

X線でブラックホールを見る

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
海老沢 研

X線天文学

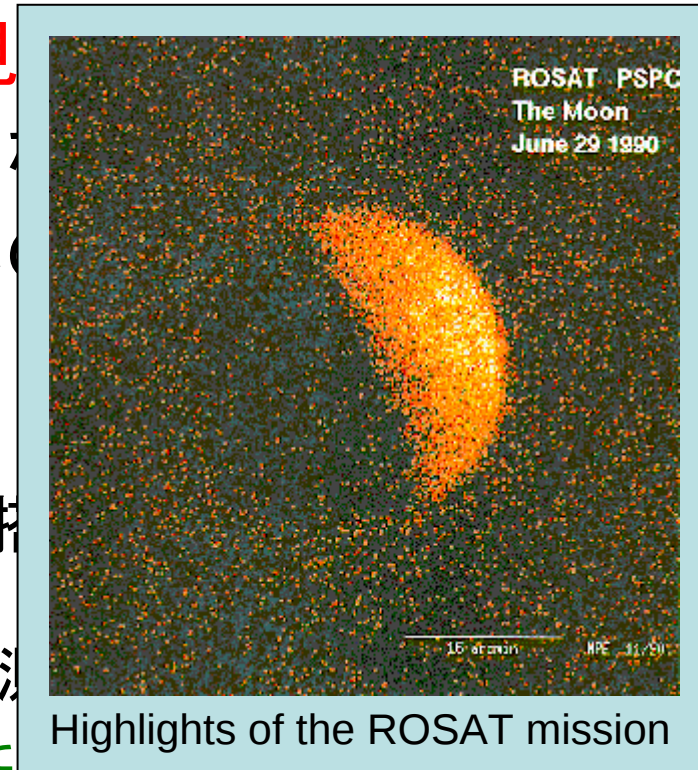
- 宇宙からやってくるX線を観測して行う天文学研究
 - ~ 0.1 keV (キロエレクトロンボルト) ~ 100 keVのX線を使う
 - レントゲン撮影に使うのは数十keVのX線
 - 高エネルギー=硬X線 (hard X-rays)
 $\Leftrightarrow$ 低エネルギー=軟X線 (soft X-rays)
 - Hard, softの区別は定性的、相対的
- X線は大気で吸収されてしまう
 - それによって生命が保護されている！
 - 大気圏外で観測する必要がある
 - 宇宙開発と共にX線天文学が発展

X線天文学

- X線天文学は40年以上の歴史がある
 - X線の測定装置は洗練されている
 - 高精度の反射鏡とCCDカメラなど
 - 可視光の望遠鏡と同等のX線「写真」が得られる
- X線光子ひとつひとつの到達時刻とエネルギーがわかる
 - 暗いX線天体を数週間観測して~10個(!)のX線光子を検出
- X線分光により、X線放射、反射物質の分析ができる
 - 炭素、窒素、酸素、鉄等のスペクトル線の観測
 - Spring8(シンクロトン放射光)によるX線分析と同じ原理

1962年 X線天文学の誕生

- レントゲンが1895年、X線を発見
- 宇宙からのX線は大気圏外に出た
- 1962年以前は、X線を出す天体はなかった
- 1962年6月18日...
 - ジャコーニらが放射線検出装置を打ち上げ
 - 月による太陽からのX線反射の観測
 - 月のX線は暗すぎて観測できなかった
 - 1990年になって高感度のROSAT衛星で初めて観測できた
 - 全天で一番明るいX線源Sco X-1を偶然発見
 - X線天文学の誕生！



PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 9

DECEMBER 1, 1962

NUMBER 11

EVIDENCE FOR X RAYS FROM SOURCES OUTSIDE THE SOLAR SYSTEM*

Riccardo Giacconi, Herbert Gursky, and Frank R. Paolini
American Science and Engineering, Inc., Cambridge, Massachusetts

and

Bruno B. Rossi
Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts
(Received October 12, 1962)

Rossi Prize (アメリカ天文学会)
Rossi XTE (RXTE) 衛星

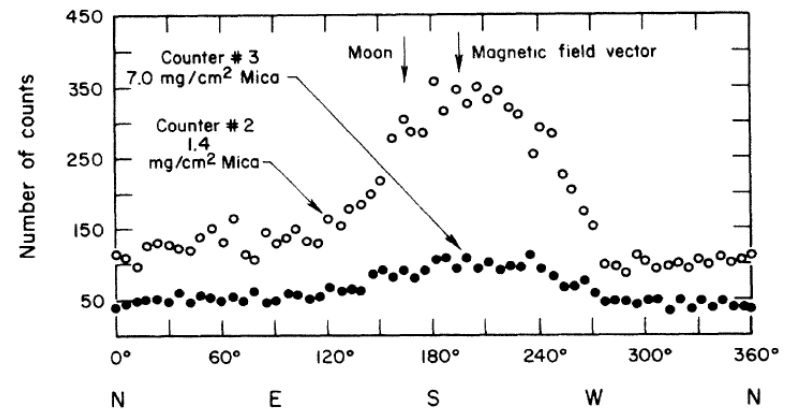


FIG. 1. Number of counts versus azimuth angle.
The numbers represent counts accumulated in 350 seconds in each 6° angular interval.

