誕生 → 文明の発展 → 現在に至る!
- 重い星の最後には、超新星爆発が起きる。星のコアの質量が太陽質量の5倍より小さいときに中性子星になる (半径10 kmくらいの超高密度の星) 中性子星は、中性子間の核力で支えられている 星のコアの質量が太陽質量の3倍より大きい時は、核力で支えきれず、重力崩壊を起こしてブラックホールになる



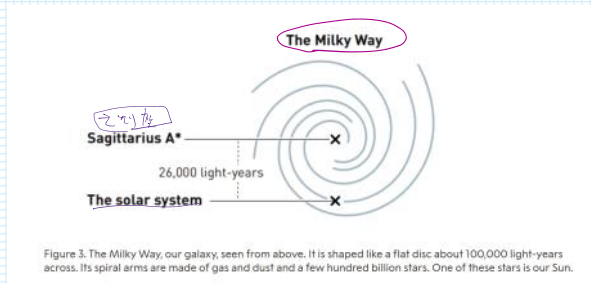
- ブラックホールには、質量に応じて二種類がある
  - 恒星質量ブラックホール: 太陽の約3倍から数十倍の質量。超新星爆発の後にできる。最近、二つの恒星質量ブラックホールが合体して、さらに重いブラックホールが生まれることがわかってきた
  - 超巨大ブラックホール: 太陽質量の数百万倍以上。銀河の中心に存在する。

1.1.6 外



私たちの銀河(天の川銀河)は典型的な「渦巻銀河」。その中心に太陽の400万倍の質量のブラックホールが存在する。→ 2020年ノーベル物理学賞!

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/popular-information/>  
<https://www.nobelprize.org/uploads/2020/10/advanced-physicsprize2020.pdf>



ノーベル賞を受賞したGenzel博士のホームページから、天の川銀河中心のブラックホール周辺の星の運動:  
<https://www.mpe.mpg.de/6590570/Stellar-Orbits>

- 星の軌道が中心付近で、急に変わりますね?そこに、光を出さない強い重力源があるわけです。
- 星の運動から重力源の質量を計算すると、太陽質量の400万倍、とわかりました。このような天体はブラックホール以外にあり得ません。

3. 高エネルギー天文学について

- a. 高エネルギーの電磁波 (X線) を使う天文学
- b. 宇宙における高エネルギー現象を扱う天文学

「可視光」の天文学は人類の歴史と共にある。  
 観測技術が進むにつれ、20世紀後半から、人間の目では見えない「電波」天文学、「赤外線」天文学、「紫外線」天文学、「X線」天文学、「ガンマ線」天文学の研究が進んできた。

X線は大気によって吸収されてしまうので、X線天文学のためには、ロケットや人工衛星を使う必要がある。

1keVのX線に対する密度。酸素の「光電吸収断面積」は、約 $10^{23}$  cm<sup>2</sup>である。大気圧、室温における空気の密度を  $1.2 \times 10^{21}$  g/cm<sup>3</sup> として、1 keVのX線の「平均自由行程」(X線が吸収されるまでに進む平均の距離) を見積もれ。

$$\left(\frac{N}{V}\right) \times \left(\frac{1}{\lambda}\right) \times (1.7 \times 10^{23} \text{ cm}^2) = (2.3) \times 10^{27} \text{ cm}^{-1}$$

$$\frac{1}{5 \times 10^{27} \text{ cm}^{-1} \times 10^{10} \text{ cm}^2} \approx \frac{1}{5} \text{ cm} \approx 2 \text{ mm}$$

Limit

高エネルギーのX線  
 > 10 keV  
 ⇒ 気圧で吸収  
 して

1 keVのX線に対して、大気は不透明であることが分かった。「レントゲン撮影」では、なぜ人体の身体をX線が通過できるのか?



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:X-ray\_of\_Wilhelm\_Roentgen's\_hand\_by\_Albert\_von\_Koenigshofer.jpg

While 20 keV is a typical energy for soft tissue X-rays, for example mammograms, higher energies (around 150 keV) are used for hard tissues, for example bone.

