

2015天文夏の学校
X線観測で見えてくる宇宙

第一部：X線で見える激動の宇宙
第二部：X線望遠鏡用反射鏡開発

名古屋大学
國枝秀世

2015.07.29

自己紹介

宇宙科学とは

X線で宇宙を見ると

X線で宇宙を見るには

名古屋大学では



國枝秀世

- 1950 名古屋生れ
- 1969 名古屋大学理学部入学
- 1975 名古屋大学理学部修士課程入学
- 1979 名古屋大学理学部助手
- 1986-8 NASA/ゴダード研究所客員研究員
- 1993 名古屋大学理学部助教授
- 1999 宇宙科学研究所教授
- 2005 名古屋大学理学部教授
- 2009 名古屋大学理学部長・研究科長
- 2010-1 日本天文学会理事長
- 2012 名古屋大学副総長

陸上競技(跳躍)
(投擲)

(監督)

名大陸上部部長

Coma Cluster

Misti Mountain Observatory

自己紹介

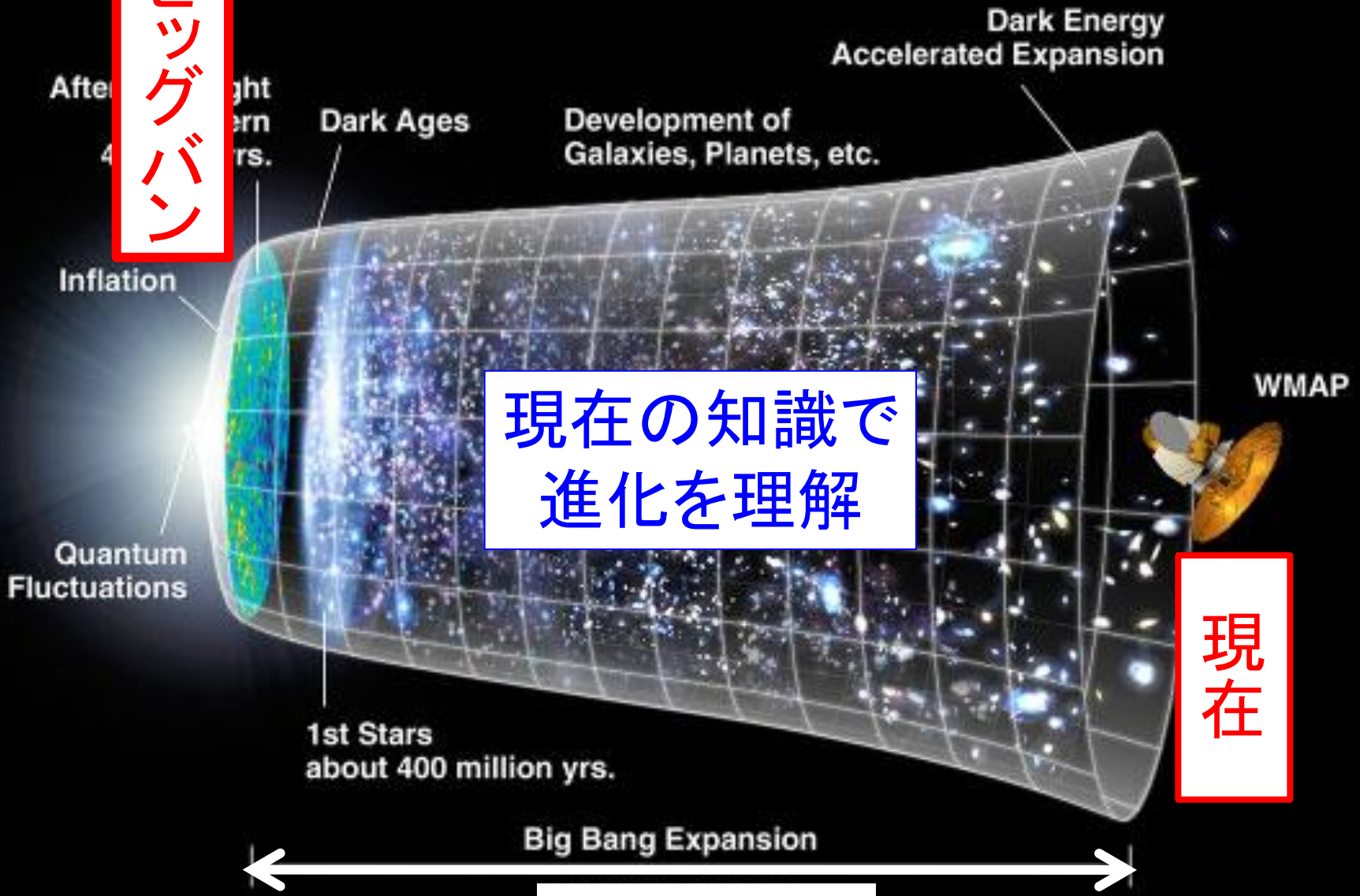
宇宙科学とは

X線で宇宙を見ると

X線で宇宙を見るには

名古屋大学では

ビッグバン



現在の知識で
進化を理解

現在

Big Bang Expansion

137億年

宇宙科学とは

宇宙は極限の実験室

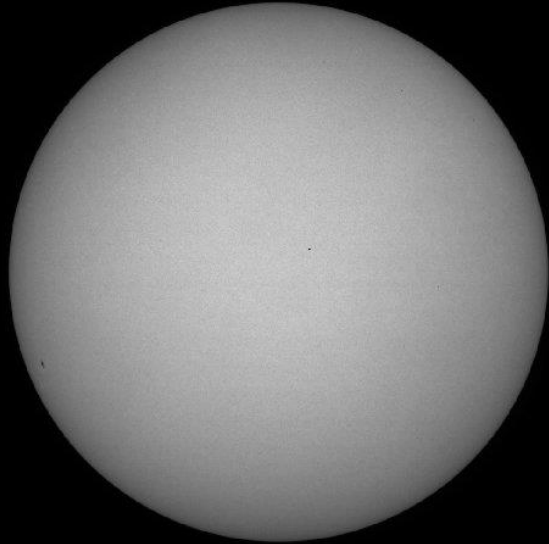
	Minimum	人間	Maximum
密度	1 原子/cc	1 g/cc	10^{14} g/cc
温度	2.7 ° K	300° K	1億度
磁場	μ Gauss	1 Gauss	10^{12-14} Gauss
重力場	μ G	1 G	$>10^{13}$ G
質量	10^{-30} kg	10^2 kg	10^{44} kg
大きさ	10^{-12-15} m	1 m	10^{26} m
時間	10^{-15} 秒	10^9 秒	4×10^{17} 秒

地上で実現できない極限状態で新しい法則を確立する

最も近い恒星：太陽

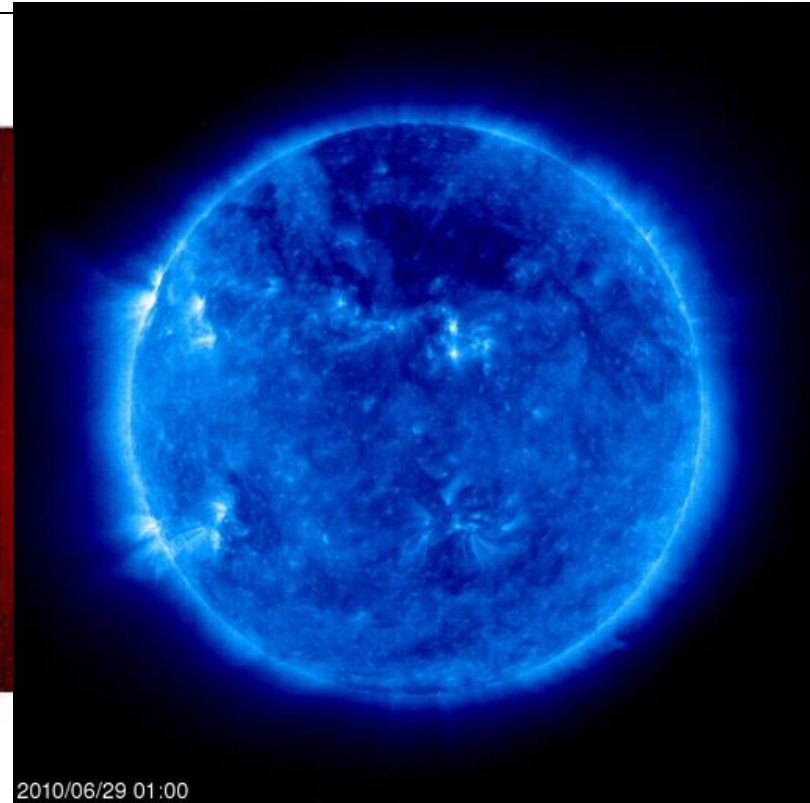
可視光で見た太陽

SOHO MDI 27-Jun-2010



6000度の光球

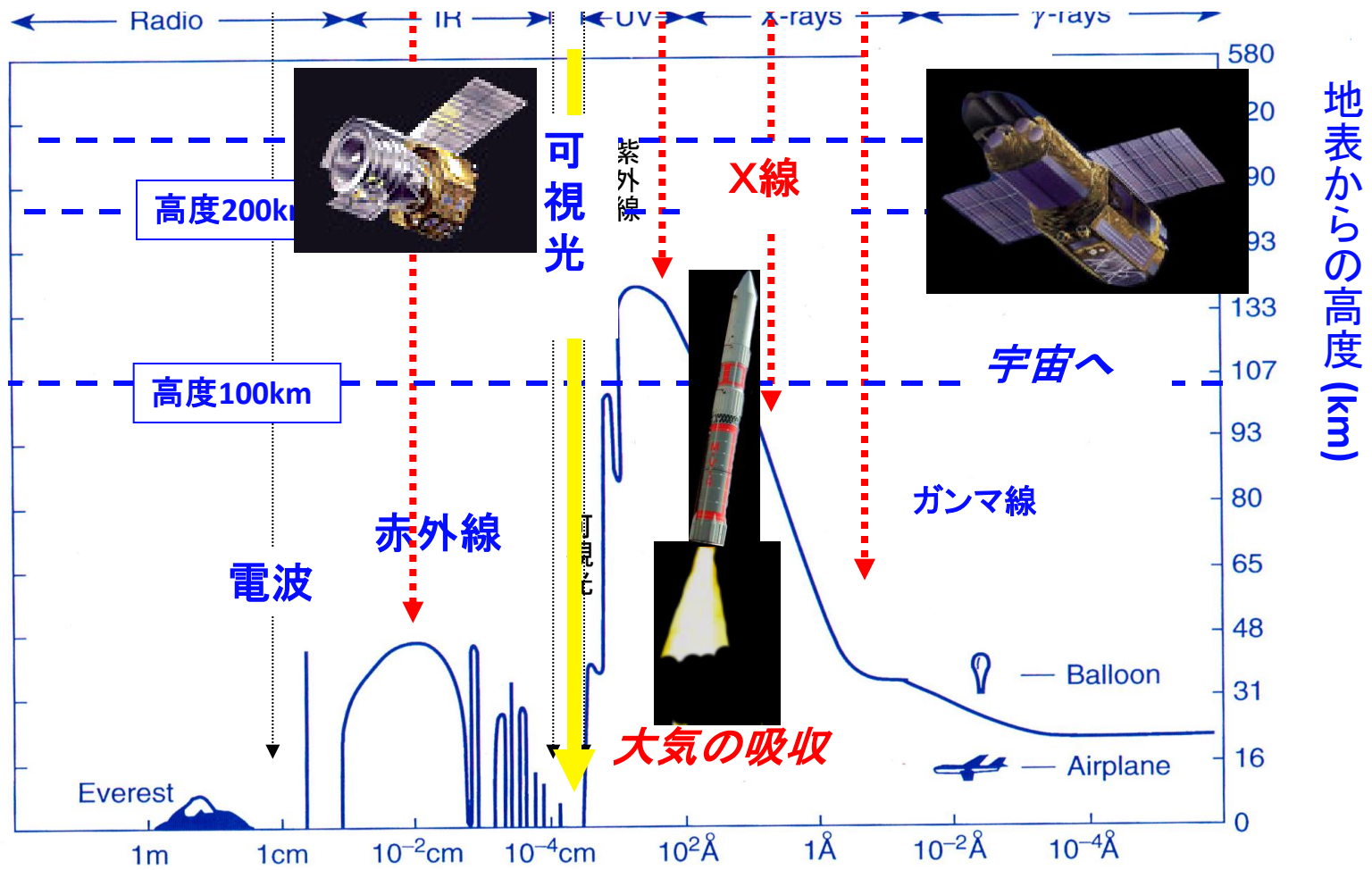
6/27の
太陽



X線で初めて太陽の激しい姿が見えて来た

光の波長と大気吸収

今日の2/2枚



長い ← 波長 → 短い
冷たい 熱い

自己紹介

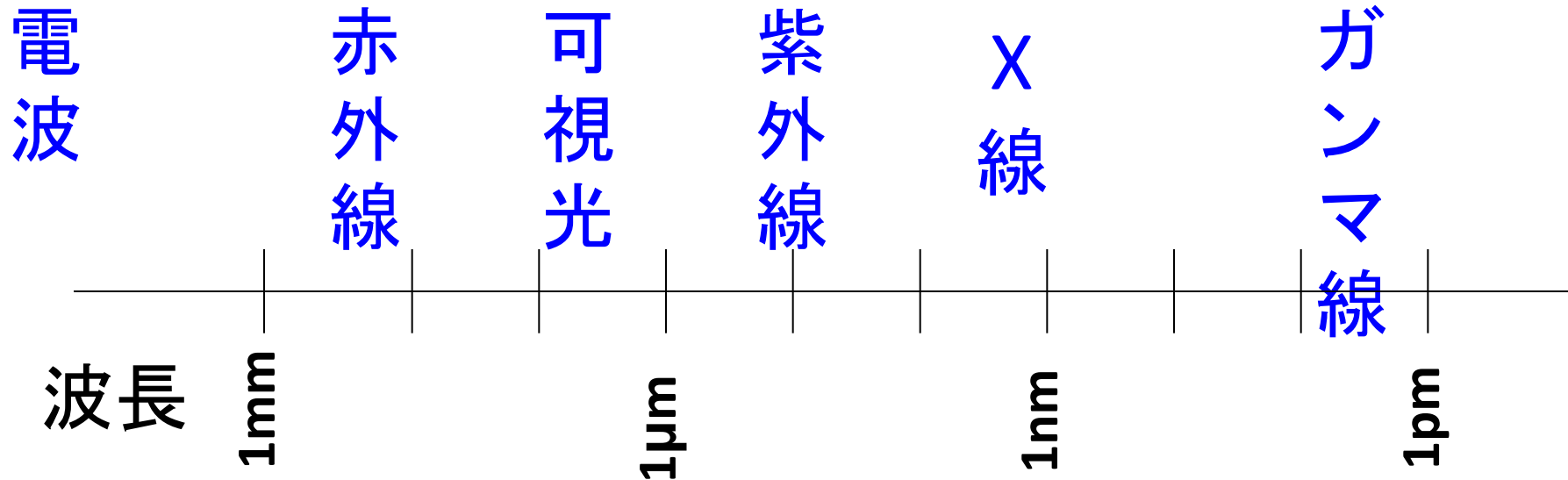
宇宙科学とは

X線で宇宙を見ると

X線で宇宙を見るには

名古屋大学では

X線とは



100K 10⁴K 10⁶K

黒体放射温度

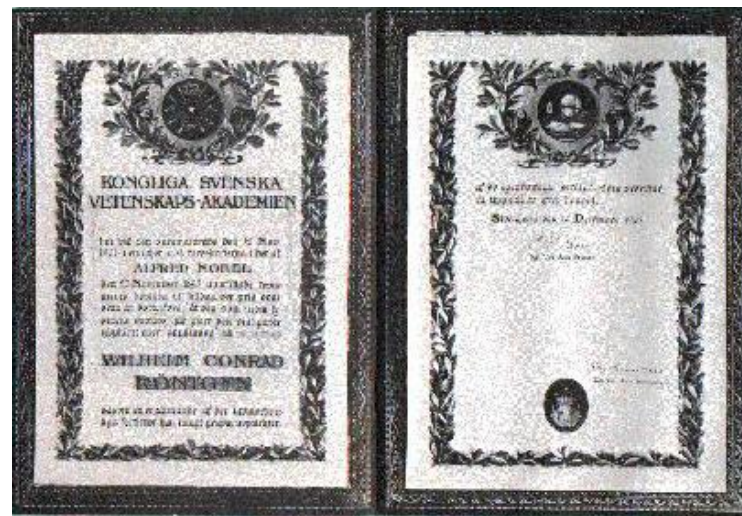
Wienの変位則
 $\lambda_{\max} T = 2800 \mu\text{m K}$