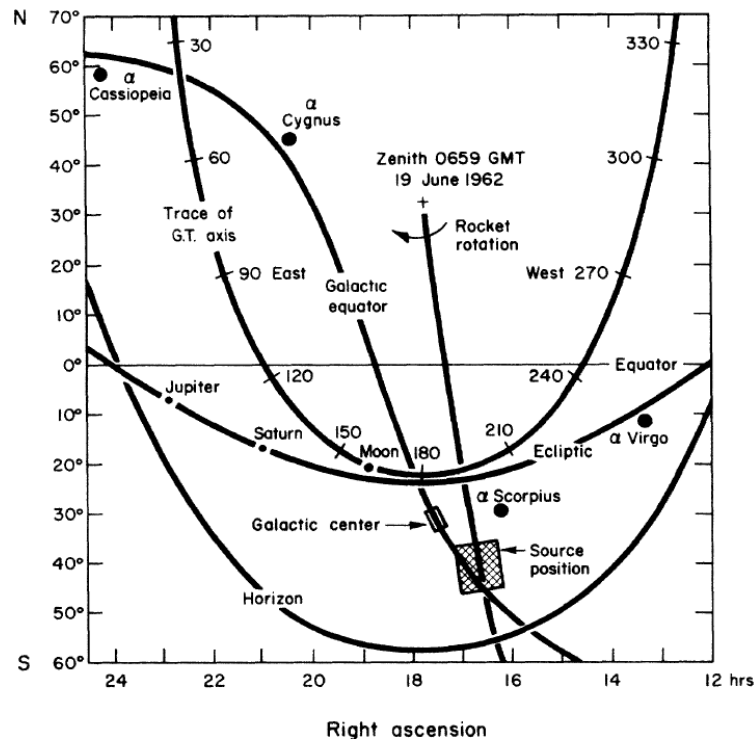


FIG. 2. Chart showing the portion of sky explored by the counters.



The Nobel Prize in Physics 2002

"for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos"



Raymond Davis Jr.

🕒 1/4 of the prize
USA

University of Pennsylvania
Philadelphia, PA, USA

b. 1914



Masatoshi Koshiba

🕒 1/4 of the prize
Japan

University of Tokyo
Tokyo, Japan

b. 1926



Riccardo Giacconi

🕒 1/2 of the prize
USA

Associated Universities Inc.
Washington, DC, USA

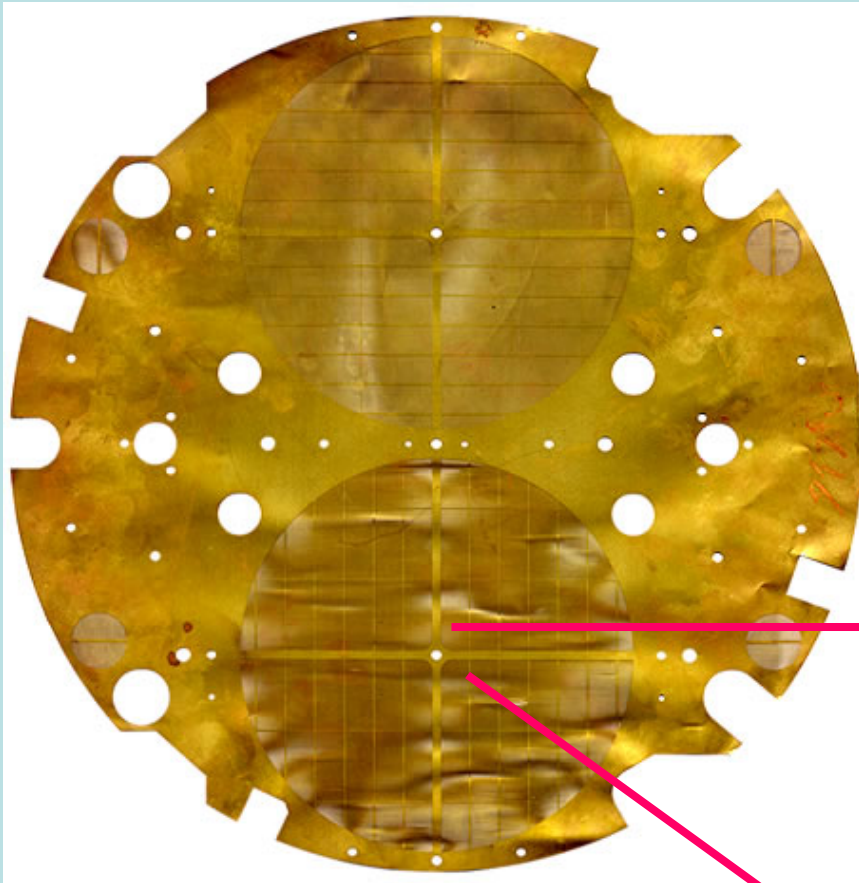
b. 1931
(in Genoa, Italy)

"for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources"

初期のX線天文学

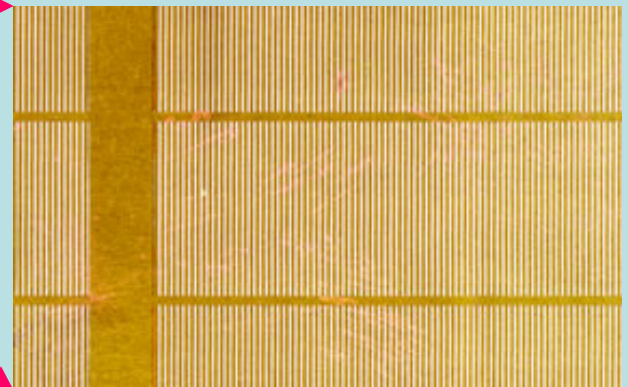
- 宇宙開発の進歩
 - 1957年、最初の人工衛星スプートニク(ソ連)打ち上げ
 - 1958年、アメリカのエクスポローラ1号
 - 各国から人工衛星が次々と打ち上げられる(おおすみ,1970年)
 - スペースからの宇宙観測の黎明期
- 人工衛星以前はロケットと気球によるX線観測の時代
 - 宇宙からのX線を検出する「実験物理学」
 - 日本も早くから宇宙実験に参加

初期のX線天文学



ひのとり衛星搭載
すだれコリメーター

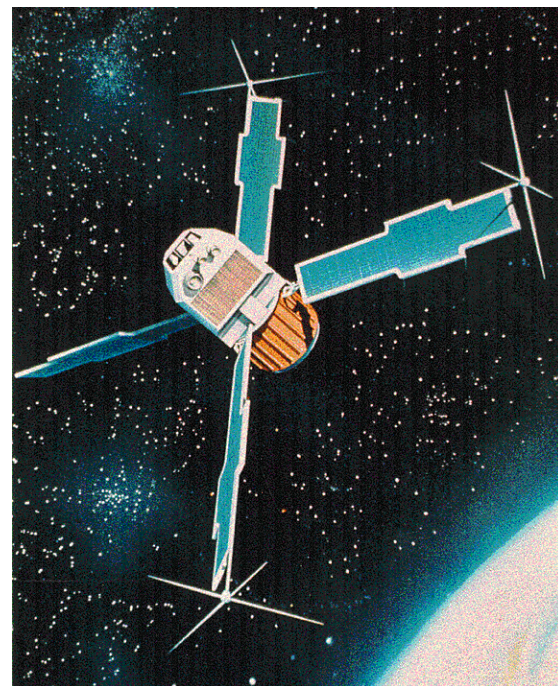
拡大図



– Cyg X-1はブラックホール

1970年Uhuru衛星(アメリカ)打ち上げ

- 世界最初のX線天文衛星
- ケニア沖から打ち上げ、スワヒリ語で「希望」
- すだれコリメーターを搭載して全天観測
- 339個のX線天体を発見
- 本格的なX線天文学の幕開け