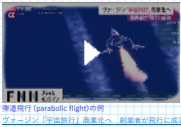
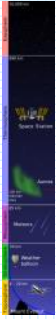
http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1448441/



- 「宇宙空間」の一般的な定義は？

7100km

[https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n\\_line](https://en.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1n_line)



## The Nobel Prize in Physics 2002

二二一九年



X線天文学のハイライト

"The Nobel Prize in Physics 2002 was divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshiba "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos" and the other half to Riccardo Giacconi "for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources."

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/summary/>  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2002/popularinformation/>

- 「高エネルギー」には二つの異なる状況がある

- 熱的エネルギーが高い状態：
  - 物質と放射がほぼ熱平衡にあり、温度が上昇できる状態。
  - X線領域で、高温プラズマからの黒体放射やスペクトル輝線が放出される。
- 非熱的エネルギーが高い状態：
  - 光速近くまで加速された電子から、シンクロトロン放射が広い範囲の電磁波(電波からガンマ線まで)が放出される場合。

- 高エネルギー天体の例

- ブラックホール、中性子星：
  - 中性子星表面やブラックホール周辺の円盤が、X線領域で黒体放射を出す
  - 磁場がある場合、電子が加速されて、広い波長でシンクロトロン放射を出す
- 超新星、超新星残骸：
  - 大きな星の爆発とその残骸。熱的な放射、磁場がある時はシンクロトロン放射
- ガンマ線バースト：
  - 巨大な星の爆発(ハイパーノバ)、または中性子星同志の合体
- 銀河団プラズマ：
  - X線を出す高温プラズマが重力ポテンシャルに閉じ込められている

- ブラックホールは代表的な高エネルギー天体
- ブラックホールに物質が落ちていくとき(質量降着)、重力エネルギーが解放されて電磁波に変換されると、ブラックホール「周辺」が明るい天体として観測される。

ブラックホールの「シュバルツシルト半径」は一般相対性理論から導かれるが、「ブラックホール」は、脱出速度が光の速さになったような天体(遠くからモノが自由落下したとき最終的に光の速さになる天体)と思っても良い。

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = 0$$

$$v = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

$$c = \sqrt{\frac{2GM}{r}} \Rightarrow r = \frac{2GM}{c^2}$$

太陽と地球のシュバルツシルト半径を覚えておきましょう。  
 → 3km, 9mm

質量Mの物体が質量Mのブラックホールに解放される重力エネルギーはどの程度になるか？それを核エネルギーのエネルギー効率と比較せよ。

$$\sim \frac{GM}{r} \sim \frac{GM}{\frac{2GM}{c^2}} \sim \frac{1}{2} mc^2 \sim mc^2$$

核エネルギー 1%以下





質量Mの物体が質量Mのブラックホールに解放される重力エネルギーはどの程度になるか？それを核エネルギーのエネルギー効率と比較せよ。

$$\sim \frac{GMm}{r} \sim \frac{GMm}{\frac{2}{3}GM} \sim \frac{1}{2} mc^2 \sim mc^2$$

(核融合は1%以下)  
 mc<sup>2</sup>  
 質量エネルギー

ブラックホールの質量降着は非常に大きなエネルギー源

#### 4. 高エネルギー天文学に関するJAXAの科学衛星

なぜ、(わざわざ)人工衛星を打ち上げて、宇宙から宇宙を観測するのか？

1. 宇宙からのX線や赤外線は地球大気で吸収されてしまうから (X線天文衛星、赤外線天文衛星「あかり」など)
2. 「基線長 (望遠鏡間の距離) を稼ぐことができるから (「はるか」, ASTRO-G)
3. 地球に邪魔されずに全天を観測することができるから (LiteBIRDなど)

##### X線天文衛星

打ち上げロケットの能力と共に衛星が大型化 (高性能化) していったことに注目して下さい。

1979年 はくちょう <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spaceraft/past/hakucho.html>

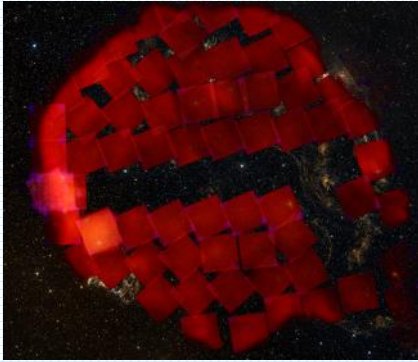
1983年 てんま <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spaceraft/past/tenma.html>