第一回ノーベル物理学賞

X線の発見(1895) でレントゲンが受賞
1901年



ウィルヘルム=レントゲン
(ドイツ)



2002年ノーベル物理学賞

リカルド=ジャッコーニ(X線天文学)
小柴昌俊他(ニュートリノ天文学)

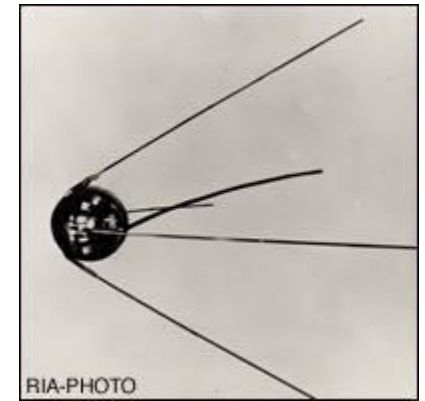
X線で空を見る 宇宙開発と共に

(1) 1960年代:
米ソの宇宙開発競争の時代
スプートニク(ソ)、ガガーリン(ソ)
ケネディー演説
アポロ計画

(2) 太陽からの強いX線
恒星からのX線は
暗くて見えない
月からは？



ケネディ大統領『1960年代に月へ人類を』



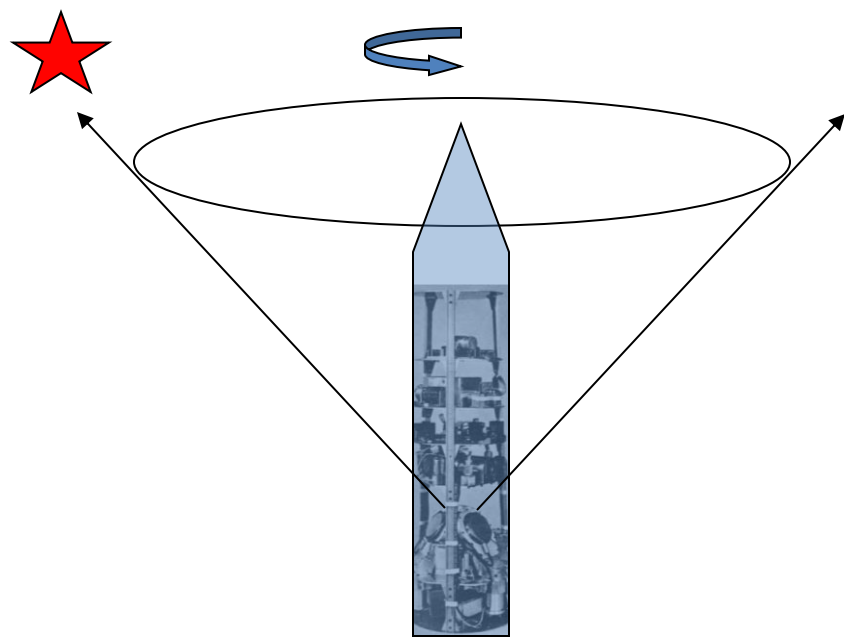
スプートニク衛星(ソ)
1957年10月4日



ガガーリン宇宙飛行士(ソ)
1961年4月12日

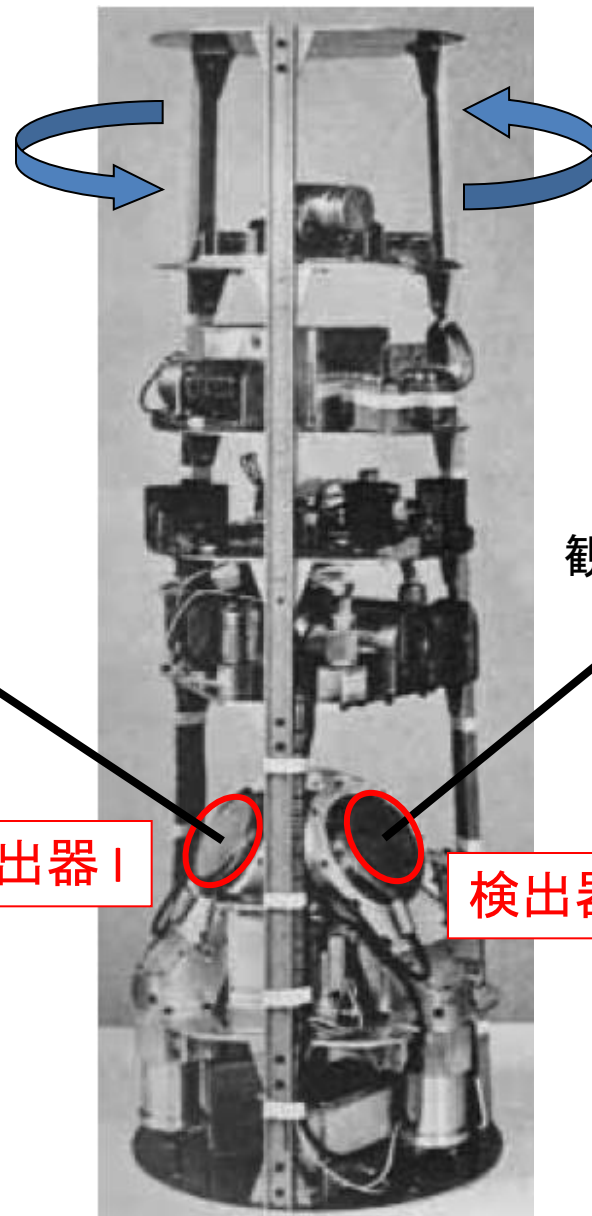
世界最初の X線天体観測 1962年6月

ロッシ、ジャッコーニ



ロケット

自転

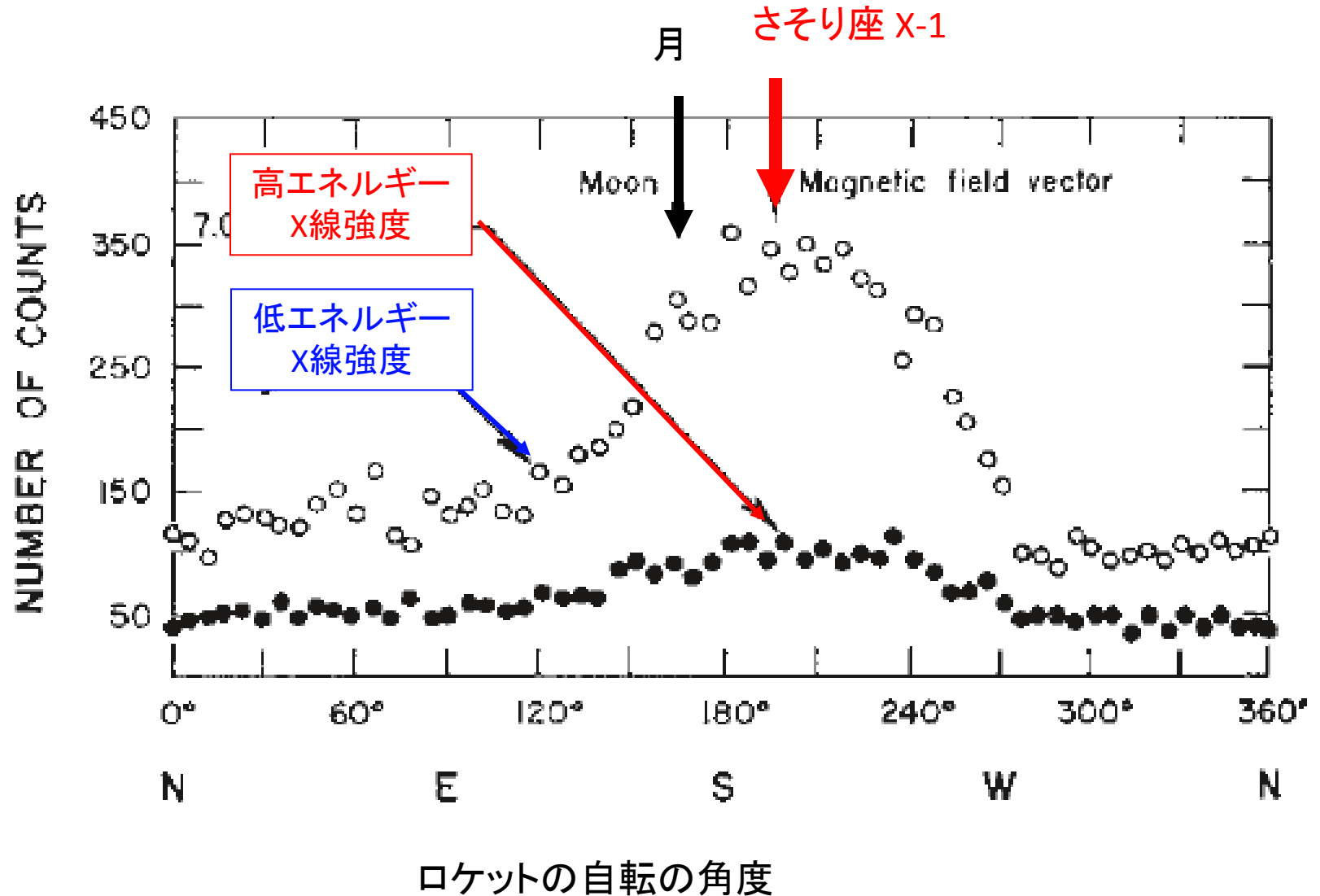


検出器 I

検出器 II

観測方向

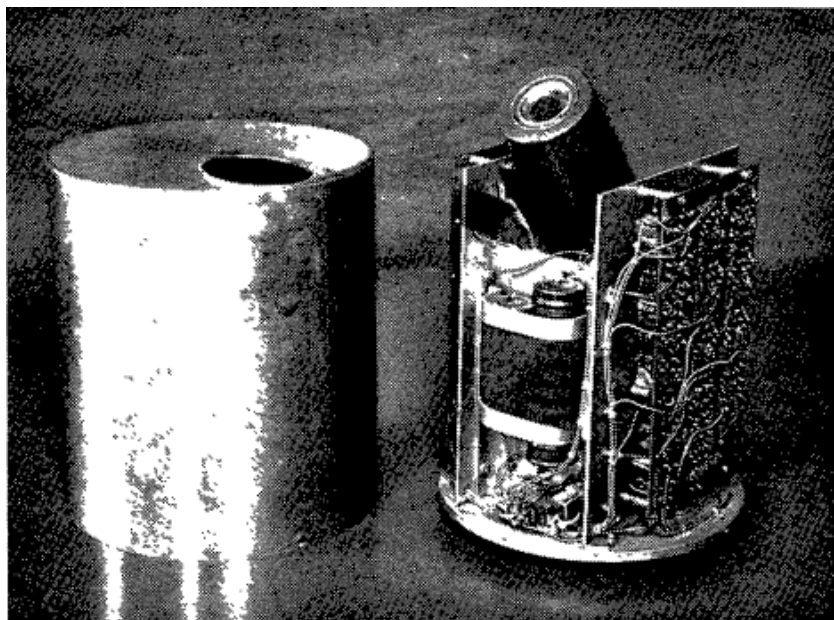
最初のX線観測データ





日本最初のX線観測(名古屋大学)

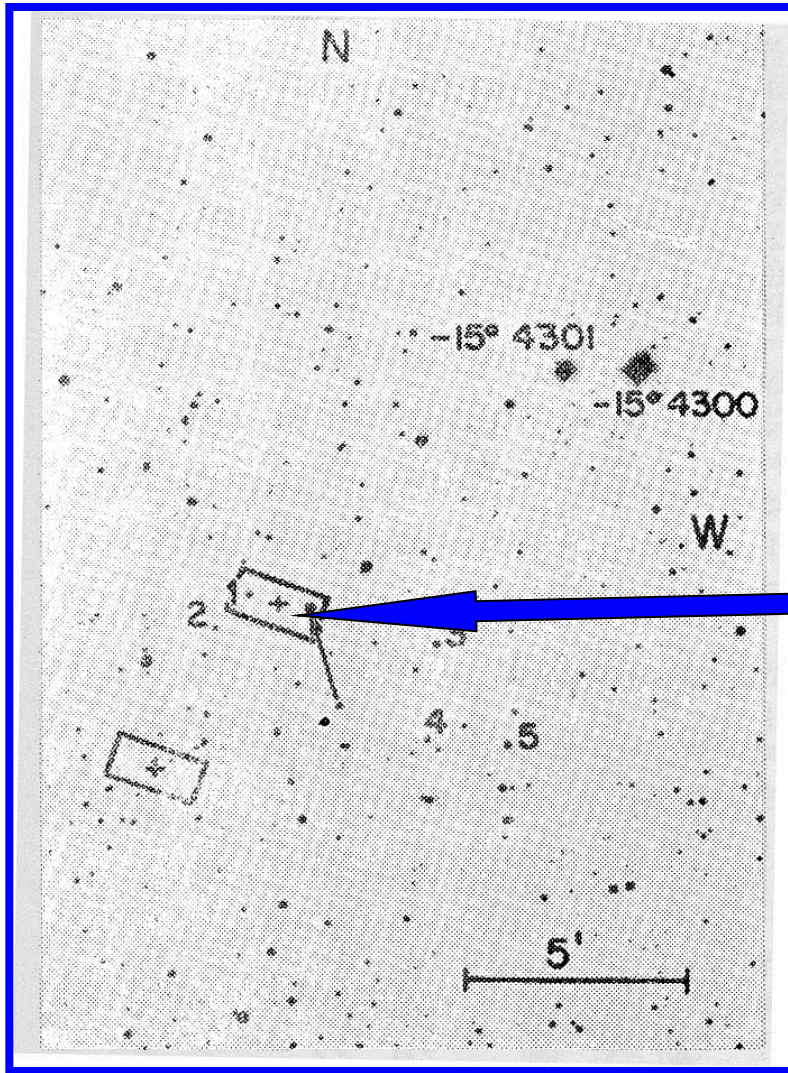
名大チーム(早川、松岡、、)
世界で三番目のグループとして
X線天体観測に成功



1907JST on March 18, 1965,

名大U研50周年

X線で激しい天体現象を探る



X線星の発見(1962年)