1970年Uhuru衛星(アメリカ)打ち上げ

Uhuruカタログ、第4版(最終版) ソース名は4U****+/-****

No. 4, 1978

FOURTH UHURU CATALOG

409

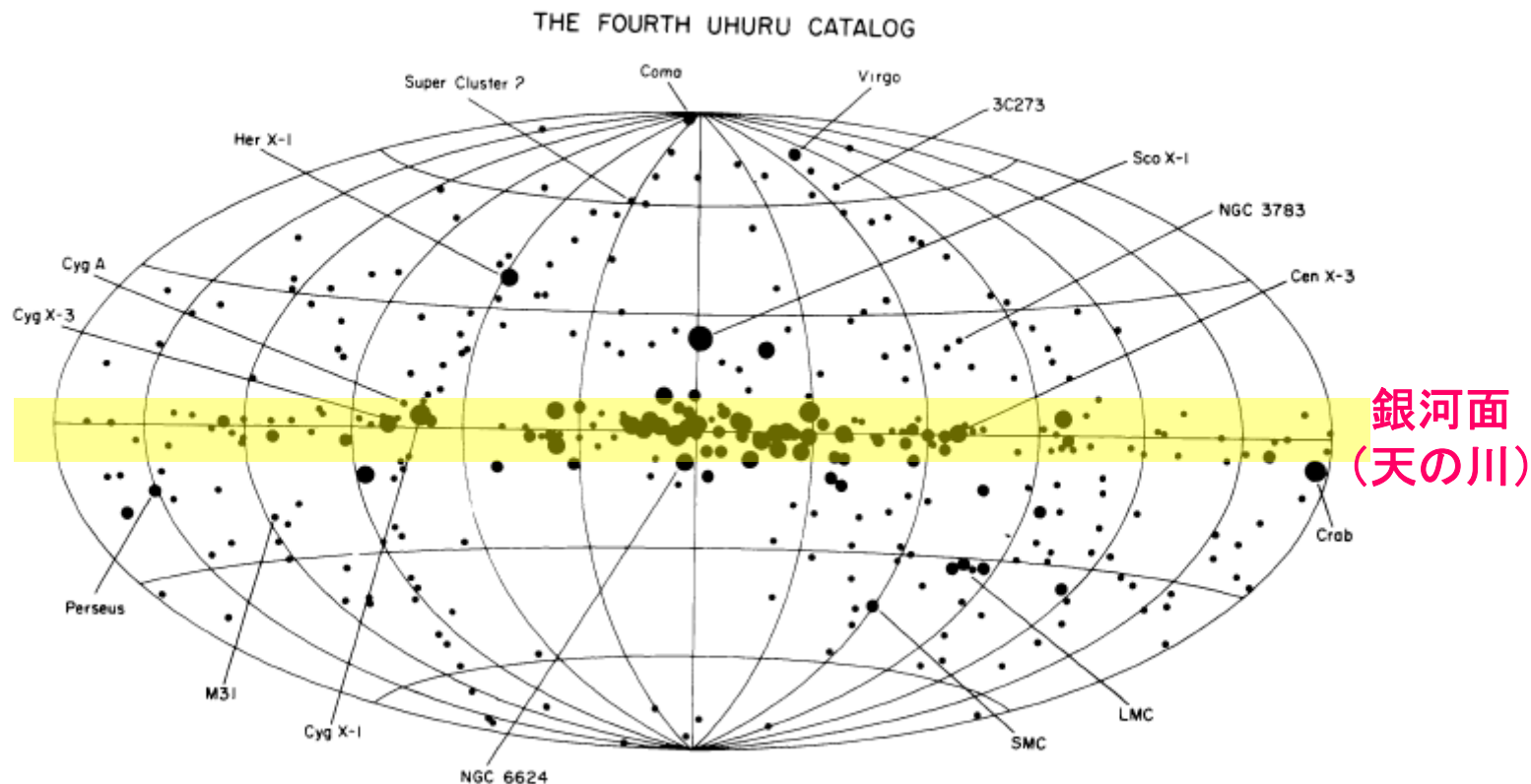


FIG. 5.—The sources listed in Table 1 are displayed in galactic coordinates. The size of the symbols representing the sources is proportional to the logarithm of the peak source intensity.

- ほとんどが銀河系(天の川)内の中性子星かブラックホール
- そのほかに銀河、活動的銀河中心核、銀河団からX線を発見⁰

ブラックホールとは？

- 「とっても」重くて、「とっても」小さな星
- 「これよりは小さくならない」星
- どのくらい重くてどのくらい小さければブラックホールと言うのか？

重力の話

- すべての星は重力を持っている
 - ぼくたちは重力で地球にくっついている！
 - 星の重力 → 星の重さ ÷ (星の半径)²
 - 質量M,半径rの星の重力= GM/r^2
重力ポテンシャル= $-GM/r$
- G=万有引力定数
- 星の半径がどんどん小さくなると...
 - 星の重力はどんどん強くなる！