1987年 ぎんが <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spaceraft/past/ginga.html>

1993年 あすか <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spaceraft/past/asuka.html>

2005年 ずさく <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spaceraft/zero/suzaku.html>

ずさくによる超新星残骸「白鳥座ループ」のCCDモザイク画像



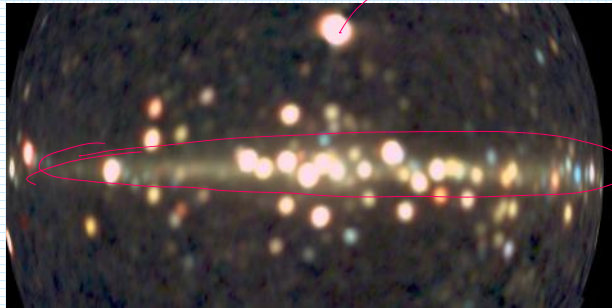
JUDO2も用いて可視光画像の上にずさくのCCDモザイク画像を重ねた。

可視光で明るくないところに高温プラズマがあり、X線では明るく光っていることに注意

(私が中心になって開発しているDARTSのJUDO2を使って表示しています。いろいろいじって、宇宙に親しんでみてください。)

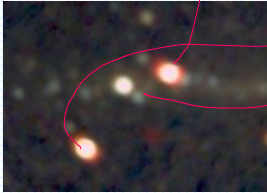
2009年 MAXI <http://iss.jaxa.jp/iboop/equipment/ef/maxi/>

ISS (国際宇宙ステーション) に搭載された全天X線モニター



MAXIによる天の川銀河面のX線画像。明るく光っている天体の多くはブラックホールか中性子星

MAXIで見た白鳥座にあるCyg X-1 (ブラックホール)、X-2 (中性子星)、X-3 (ブラックホールか中性子星) を可視光と比べてみましょう。



Cyg X-1の可視光対の天体を確認してみてください。



2016年 ひとみ <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spaceraft/past/hitomi.html>

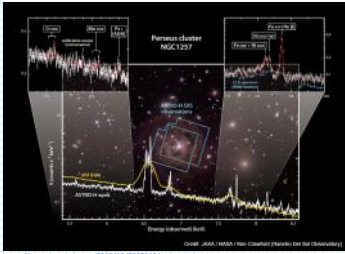
世界初の「X線マイクロカオリメーター」を搭載

ひとみによるペルセウス銀河団からの高温プラズマの観測

過去最高の分解能によるX線スペクトル観測を実現

[https://www.riken.jp/medialibrary/giken/jp/press/2013/20130404\\_2fig1.jpg](https://www.riken.jp/medialibrary/giken/jp/press/2013/20130404_2fig1.jpg)





「銀河団の高温ガスの化学組成は、これまでもX線天文衛星によって精力的に調べられてきました。しかしこれまでの観測機器では分解能が不十分で、強い鉄の特性X線とニッケルの特性X線が混ざっていました。そのため元素量を見積もっても正確に元素量を測定できていたのか、という疑問が付きまとっていました。…ASTRO-H搭載の軟X線分光検出器で取得されたX線スペクトルは、エネルギー決定精度（スペクトルの分解能）が劇的に向上しました。その結果、これまでの検出器では分解できなかった、鉄とニッケルの特性X線を分離し、さらに微弱なクロムやマンガンの特性X線を検出することにも成功しました。この精密X線分光により、鉄属の元素量を初めて正確に測定することに成功したのです。」

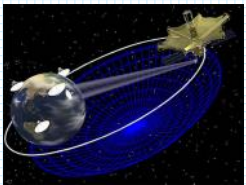
[NASAが作成した「ひとみ」の広報ビデオ\(YouTube\)](#)

### 電波天文衛星

1997年はるか <http://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/ast/haruka.html>

地球上の電波望遠鏡と同時に観測を行い、電波を合成させる(干渉計)  
天体望遠鏡の角度分解能は、「観測波長/望遠鏡の口径」に比例する  
大きな望遠鏡で、短い波長で見ると、細かいものが良く見える。