X線では太陽より
百万倍明るい星

青白い暗い星

明るさや波長が周期的に変化

||
軌道運動

X線連星

X線で激しい天体現象を探る

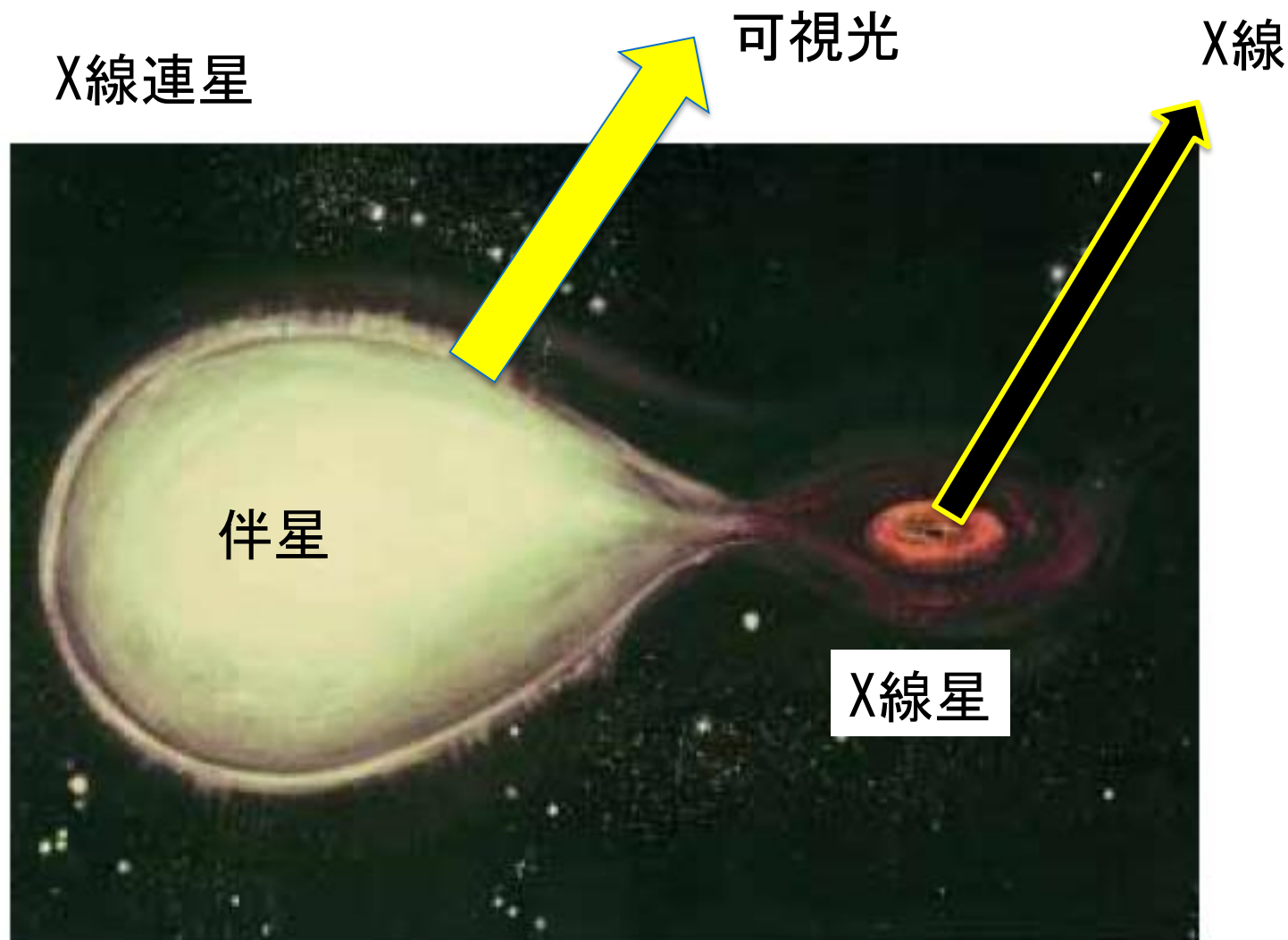


Figure 12. Artist's conception of Cyg X-1. Illustration of L. Cohen.

X線で激しい天体現象を探る

連星のX線放射

重力
ポテンシャル
エネルギー V

重力場で落下

R

半径が小さいほど
ポテンシャルが急
強い力で引き込む
 $F=GMm/R^2$

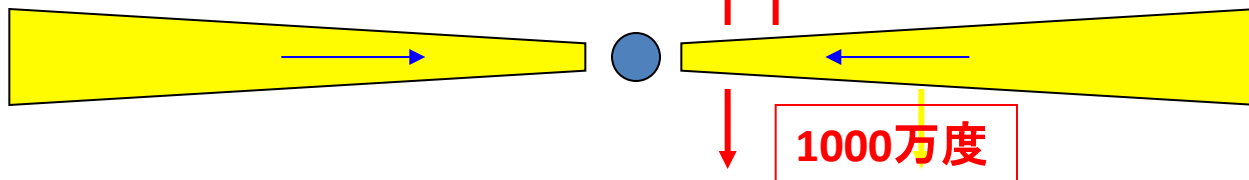
dV

dR

大量のエネルギー放射
→ 高温の降着円盤

X線放射

1000万度



降着円盤の性質と放射

摩擦による角運動量の輸送

ケプラー運動E

円盤表面からの

半径の減少 → 重力エネルギー → 黒体放射

$$dR \quad \frac{GM\dot{M}dR}{R^2} \quad 2\pi R dR \times \sigma T^4$$

$$T = 3 \times 10^7 \text{ K} (M/10^{-9} M_{\text{solar}}/\text{y})^{1/4} (M_{\text{solar}}/M)^{1/2} (GM/c^2 r)^{3/4}$$

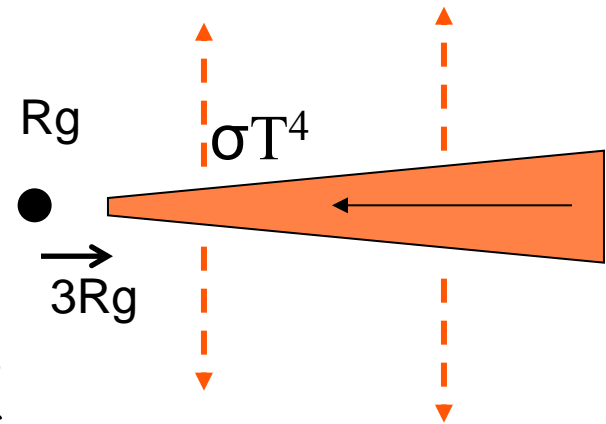
温度は半径減少と共に上昇

「X線で最も輝く」

最内安定軌道(ISCO)

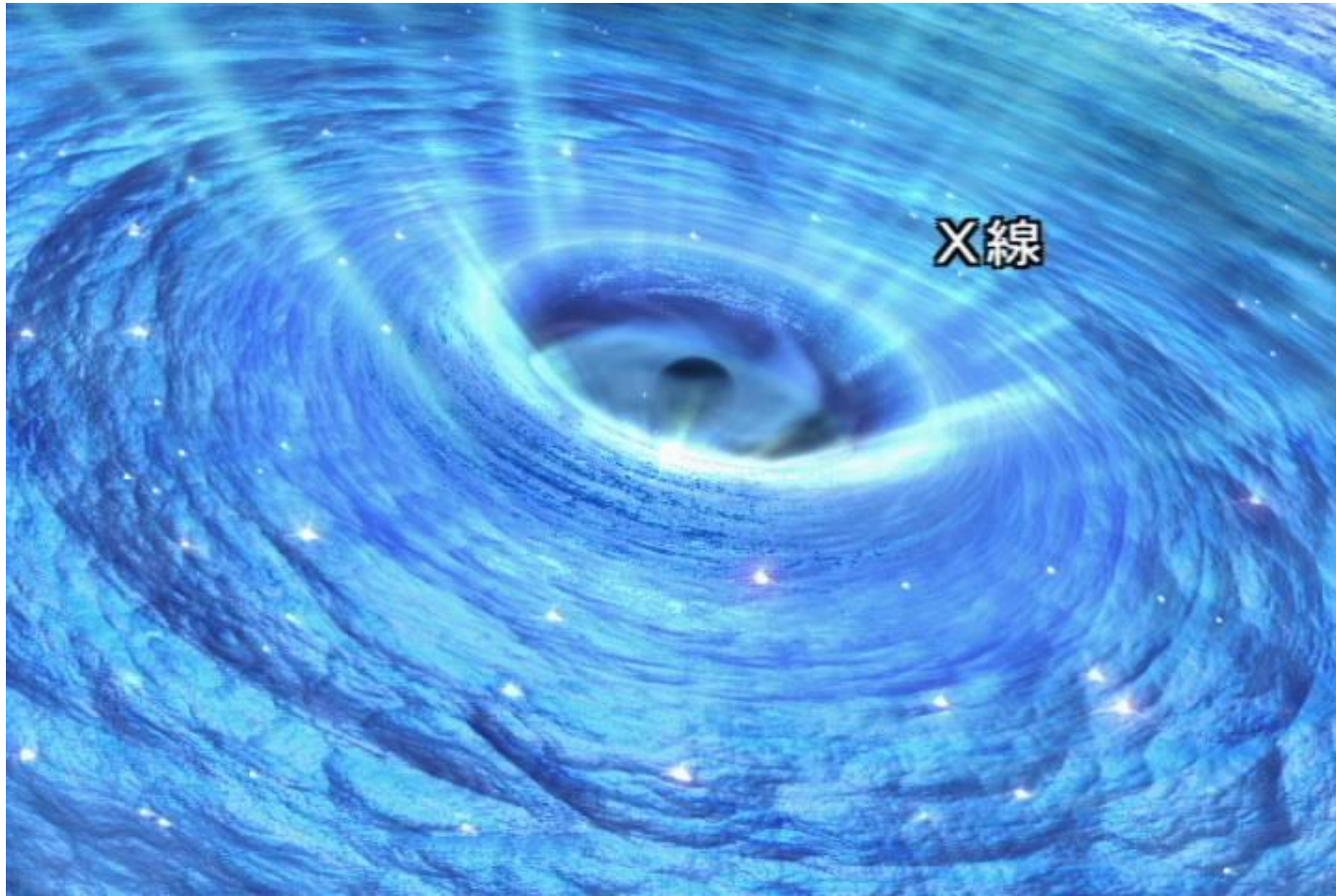
3R_g内には安定した円盤は無い

→ 円盤最内縁半径



X線で激しい天体現象を探る

ブラックホールへの降着流→X線放射



ブラックホールとは

ミッチェル(1783), ラプラス(1796)

重力エネルギー = 運動エネルギー
この時の速度を**脱出速度**と呼ぶ

$$\frac{GMm}{r} = \frac{1}{2} mv^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2} mc^2$$

星を押し詰めて行くと、
r が小さくなって

脱出速度 \Rightarrow 光速

$$r_s = 2GM/c^2$$

ブラックホールの大きさ

G: 重力定数
c: 光速

この半径から内側では、光速でも脱出できない。

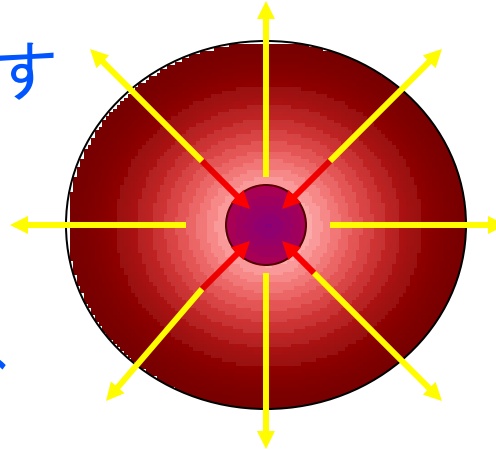
2. Black holeを作る

星の輪廻

星間塵-->原始星-->恒星--> **超新星爆発**

↑
周辺にまき散らす

中心に押し込む



20世紀初頭の
原子物理学の結論

→ 中性子星 (1.4 M_{\odot})

内部の力で支えられずにつぶれる

→ ブラックホール (>3 $M_{\text{太陽}}$)

Chandrasekhar質量

復習

詰め込んだ電子のフェルミ運動量は

$$p_F = h (3/8\pi)^{1/3} n_e^{1/3}$$

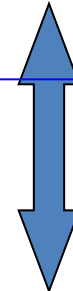
縮退圧は

$$P = n_e \varepsilon_F / 3 = h (3/8\pi)^{1/3} c / 3 n_e^{4/3}$$

静水圧力は

$$P = 4\pi G M^{2/3} \rho^{4/3} (4\pi/3)^{1/3}$$

$$P = 4\pi G M^{2/3} (n_e m_p \mu_e)^{4/3} (4\pi/3)^{1/3}$$



$$M_{Ch} = 1.47 (2/\mu_e) M_{Solar} \quad \mu_e = 2 : \text{電子縮退圧}$$

$$\mu_e = 1 : \text{中性子縮退圧}$$

2. Black holeを作る

超新星爆発の爆縮によるコンパクト星では、

$M < 1.4 M_{\text{太陽}}$

白色矮星

電子の縮退圧

1933 チャンドラ・セカール

$M \sim 1.4 M_{\text{太陽}}$

中性子星

中性子の縮退圧

1960年代

$M > > 3 M_{\text{太陽}}$

ブラックホール？

質量からブラックホールの存在を間接的に証明

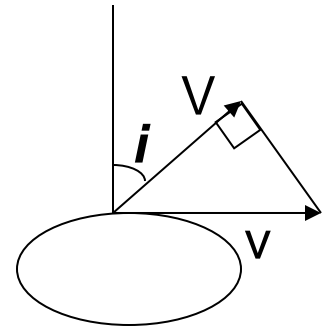
X線星の質量決定

周期Pと軌道直径 a が
観測されれば、
 M_1+M_2 を決定可能
しかし遠いと a は見えない

ケプラーの法則

$$P = \frac{2\pi a^{3/2}}{\sqrt{G(M_1+M_2)}} \quad a = a_1 + a_2$$

観測される量は視線成分の速度VによるDoppler効果
傾斜角 i に対して 本当の軌道速度 v は $V = v \sin i$
ここで角度は軌道面に垂直から測っている

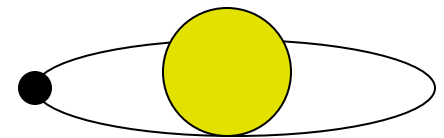


i が仮定できれば、 $P = \frac{2\pi a_1}{v_1}$ で a_1 が決まる

a_1 から a が $a = (M_1+M_2)a_1 / M_2$ で与えられる

最終的に

$$\text{質量関数 } m = \frac{M_2^3}{(M_1+M_2)^2} \sin^3 i = \frac{P v_1^3}{2\pi G}$$



X線星の質量決定例

ヘラクレス座X-1

公転周期（蝕） $P = 1.700 \text{ days}$

ドップラー効果で軌道速度 $v_1 = 169 \text{ km/s}$

$$\text{質量関数 } m = \frac{M_2^3}{(M_1 + M_2)^2} \sin^3 i = \frac{P v_1^3}{2\pi G} = 0.85 M_{\text{Solar}}$$

蝕が起きていることから、軌道面に近くから見ている

つまり $i \geq 87 \text{ 度}$

伴星はスペクトル型からB型星でその質量 M_1 は $2.2M_{\text{Solar}}$

これにより、 $M_2 = 1.3 M_{\text{solar}}$ であることが決定

中性子星！

X線星の質量決定例

白鳥座X-1

ドップラー効果で軌道速度 $v_1 = 75 \text{ km/s}$

速度変動の周期 $P = 5.6 \text{ days}$

$$\text{質量関数 } m = \frac{M_2^3}{(M_1 + M_2)^2} \sin^3 i = \frac{P v_1^3}{2\pi G} = 0.242 M_{\text{Solar}}$$