重力の話

- 星の重力がどんどん強くなると...
 - モノが落ちるときの速さはどんどん速くなる
 - モノが星から離れるのがどんどんむずかしくなる

地球の重力

- ボールを上に向けて見ましょう
 - 速ければ速いほど高く上がる
- ボールを高いところから落としてみましょう
 - 高ければ高いほど速くなる
- 地球の「脱出速度」
 - 運動エネルギーとポテンシャルエネルギーが等しい
(無限遠方で速度=0になる)
 $\frac{1}{2}mv^2 = GMm/r$, $v=(2GM/r)^{1/2}$
 $G=6.67 \times 10^{-11} \text{Mm}^2\text{kg}^{-2}$, $M=5.97 \times 10^{24}\text{kg}$, $R=6378\text{km}$
 - v =秒速11キロメートル(時速4万キロメートル)
 - 1時間で地球を1周するくらいの速さ
- それより速いボールは地球からにげ出してしまう！
- 脱出速度=無限に高いところからボールを落としたときの速さ
 - (もし空気がなければ、の話です)

地球をブラックホールにするには？

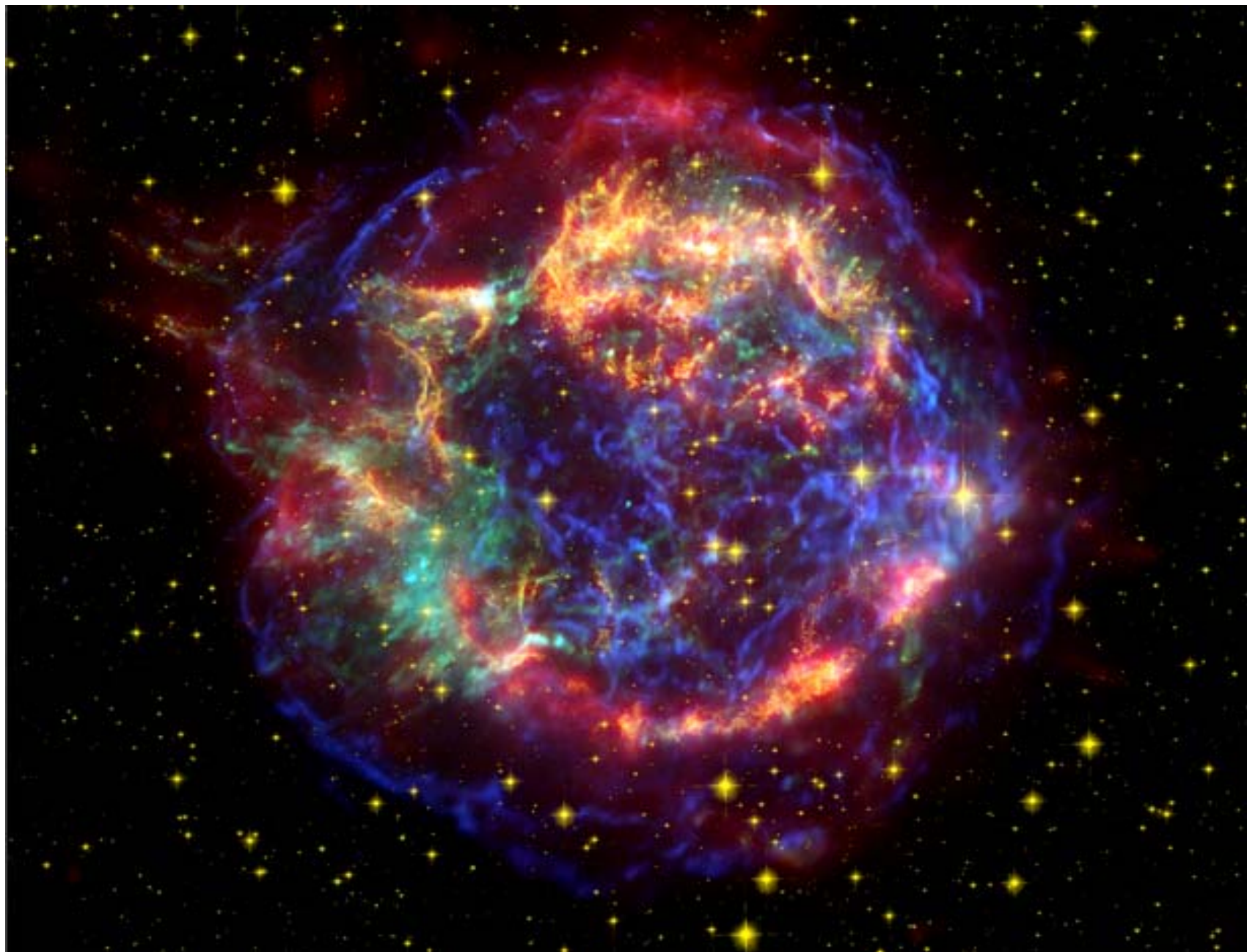
- 地球をどんどん小さくしていきましょう
 - どんどん重力が強くなる
- 逃げ出すのがどんどんむずかしくなる
 - 地球の脱出速度がどんどん高くなる
- 大事な自然の法則
 - 「光よりも速いものはない」
 - 光の速さは秒速30万キロメートル
 - 1秒で地球を7回半まわる

地球をブラックホールにするには？

- 脱出速度=光の速さとなる地球の半径は？
 - c を光速として、 $c=(2GM/r)^{1/2}$
 - $r=2GM/c^2$ この半径をシュバルツシルド半径と言う
 - $r=2 \times 6.67 \times 10^{-11} \times 5.97 \times 10^{24} / (3 \times 10^8)^2 = 0.009\text{m}$
 - 地球の脱出速度が光の速さになる！
 - 地球にモノが落ちたときの速さが光の速さ
 - 光の速さじゃないと地球から逃げられない
- 光より速いものはないから...
- 地球は半径9mmよりは小さくならない！
- 半径9mmの地球はブラックホールになる

しかし...