干渉計の角度分解能は、「観測波長/基線長」に比例する。  
よって、電波望遠鏡を宇宙に持って行けば、基線長を稼げる。

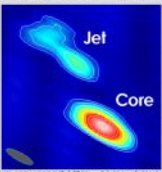


「『はるか』と地球上のアンテナ群とを組み合わせた、最長3万kmのVSOPの陣は、1609年のガリレオの望遠鏡の十倍倍、人の瞳の百倍倍です。」

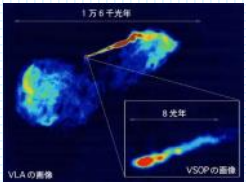
「はるか」は、当時では史上最高の角分解能(視力)で、多くの明るい超巨大ブラックホールを観測した

### 宇宙で最も「明るい」銀河

ここでは、「はるか」で観測された、「最も」輝度が高い銀河を紹介いたします。ここでは「最も」といいますが、観測距離から計算された絶対輝度が最も高いことを示しています。絶対輝度は距離が不明なままでもワット数が最も多いことを表しています。



「PKS 1921-293からやってくる電波、5兆度以上の温度を持った物体から出る電波と同じ『明るさ』であることがわかりました。これは、PKS 1921-293が、今までに人類が観測した天体としては、最も『明るい』天体であることを示しています。」→非熱的なシンクロトロン放射を見ている

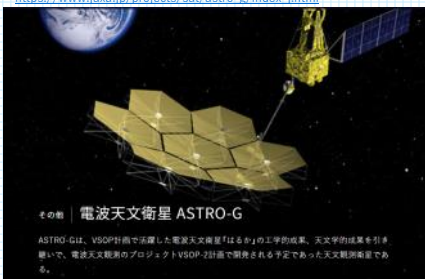


楕円銀河M87の画像。全体はアメリカの電波干渉計VLAによるもの。拡大図が「はるか」によるもの。  
中心には巨大ブラックホールがあると考えられている。

### ASTRO-G計画 (2011年中止)

「はるか」よりも大面積のアンテナ、高周波の観測で、M87中心のブラックホールの直接撮像をめざした

[https://www.iaxa.jp/projects/sat/astro\\_g/index.html](https://www.iaxa.jp/projects/sat/astro_g/index.html)



<http://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/others/astro-g.html>

### Event Horizon Telescope (EHT)の紹介

ASTRO-Gでやっていたことを「Event Horizon Telescope (EHT)」に





<http://www.isas.jaxa.jp/missions/spacecraft/others/astro-g.html>

### XRISM (2022年度打ち上げ予定)

[短寿命で終わってしまった「ひとみ」の後継機](#)

「X線マイクロカロリメータ」による、詳細なX線分光を行う



<http://xrism.isas.jaxa.jp/>

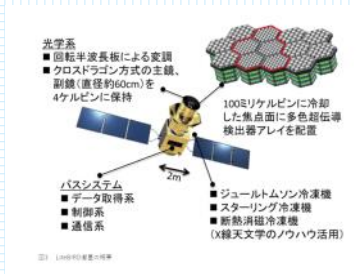
### LiteBIRD (2020年代後半)

宇宙誕生時のインフレーションの証拠を探る

インフレーション時に発生した原始重力波は、宇宙背景放射中に特徴的な偏光パターン

(Bモード偏光)を引き起こす。

それを検出できれば、インフレーションがあったことの証拠となる。

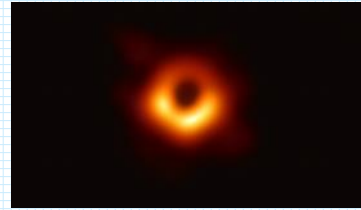


<http://litebird.jp/eng/>

<http://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/161007.html>



EHT: 地上で最大の基線長、地上観測の限界まで短い波長による電波干渉法により、有史以来最高の角分解能を達成し、M87中心のブラックホールの撮



<https://eventhorizontelescope.org/press-release-spoil-16-2019-announcing-first-image-black-hole>  
ブラックホール周辺の高エネルギープラズマがシンクロトン放射で輝き、ブラックホール自身は電磁波を出さない

設計群  
に初めて成功

電波を出している