伴星はスペクトル型から超巨星でその質量 M_1 は**20-28 M_{Solar}**

蝕は起きていないことから、軌道傾斜角は決まらない。

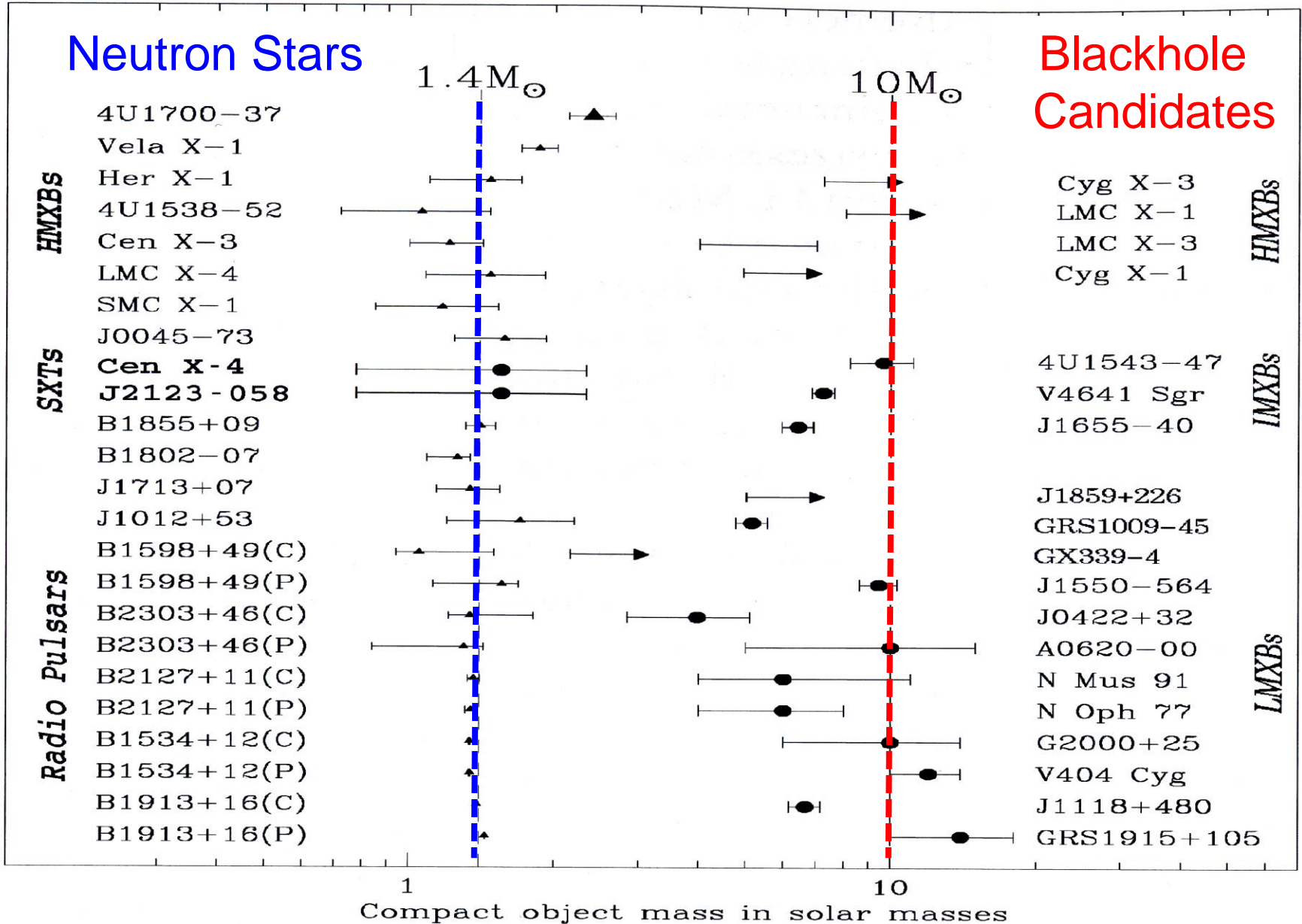
しかし、 $\sin i = 1$ が最大値。

これに対応する、 **$M_2 > 5 M_{\text{solar}}$** が下限になる。

すなわち、このX線星は太陽の5倍以上重い

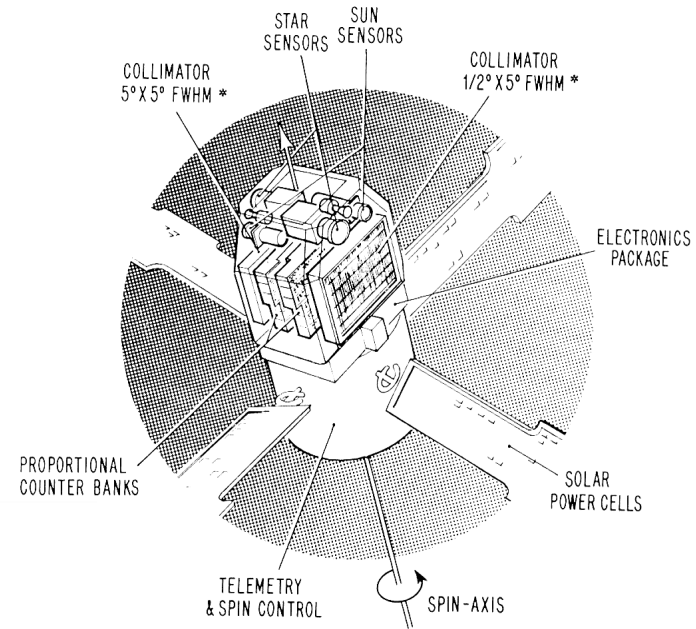
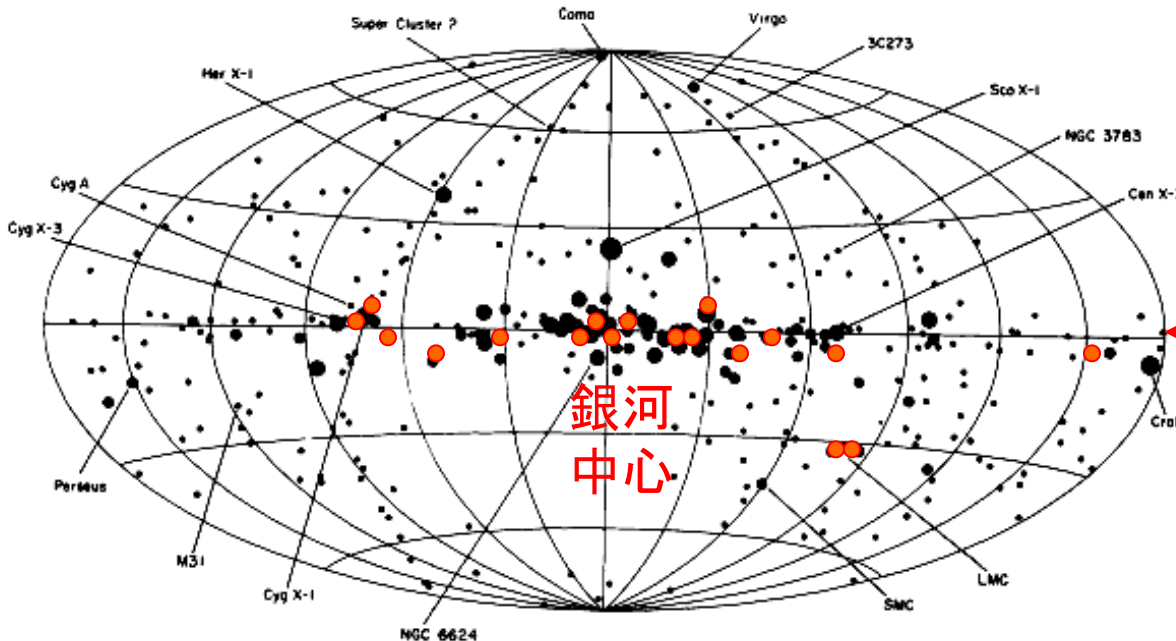
ブラックホール！

X線星の質量分布



Black holeの登場

X線観測衛星 UHURU(1970) All Sky Survey



銀河面

X線連星

○ Neutron Star

● Black hole

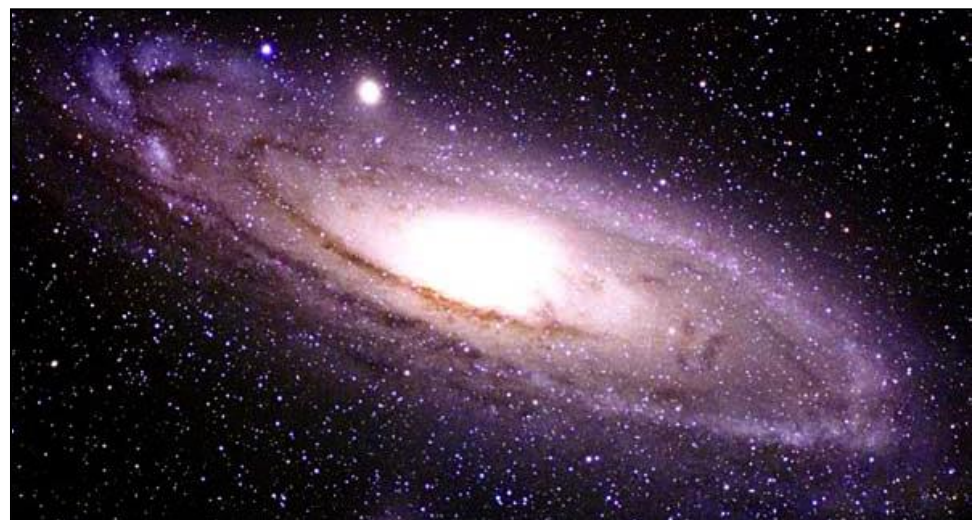
銀河に潜む巨大ブラックホール

(活動的) 銀河中心核

M 87

Active Galactic Nuclei

アンドロメダ星雲



活動的銀河中心核

各種銀河10個に1個の割合で
太陽の明るさの1000億倍以上明るい中心核
星の集団？大質量ブラックホール？

Super Massive Black hole?

銀河に潜む巨大ブラックホール

大質量天体の存在

活動的銀河中心核周辺の
ガスの軌道運動

速度 $v=500\text{km/s}$

視半径 $r=50\text{光年}$

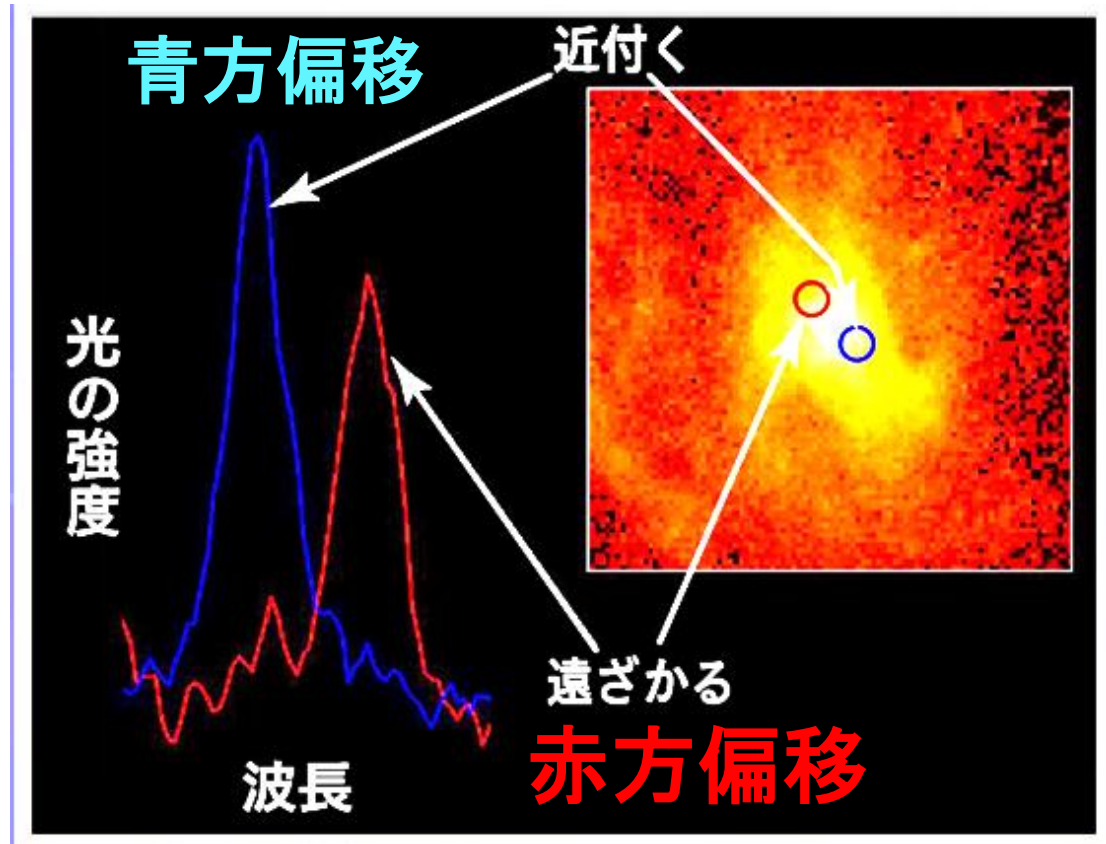
重力 $\epsilon =$ 運動 ϵ

$$GM/r = v^2/2$$

$M > 10^9 M_{\text{solar}}$

星の集団ではなく
一つの大質量天体
ブラックホール！

Doppler effect



銀河に潜む巨大ブラックホール

ブラックホールの大きさ

$$R_s = 2GM/c^2$$

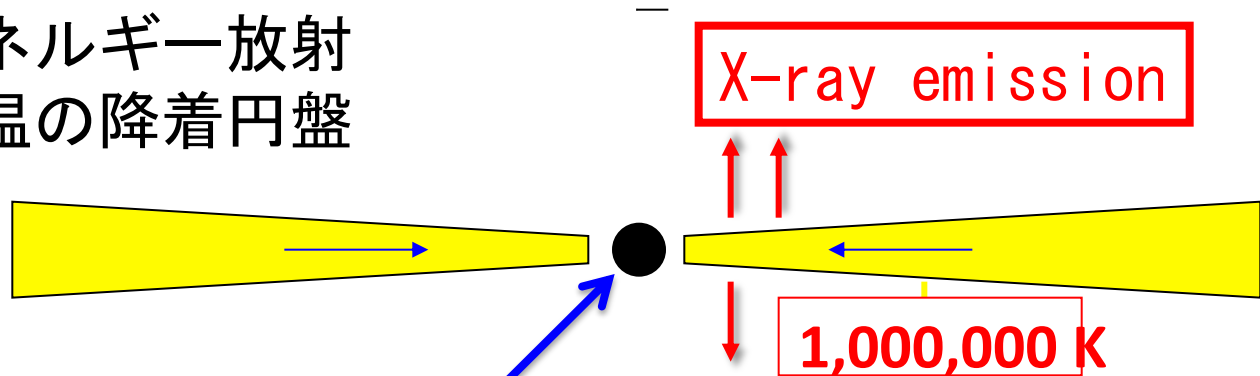
天体の質量	半径(Rg)
太陽質量	1.5 km
太陽の千倍	1500 km
太陽の1億倍	150,000,000 km