- 地球を半径9mmまで押しつぶす力はない
- 地球はブラックホールにはなれない

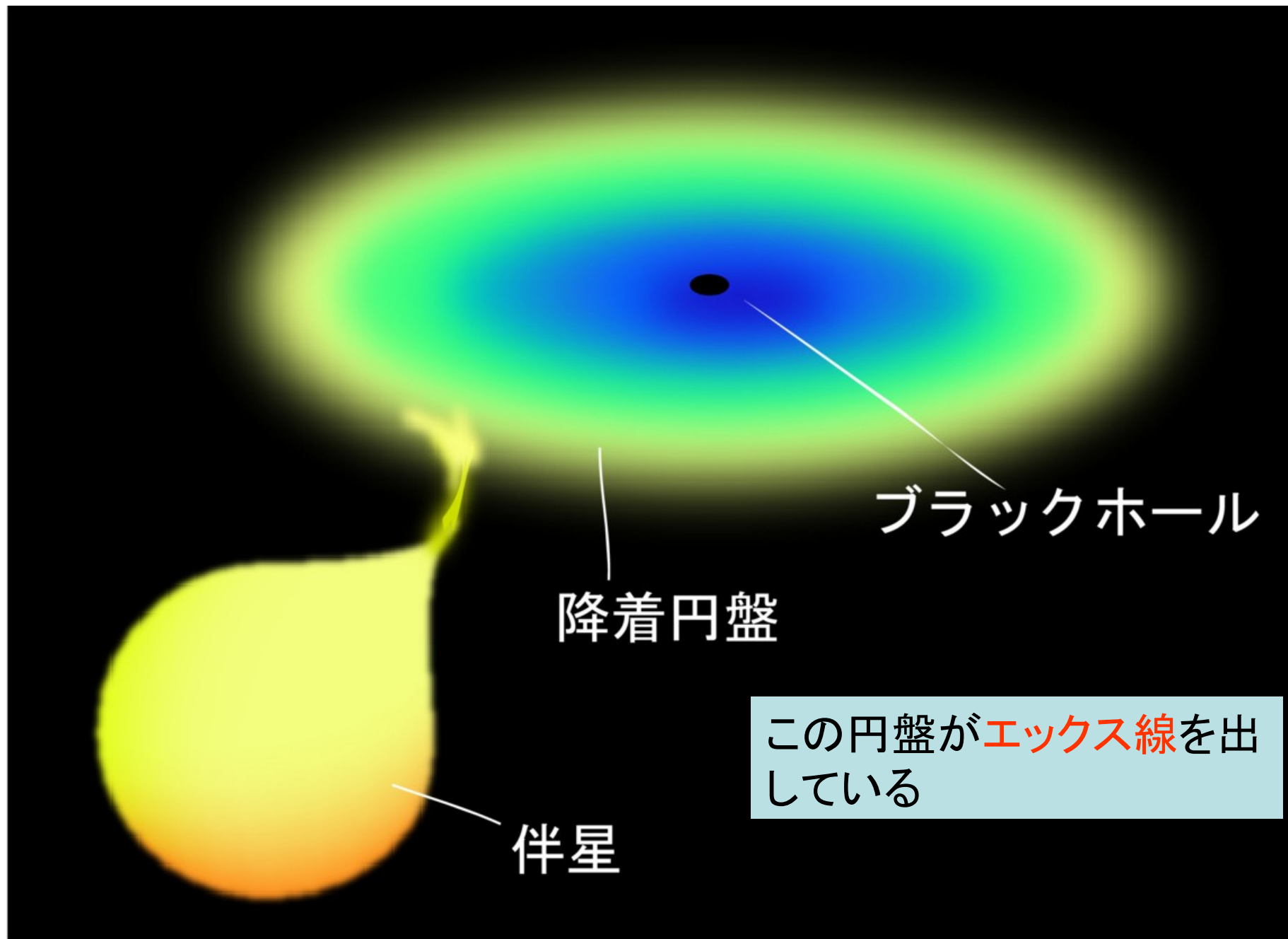


超新星爆発の約320年後の姿(カシオペアAのX線写真)

ブラックホールはどこにある？

(2) 巨大ブラックホール

- 巨大ブラックホールが銀河の中心にある
- どうやってできたかはよくわかっていないが、ブラックホールがあるのは間違いない
 - その重力が周りの星に及ぼす影響からわかる
- 私たちの銀河の中心にあるブラックホールの質量=太陽の260万倍

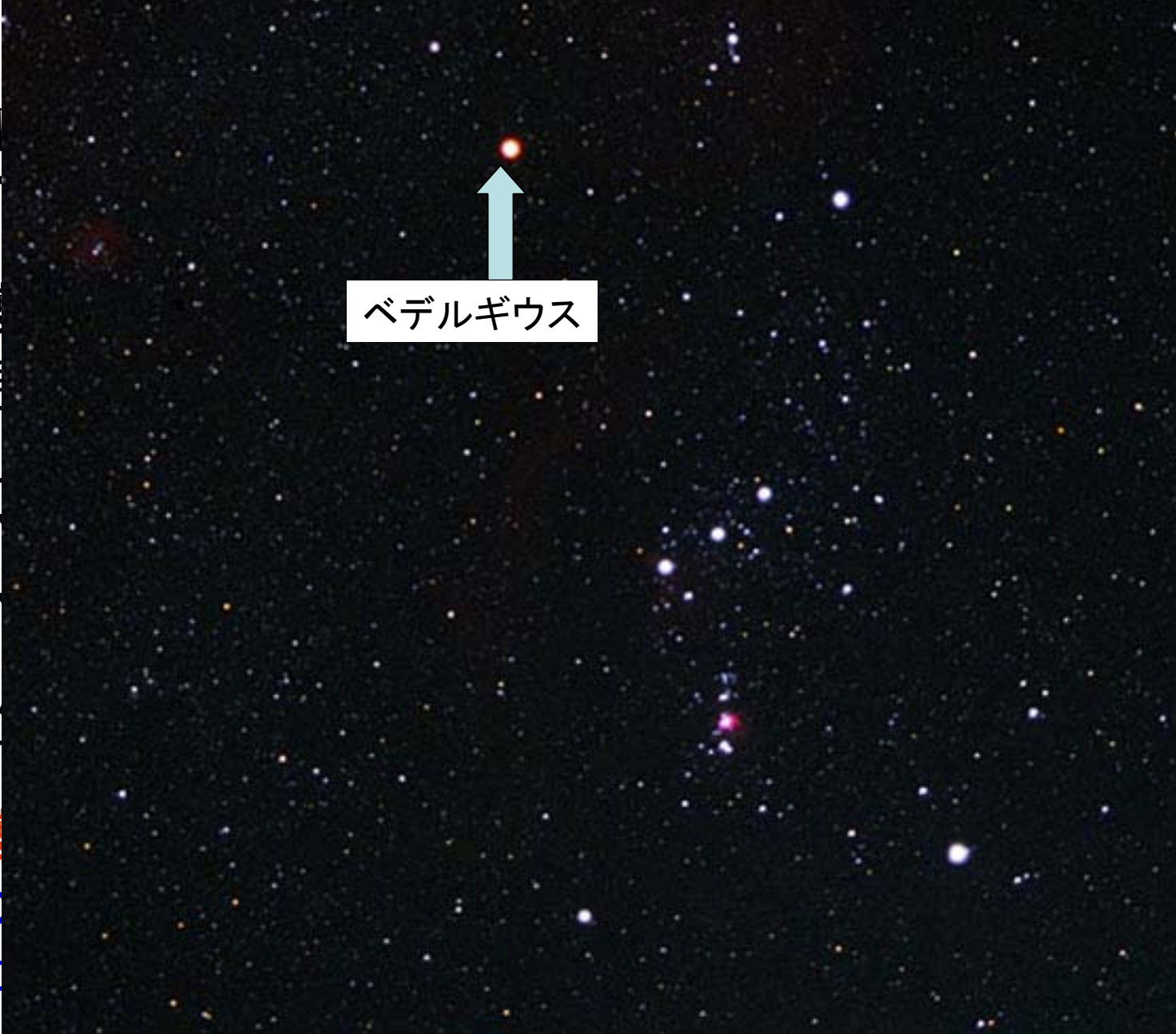


円盤はどうやってエックス線を出す？

- ブラックホールの回りで、円盤はほとんど光の速さで回っている
- 両手をこすり合わせてみましょう
 - 「まさつ熱」で温かくなってくる
- ブラックホールの回りの円盤で、まさつ熱が生じる
- 円盤の温度は一千万度から一億度になる！