地球の公転軌道半径

銀河に潜む巨大ブラックホール

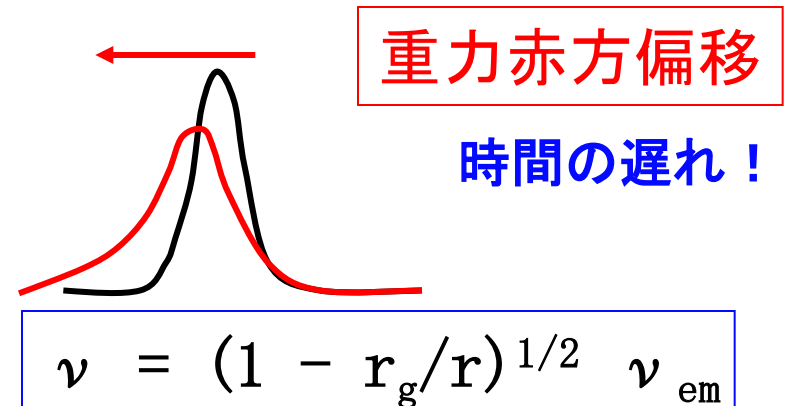
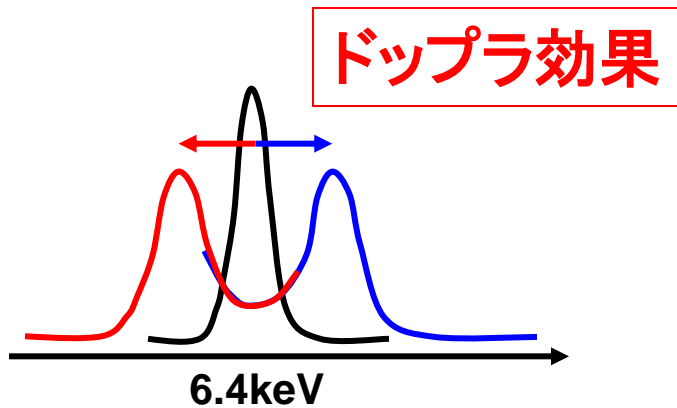
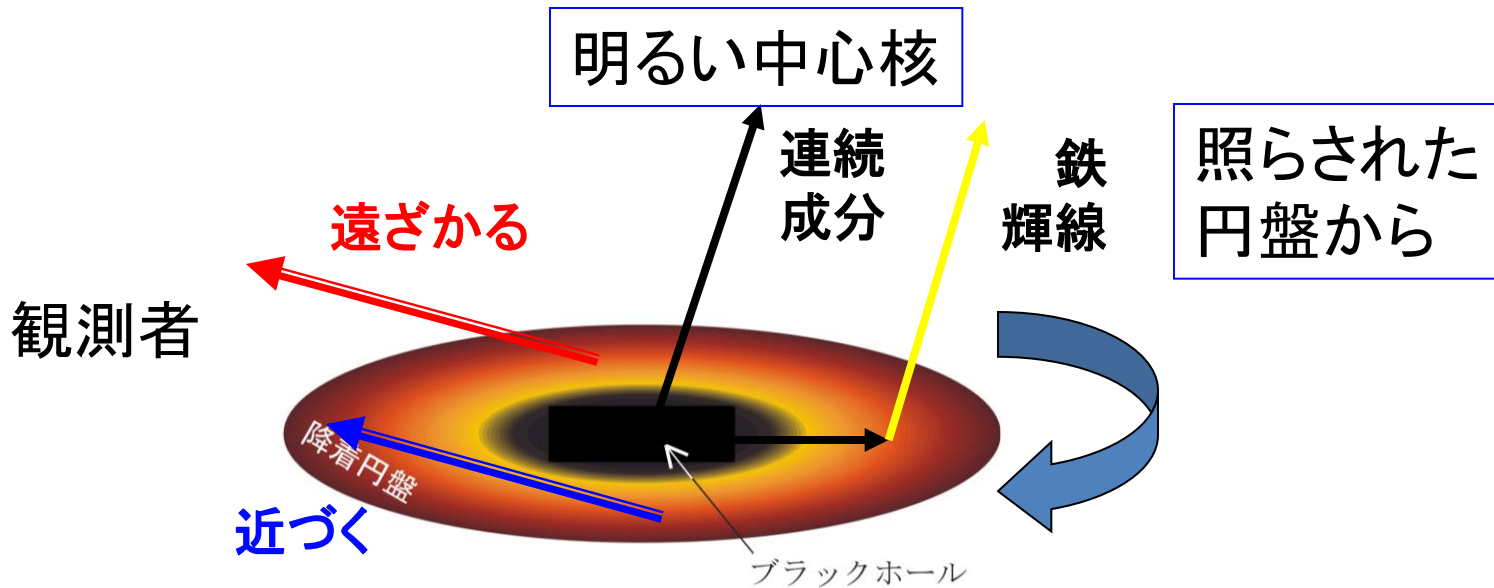
大質量ブラックホールへの物質降着の重力エネルギー解放

大量のエネルギー放射
→ 高温の降着円盤



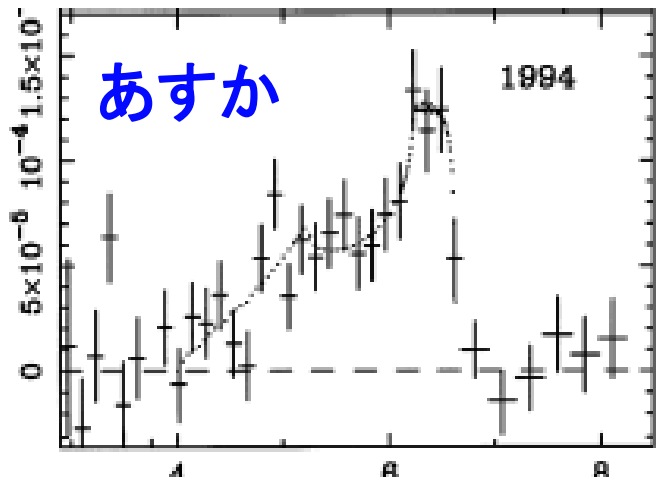
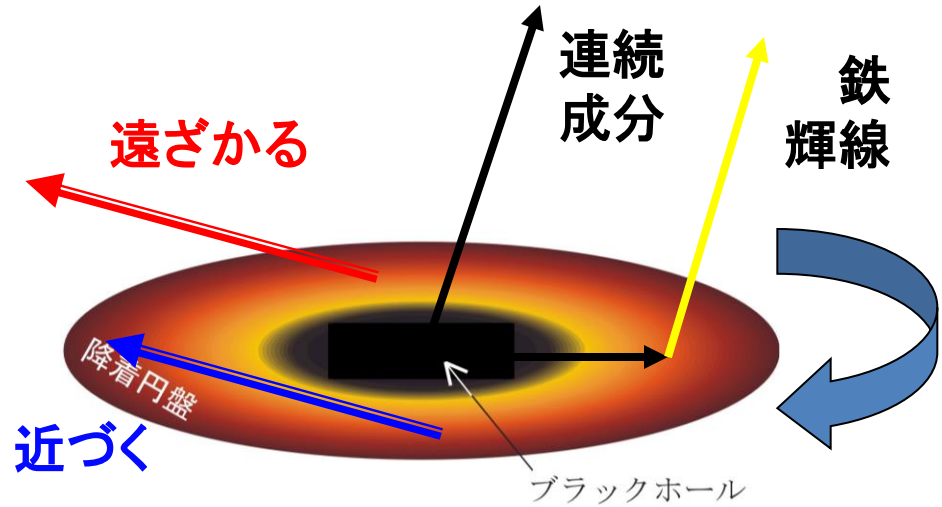
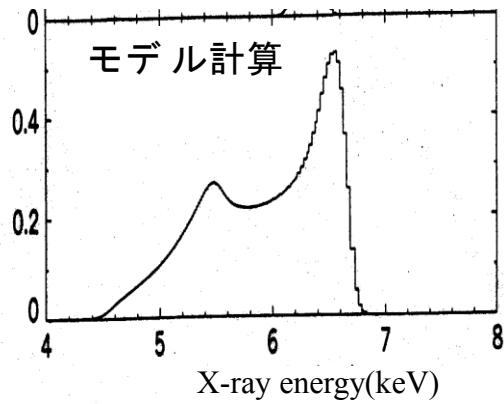
太陽質量の
100 – 10000万倍
Super Massive Blackhole

広がった鉄輝線



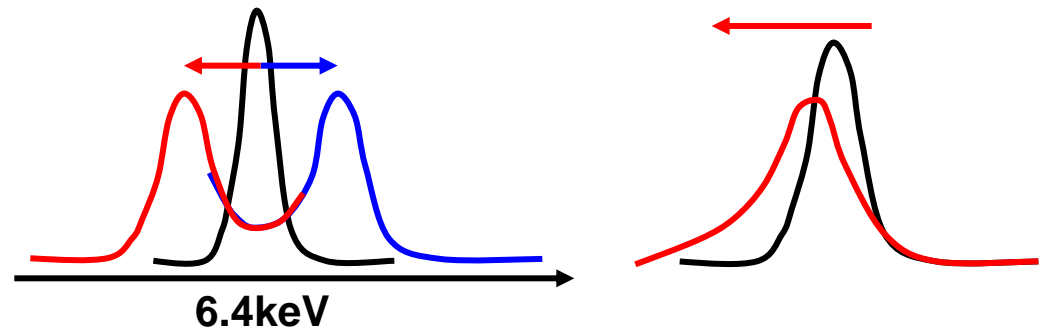
ブラックホールに近づく程ずれる

広がった鉄輝線



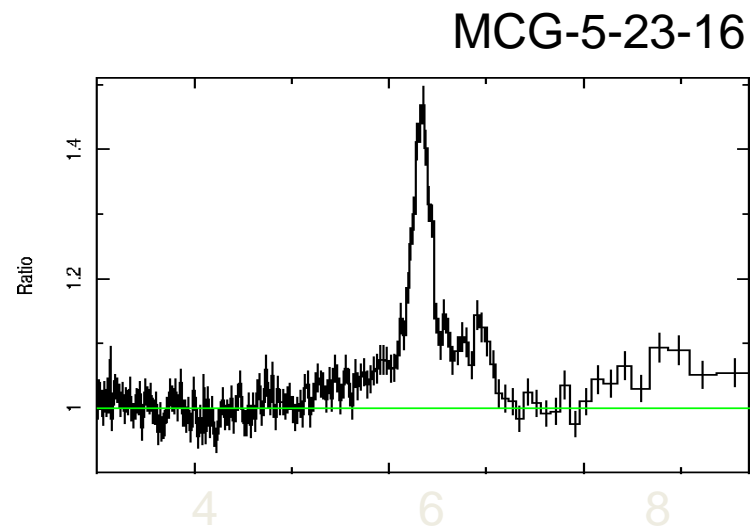
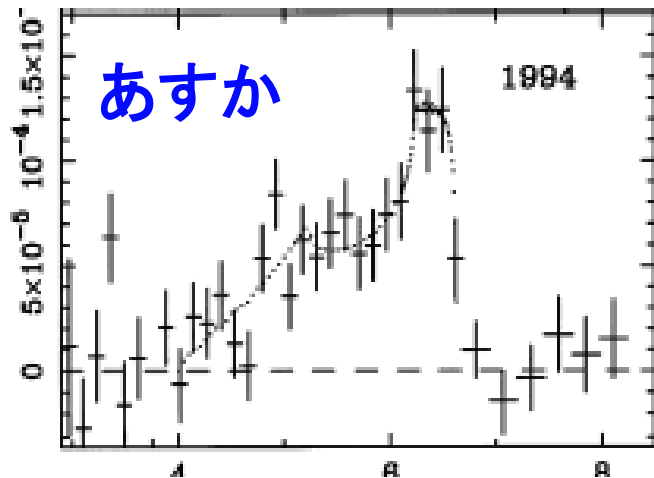
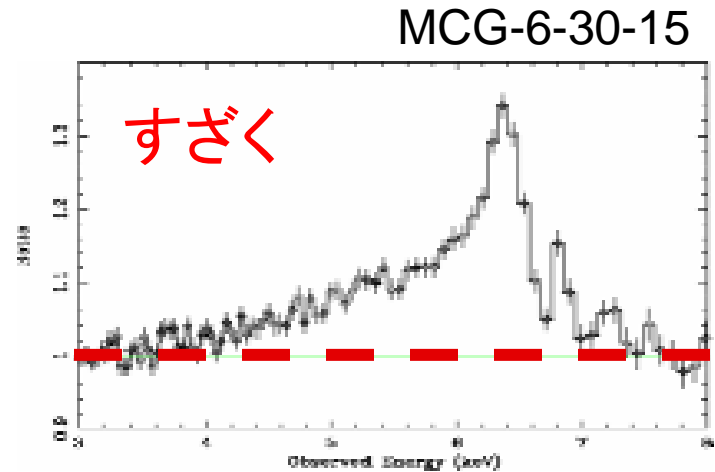
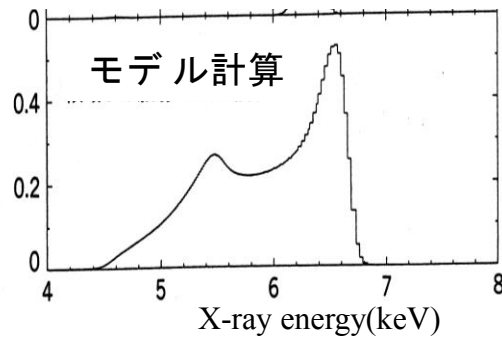
ドップラ効果

重力赤方偏移



すざくが究める鉄輝線

大きな望遠鏡と良い分解能＋広帯域

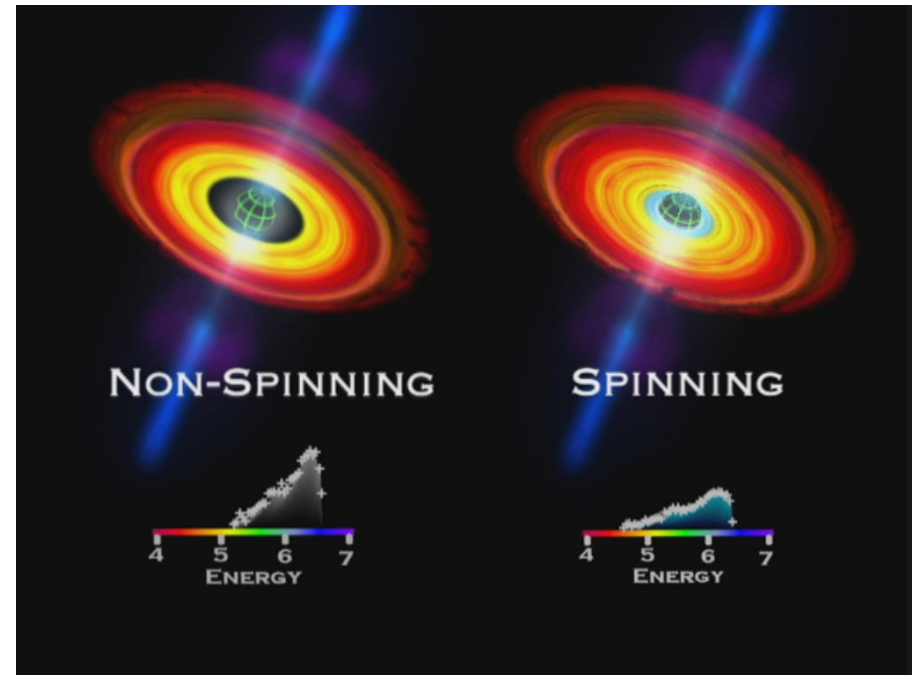
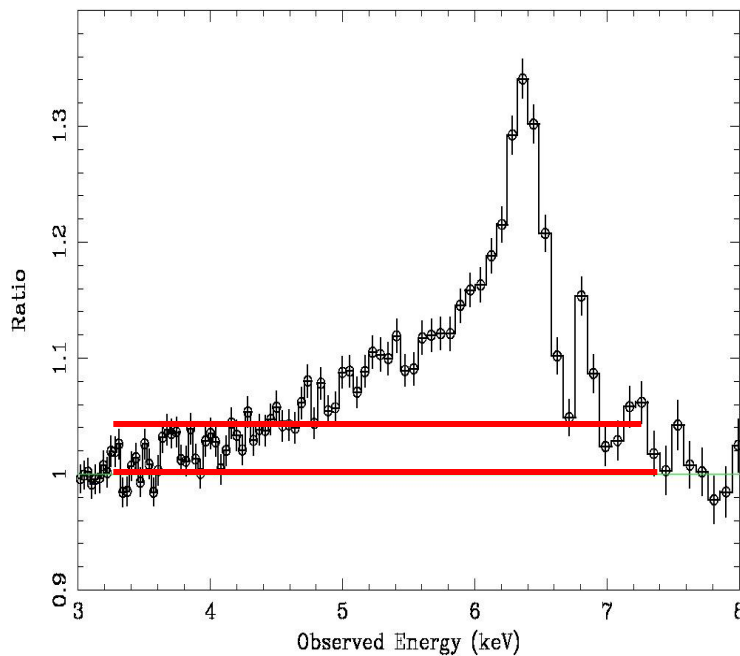