円盤はと

- 星は温度
- 太陽の温
 - 黄色く
- 赤っぽい
- 白っぽい
- もっと温
- 線を出す
- 一千万度
 - 人間の
 - 大気に



ベテルギウス

どうやってエックス線を出す星を見つける？



X線を観測する装置を作る

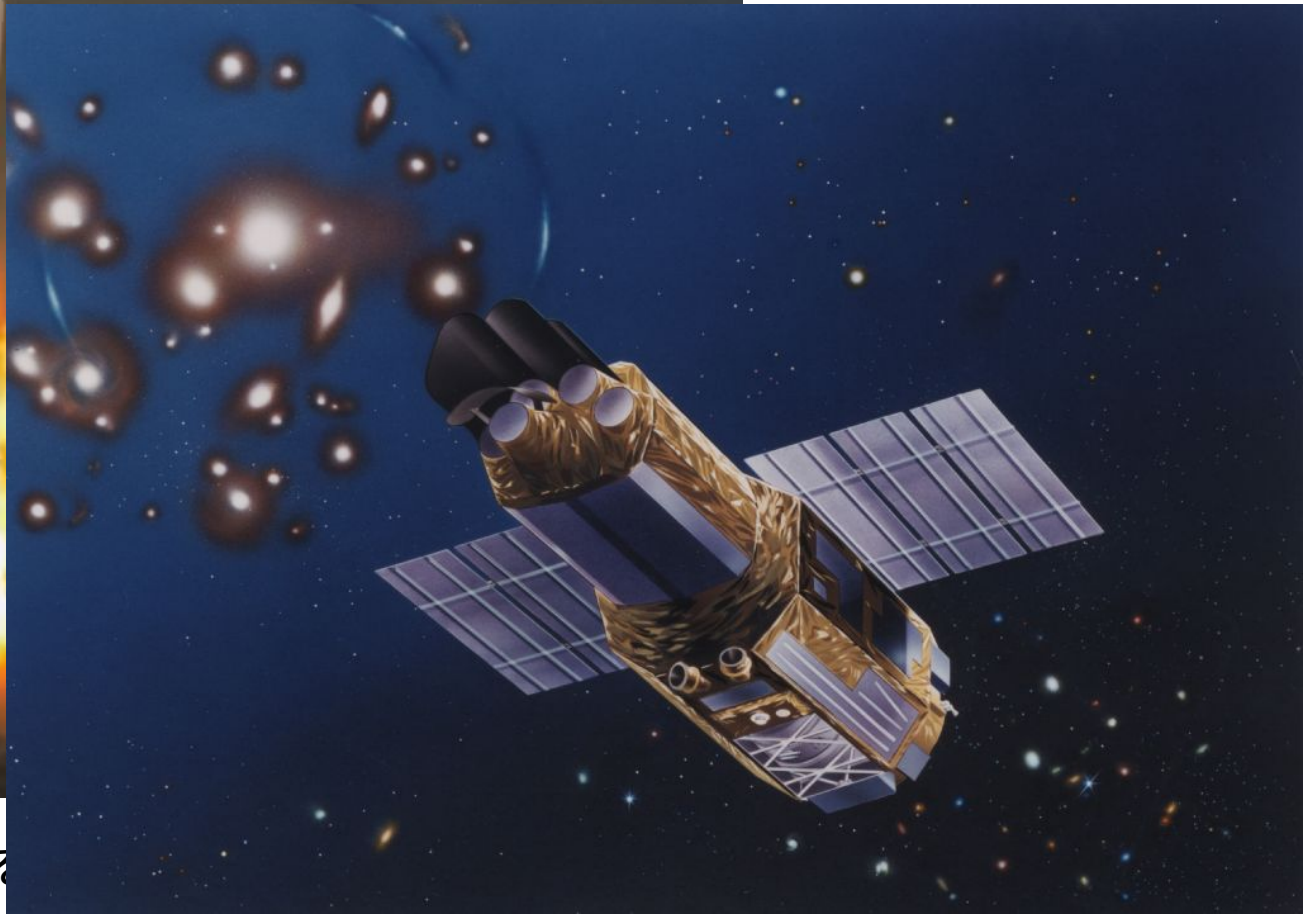


人工衛星に装置をのせる 23

どうやってエックス線を出す星を見つける？

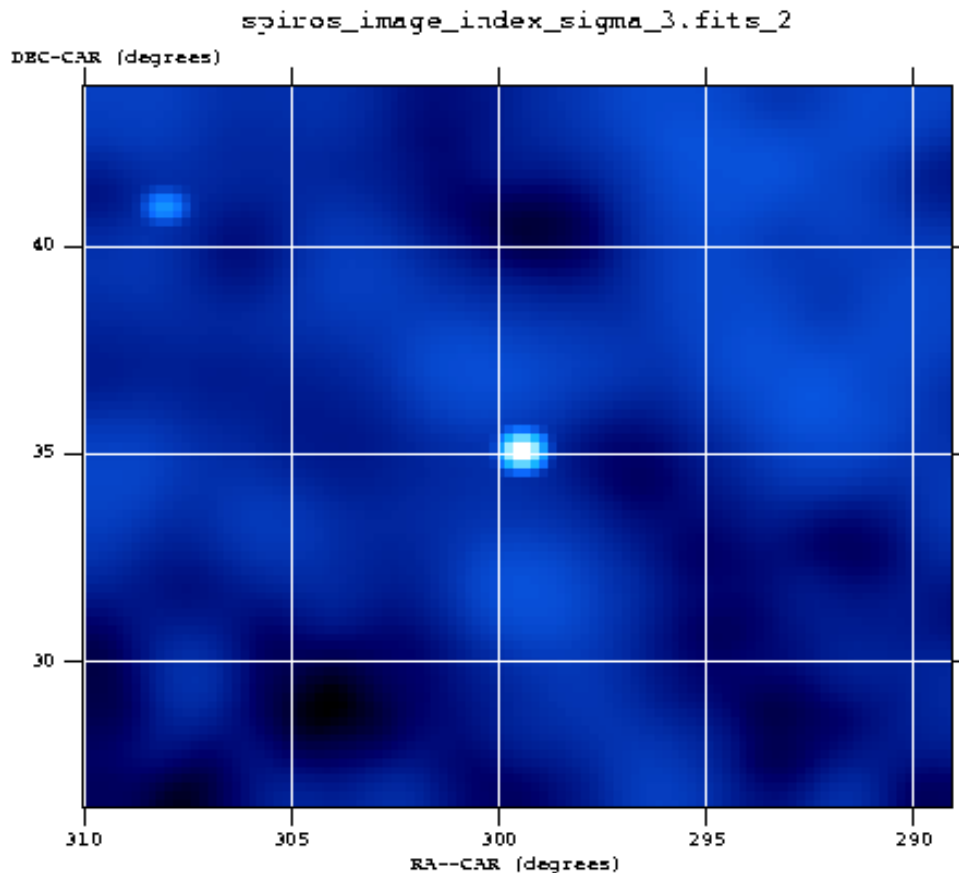


人工衛星



すざく衛星 2005年7月10日打ち上げ成功！ エックス線で宇宙を観測する

ブラックホールのエックス線写真



- ヨーロッパのINTEGRAL衛星による白鳥座X-1の写真

ブラックホールの重さをどうやって量る？

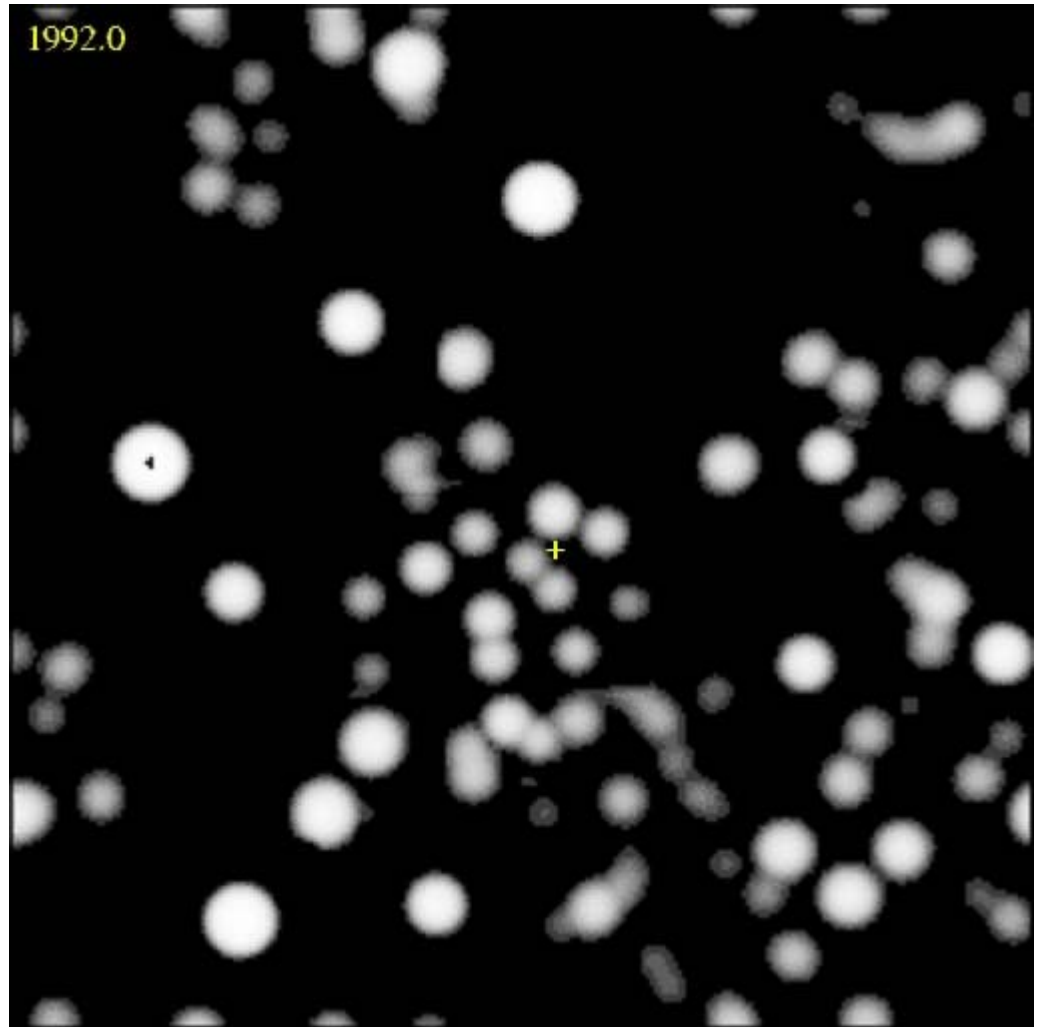
- ブラックホールの回りを回っている星の運動の速さを測定する
- 星の運動からブラックホールの重力の強さがわかる
 - 速くまわっていれば重力が強い
- ブラックホールの重力の強さからブラックホールの重さがわかる
 - エックス線を出している星が、太陽の3倍以上の重さだったらブラックホール
 - それよりも軽かったら中性子星

ブラックホールの回りを回っている星の運動をどうやって測定する？

- 巨大ブラックホールの場合
 - そのまわりのたくさんの星を長期観測する

私たちの銀河中心の巨大ブラックホール

- ドイツのグループ
による銀河中心領
域の長期モニター
(1992~1998)



<http://www.mpe.mpg.de/ir/GC/prop.html>

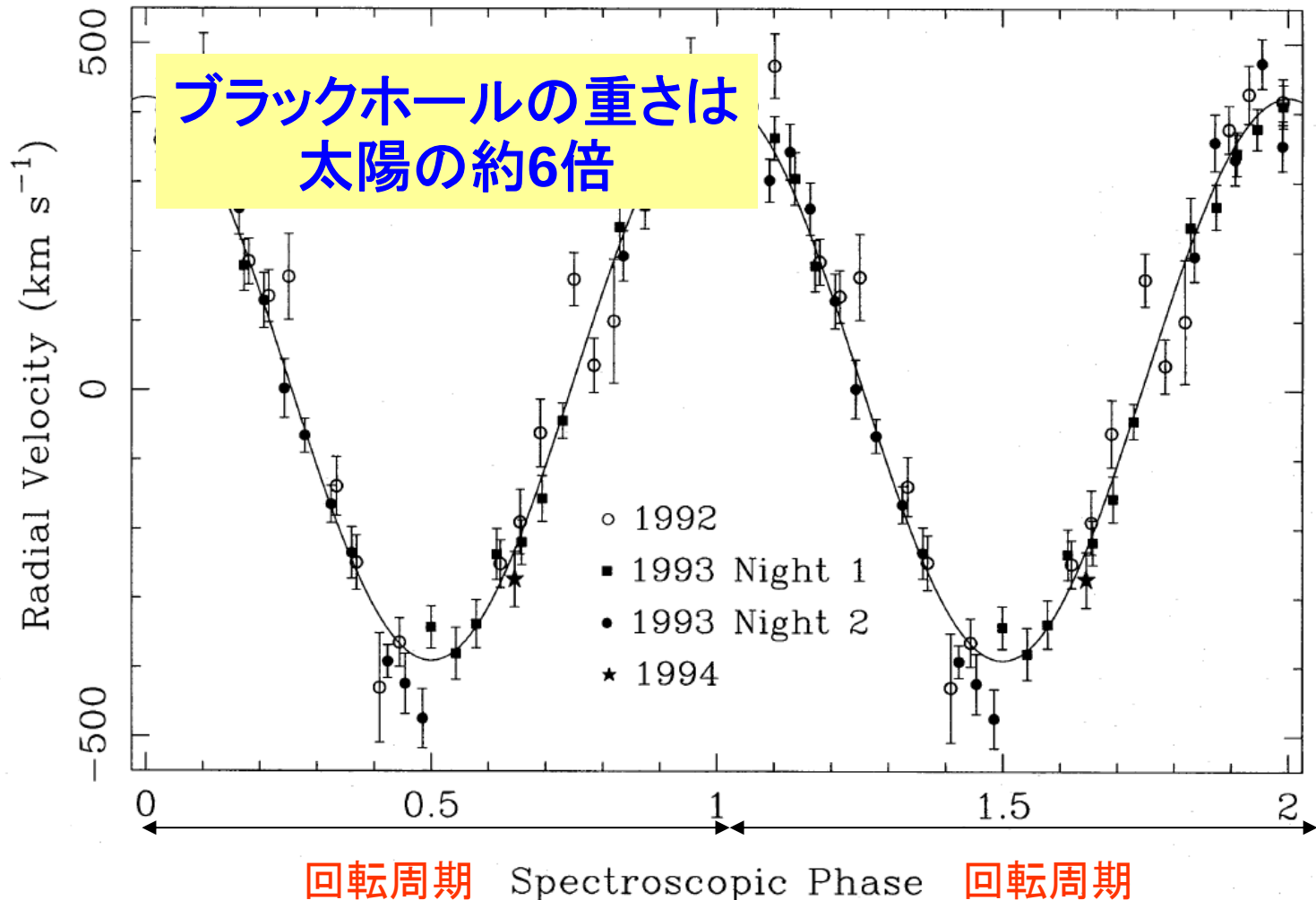
まわりの星の運動→ブラックホールの質量は260万太陽質量

ブラックホールの回りを回っている星の運動をどうやって測定する？

- 星サイズブラックホールの場合
 - ドップラー効果を使う
 - 星からは決まった色の光が出ている
 - その色が、星の運動によって変化する
 - 精密な分光によってスペクトル線のドップラーシフトを測定

「ぎんが」衛星が発見したブラックホールGS1124-68のまわりの星の運動

星が遠ざかる速さ



最近の話題

- 中質量ブラックホールは存在するか？
 - 数百、数千太陽質量のブラックホール？
- 天体の最大光度は質量で決まっている（エディントン限界）
 - それより明るいと、光の圧力で外層が飛ばされてしまう
 - 1太陽質量で 10^{38}erg/s
- $10^{40}\sim 10^{41}\text{erg/s}$ の明るさを持つ、超光度X線天体 (Ultra-luminous X-ray sources) がたくさん見つかったている
 - 100~1000太陽質量の中質量ブラックホール？
 - <30 太陽質量の星サイズブラックホールが超エディントン光度で光っている？
- まだ決着がついていない