すざくが究める鉄輝線

大きな望遠鏡と良い分解能＋広帯域

円盤の内縁はどこまで小さくなるか

どこまで赤方偏移するか？



ブラックホールの半径の3倍まで。
もしブラックホールが回転していれば、
更に内側まで入り、より低エネルギーに

自己紹介

宇宙科学とは

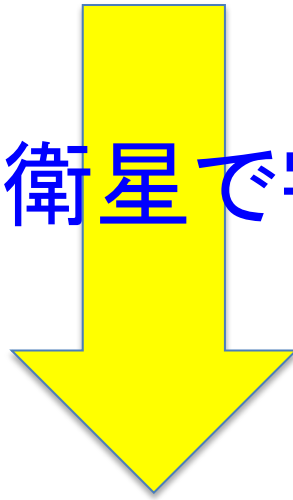
X線で宇宙を見ると

X線で宇宙を見るには

名古屋大学では

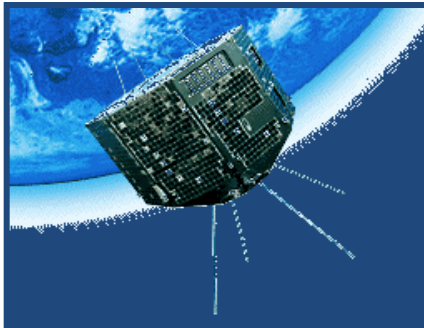
X線で見ると宇宙を見るため

X線天文衛星で宇宙に出る

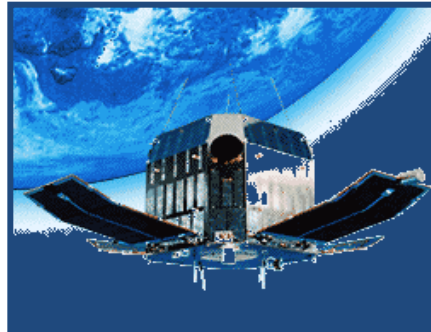


望遠鏡で激しい天体現象を探る

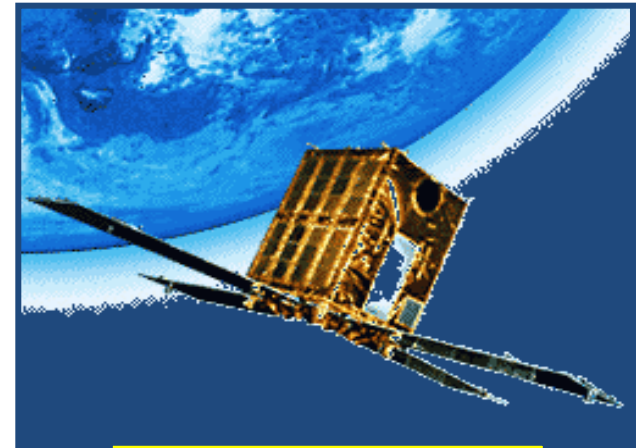
日本のX線天文衛星シリーズ



はくちょう (1979)
90kg



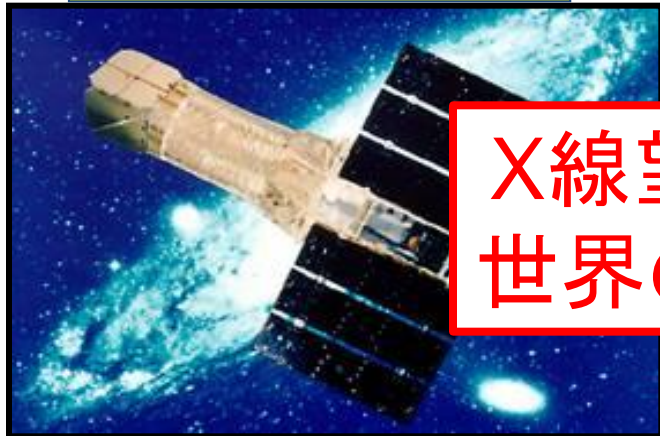
てんま (1983)
200kg



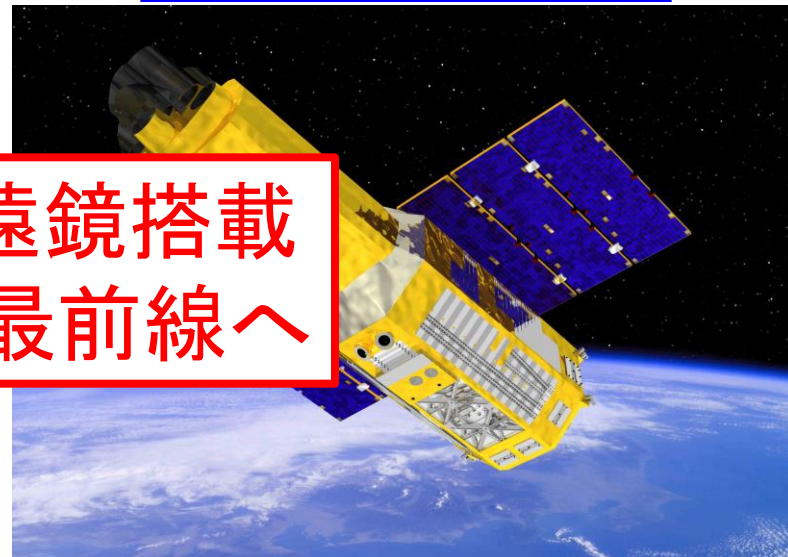
ぎんが (1987)
420kg

あすか (1993) 420kg

すざく (2005) 1700kg



X線望遠鏡搭載
世界の最前線へ

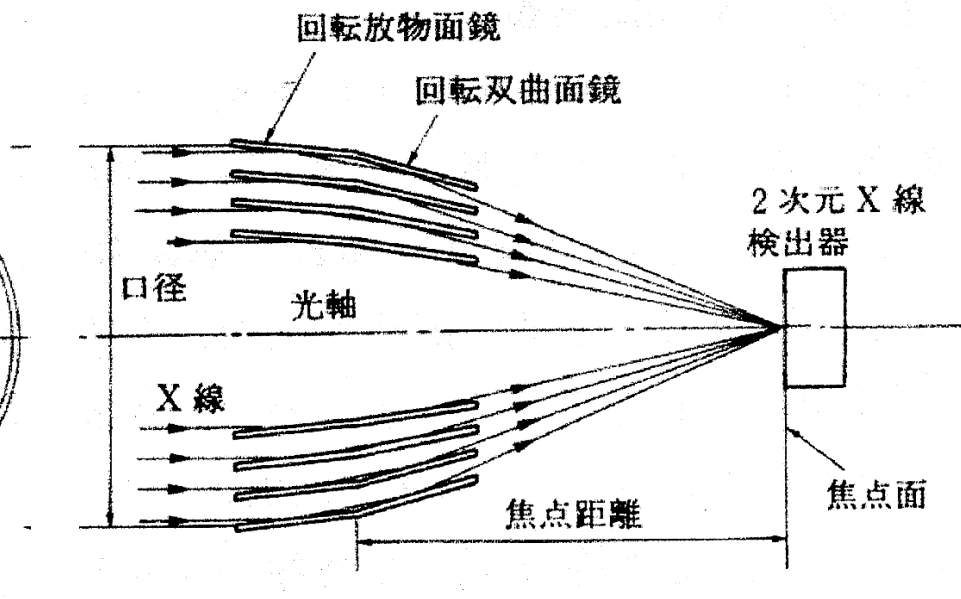
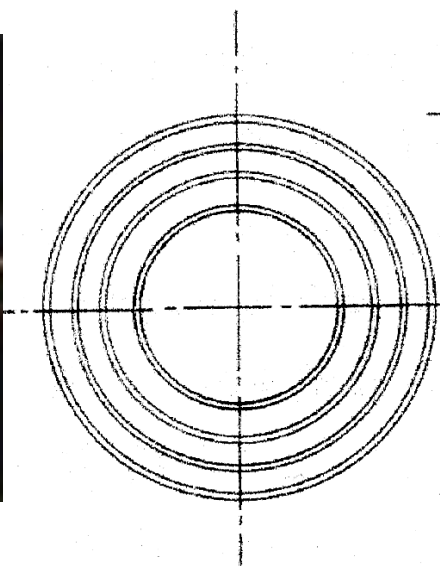
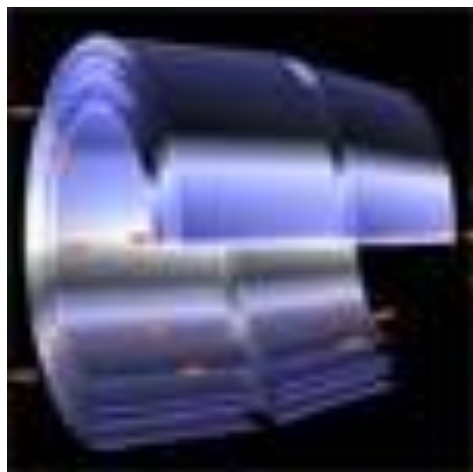
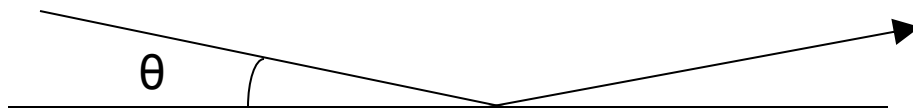


X線望遠鏡を作る

小さな入射角でないと反射されない

→ **斜入射光学系** ($\theta \leq 1$ 度)

円錐の内側を反射面
多数の円錐を
同心円に並べる





X線望遠鏡を作る

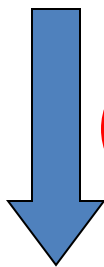
ガラスを磨く(正攻法)

厚さcmの筒

米国のX線望遠鏡

斜入射では重く、

集光効率小



逆転の発想

Serlemitsos博士
(NASA/GSFC)

レプリカ法

ガラスの滑らかな面

($\sigma < 0.3\text{nm}$)

アルミ薄板(0.15mm)に転写

超軽量高効率X線望遠鏡

すざく衛星搭載X線望遠鏡
(名古屋大学、NASA/GSFC、宇宙研)



口径40cm。4台。0.5-10 keV
衛星重量 1.7トン

レプリカ望遠鏡

アクリルコーティング

→ ガラス面の転写で結像性能**2倍向上**

レプリカ法 → **超軽量**反射鏡

研磨しない

薄い基板使用

母型の滑らかさを転写

アルミ基板

エポキシ

金

ガラス基板

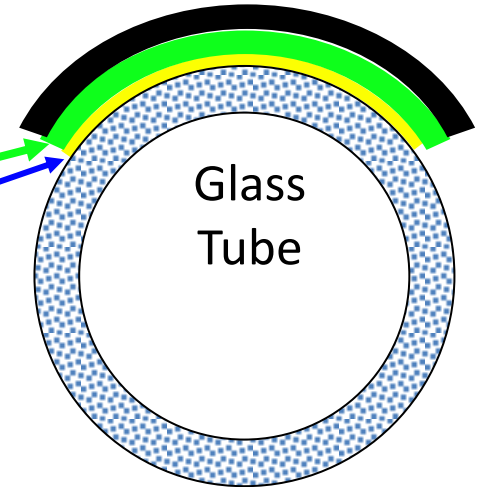


Aluminum
(0.15mm)

Epoxy
(50 μ m)

Au
(~100nm)

Glass
Tube



すざく衛星搭載機器概要

すざく衛星 搭載機器

X線CCDカメラ
XIS 4台



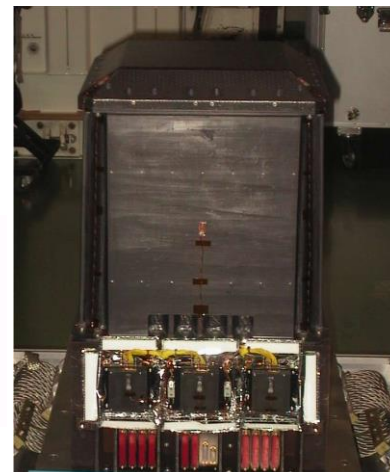
阪大
京大
ISAS
MIT
ほか

X線望遠鏡
XRT 4台

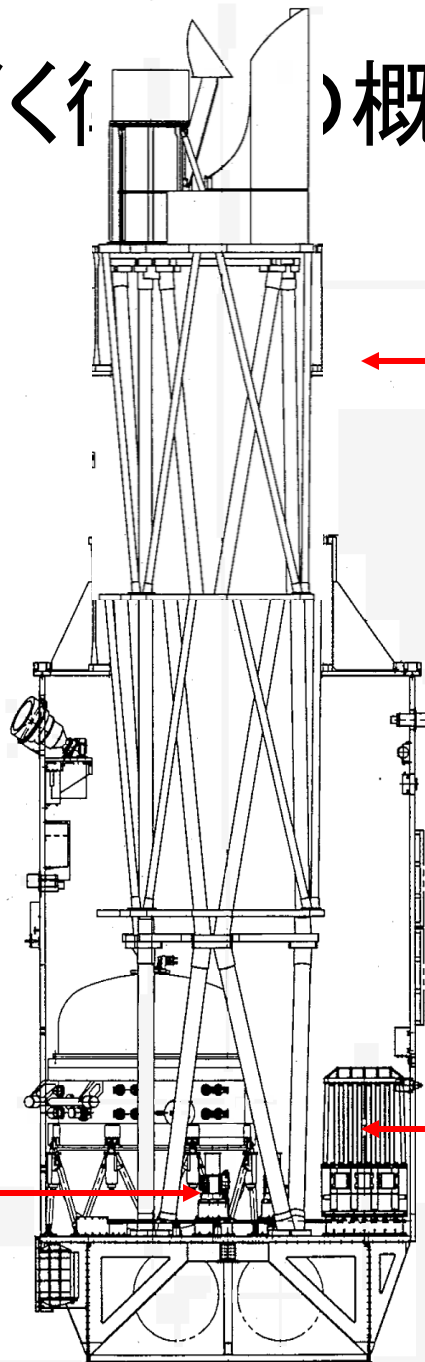


GSFC
名大
ISAS
ほか

硬X線検出器
HXD



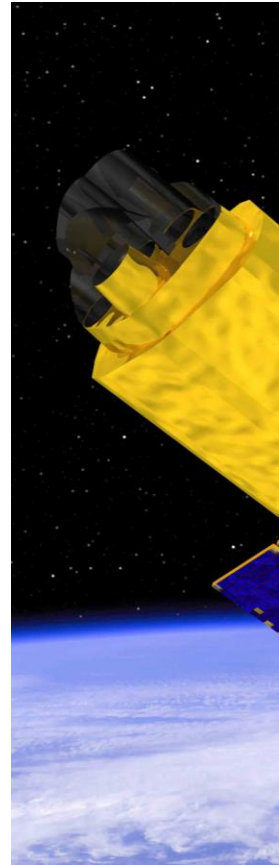
東大
ISAS
ほか



すざく衛星の概要

日本で5番目の X線天文衛星

打上げ	2005年7月
全長(軌道上)	6.9 m
胴体幅	1.9 m
パドル翼幅	5.4 m
重量	1700 kg
ロケット	M-V-6号
軌道	約550 km 略円軌道 傾斜角32度



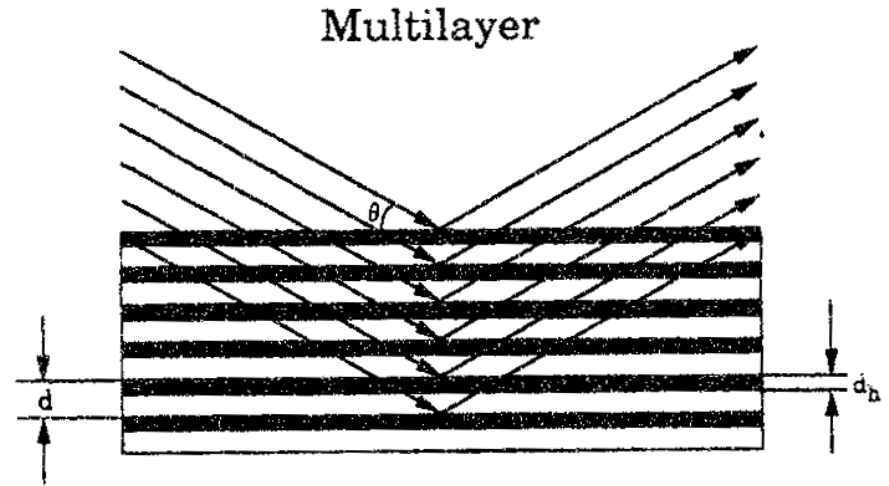
プロジェクトマネージャー 満田和久(宇宙研)
プロジェクトサイエンティスト 國枝秀世(名大)

硬X線望遠鏡開発

多層膜の導入 → 硬X線反射

周期構造で反射率を高める

重元素 vs 軽元素
(Pt, W,,) (C, Si, B₄C,,,))



$n\lambda = 2d \sin \theta$ Bragg 条件

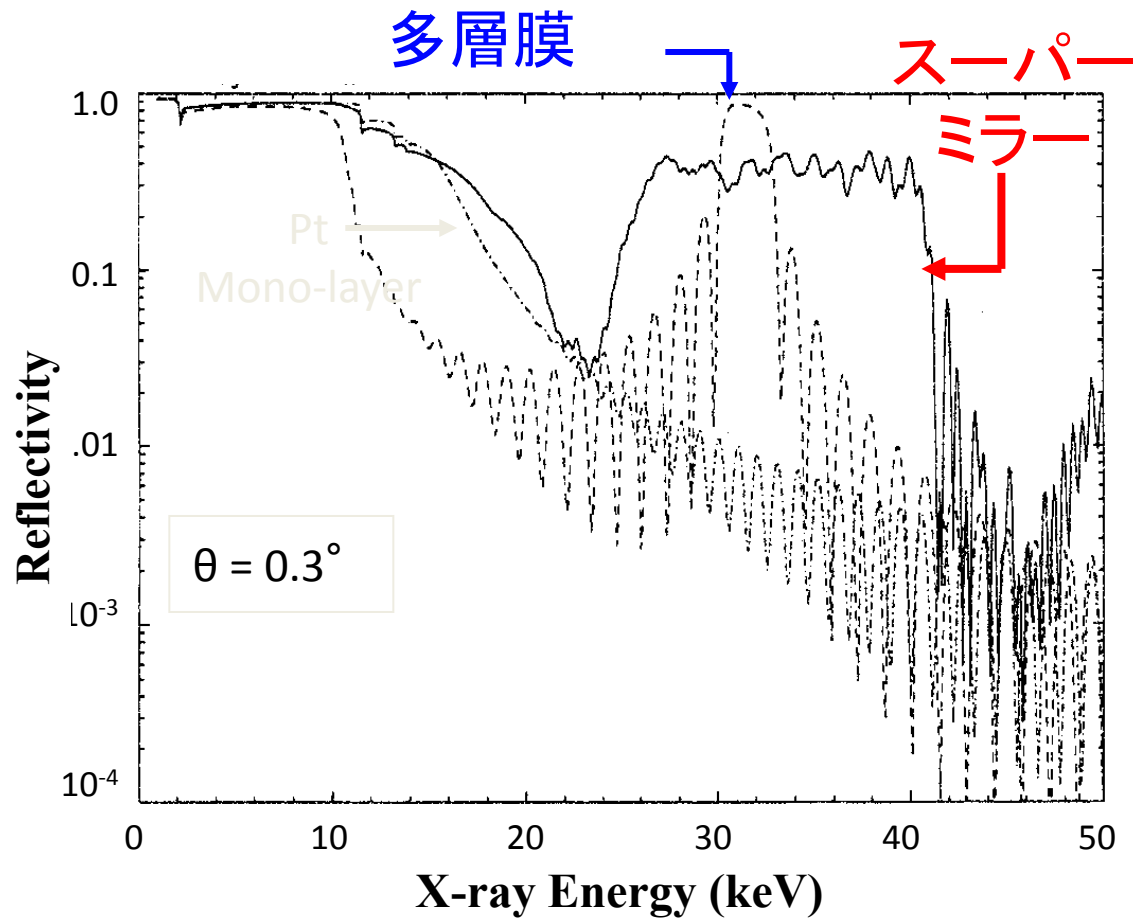
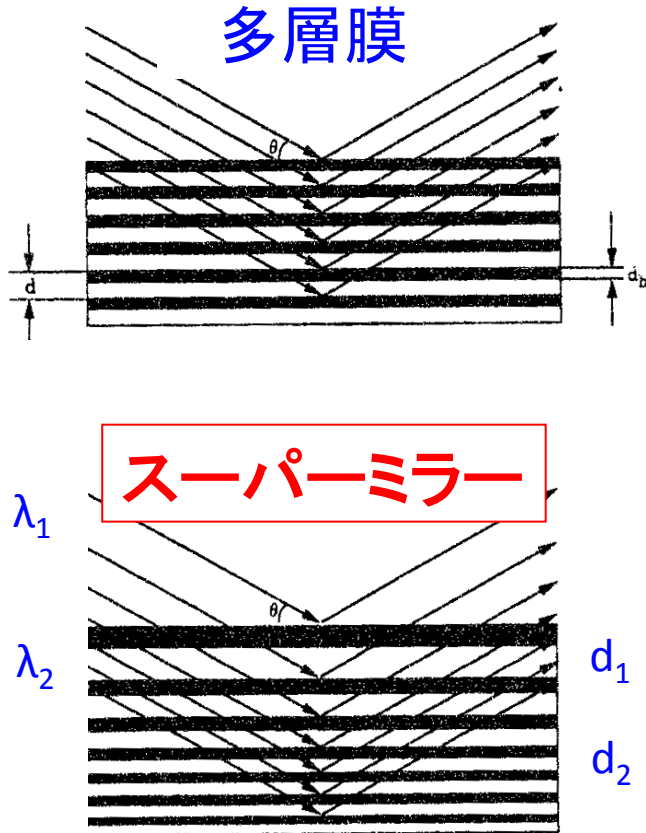
λ : X線波長

d: 周期長

θ : 斜入射角

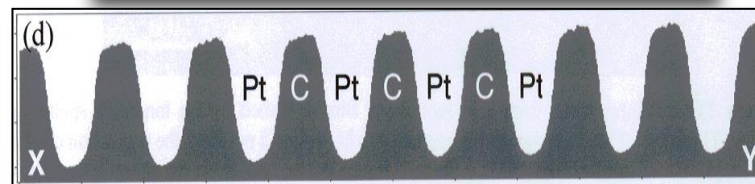
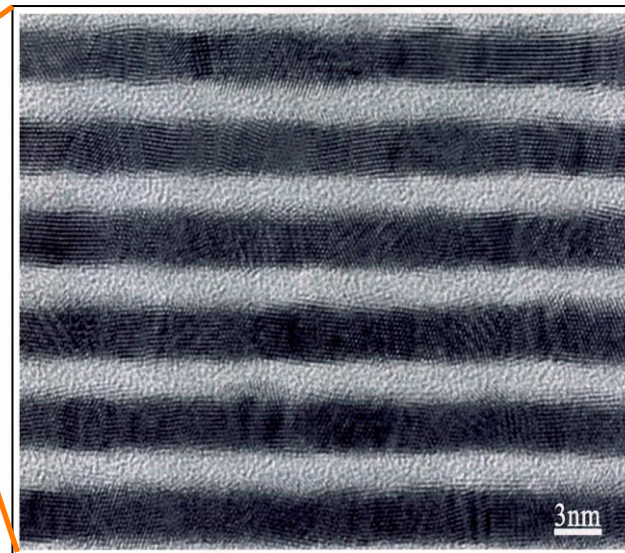
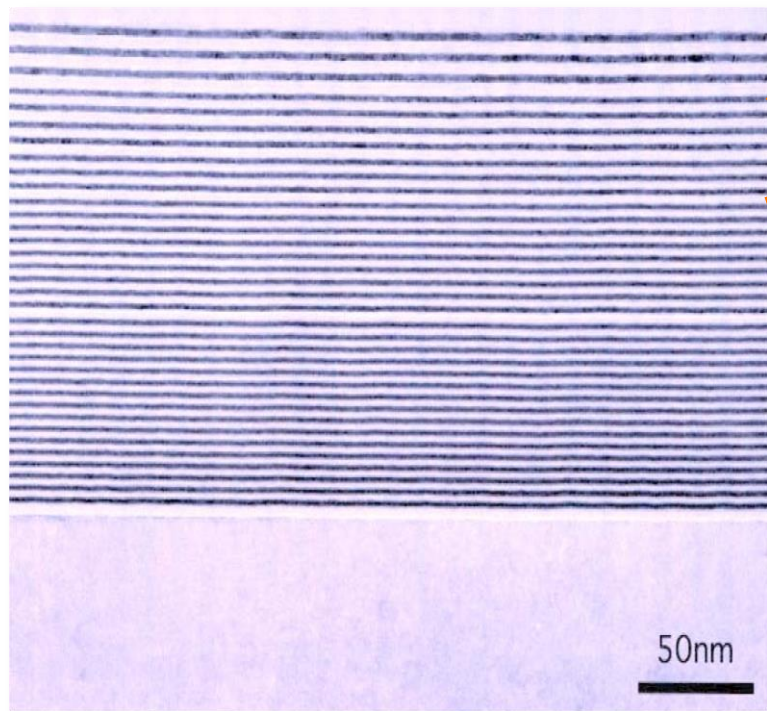
硬X線望遠鏡開発

多層膜スーパーミラーの導入→広帯域化



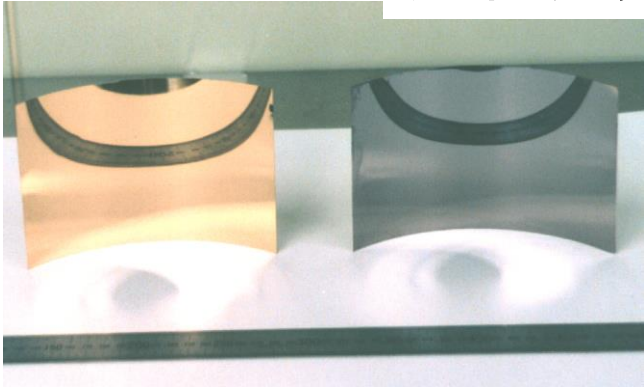
硬X線望遠鏡開発

透過型電子顕微鏡による多層膜の断面観察
(協力: 中部大)

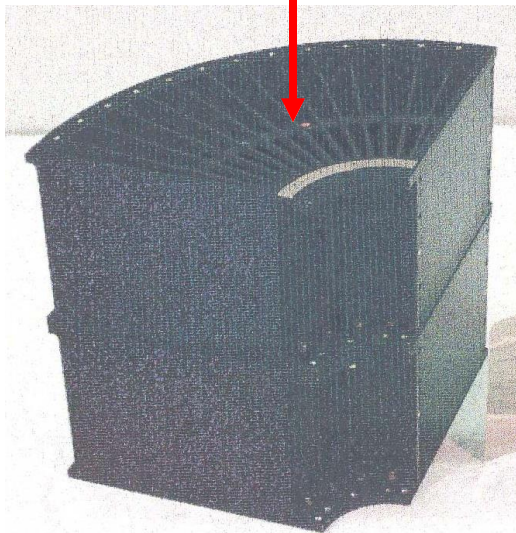


気球望遠鏡

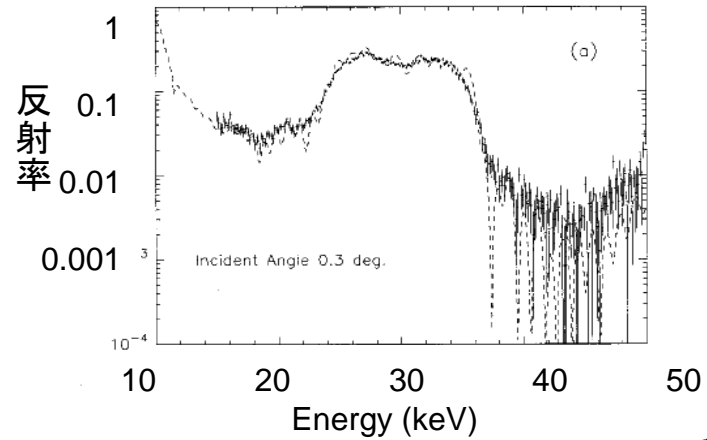
多層膜鏡



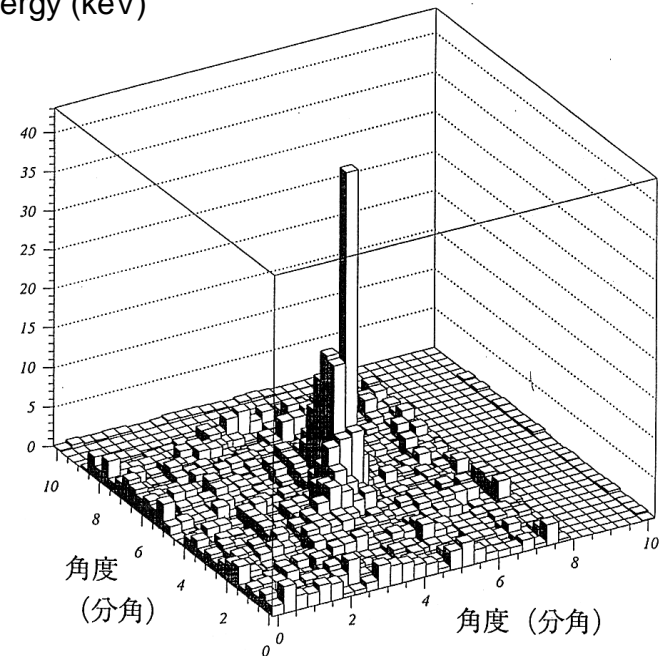
鏡筒に納めた10組の
多層膜スーパーミラー



広大域硬X線反射率



X-ray image
(20-50keV)
1997年



気球望遠鏡

InFOC μ S気球実験

名大. ISAS、NASA GSFC

フライト実施

2001年7月

2004年5月

2004年9月

硬X線簿絵運鏡 1台

口径 40cm

焦点距離 8m

CdZnTe

ピクセル検出器

望遠鏡(名大+NASA)
X線較正試験(宇宙研)
焦点面検出器(NASA)
ゴンドラ(NASA)



ASTRO-H計画

打上げ 2015年度予定

ロケット H-IIa

重量 2700 kg

搭載機器

硬X線望遠鏡システム

口径45cm、焦点距離12m

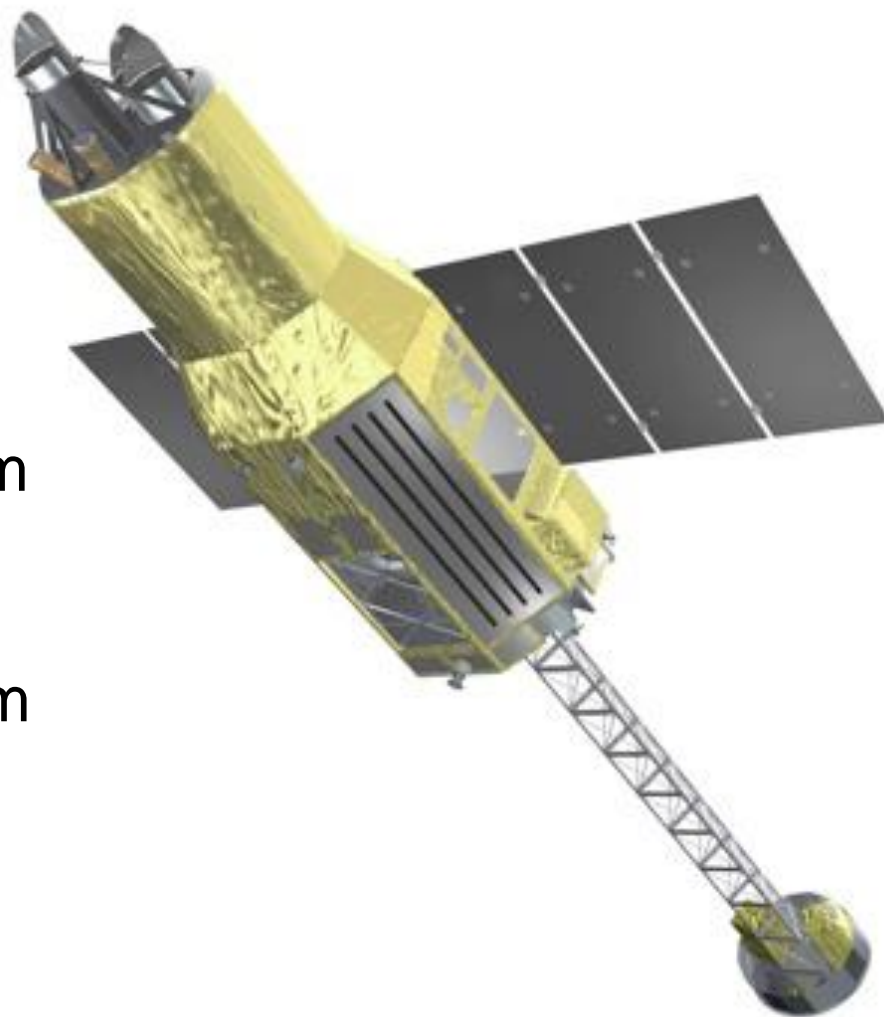
CdTeピクセル検出器

軟X線望遠鏡システム

口径45cm、焦点距離~6m

CCD、高分解能分光器

軟ガンマ線検出器

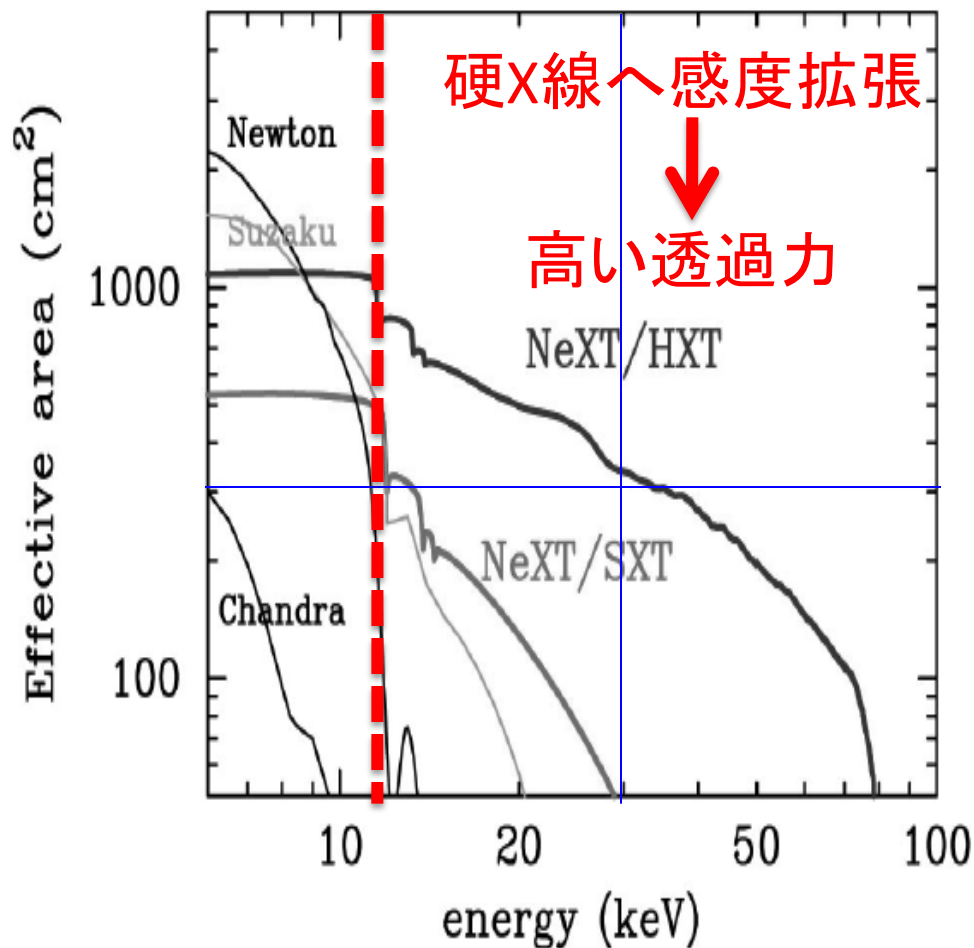


ASTRO-H計画

Astro-H衛星 硬X線望遠鏡



口径 45cm
焦点距離 12m
角分解能 ~ 1.7 分角
面積(30keV) $\sim 300\text{cm}^2$
多層膜スーパーミラー





X線望遠鏡

X線反射望遠鏡

レプリカ法 → **超軽量**反射鏡

研磨しない

薄い基板使用

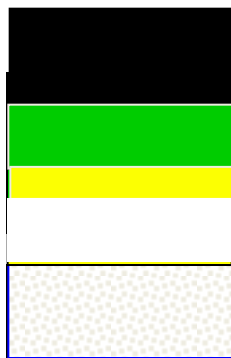
母型の滑らかさを転写

アルミ基板

エポキシ

多層膜

ガラス基板

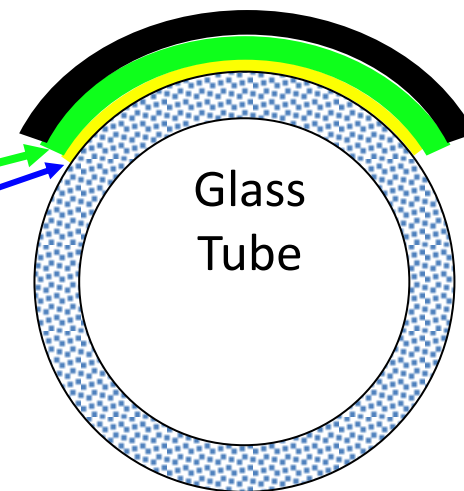


Aluminum
(0.15mm)

Epoxy
(50 μ m)

多層膜
(≤ 100 組)

Glass
Tube





X線望遠鏡

X線反射望遠鏡

レプリカ法 → **超軽量反射鏡**

研磨しない

薄い基板使用

母型の滑らかさを転写

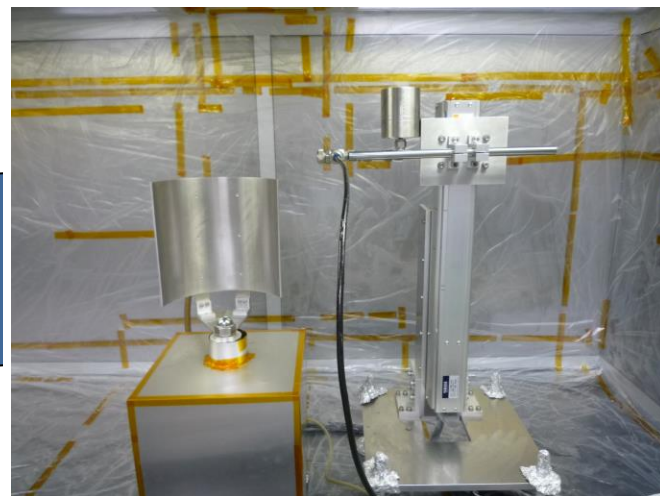




X線望遠鏡

X線反射望遠鏡

スプレー



圧着



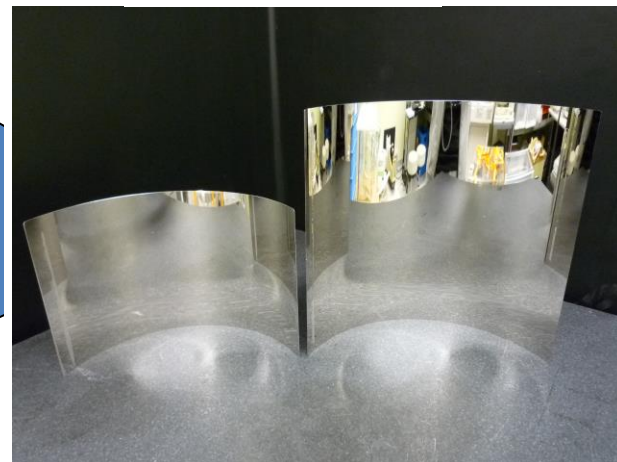
熱硬化



剥離



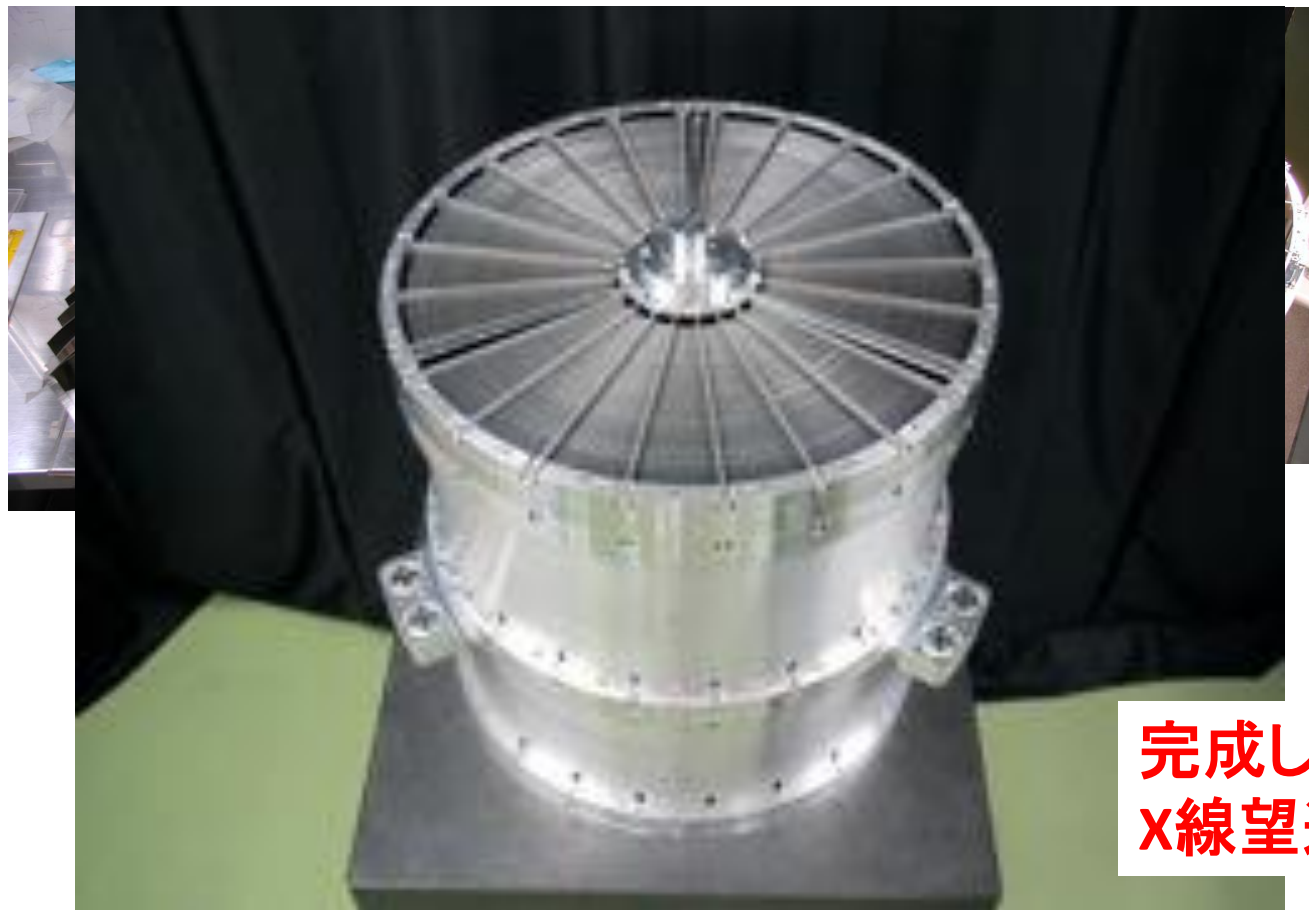
レプリカ鏡





X線望遠鏡

X線反射望遠鏡



鏡筒への
取り付け

完成した
X線望遠鏡

1年間で2000枚製作→1300枚選抜→望遠鏡1台完成→SPring-8較正

X線で激しい天体現象を探る

次期X線天文衛星ASTRO-H計画



硬X線撮像
望遠鏡

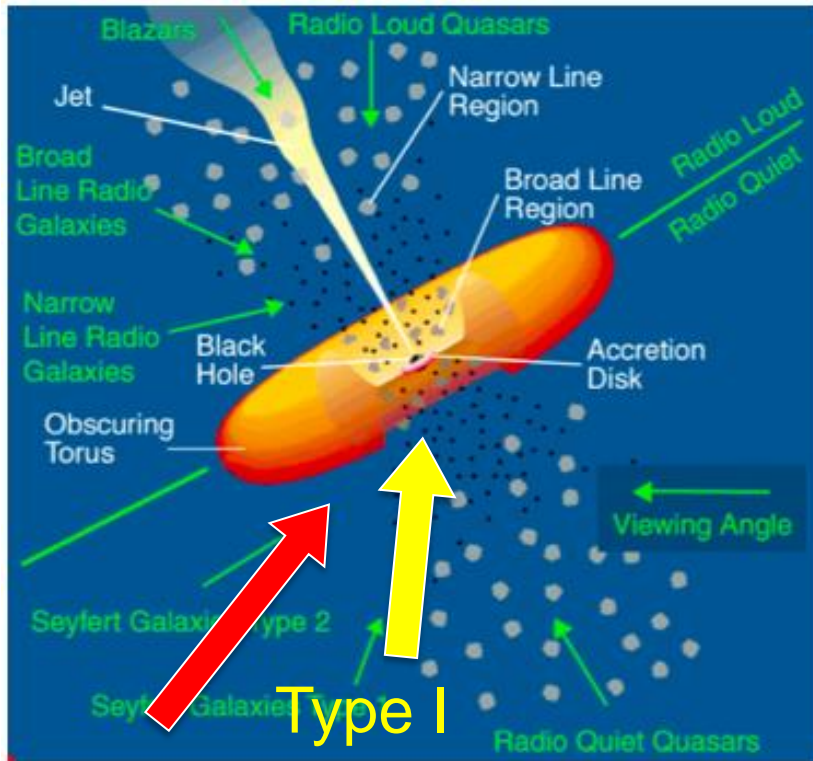
高分解能
X線分光器

全長 9 m、
重量 2.7 トン
高度 500 km
2015年度打上予定

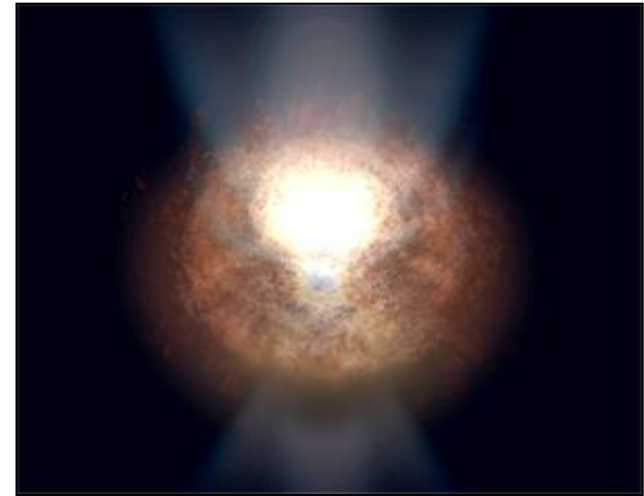
ASTRO-Hの目指すもの

広帯域撮像分光($E < 80 \text{keV}$)

SMBH(吸収)の進化

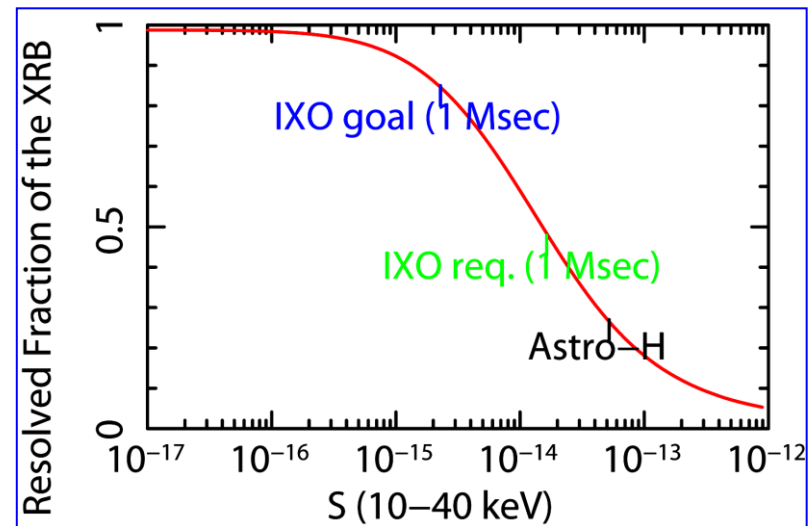


厚いガスに
隠された
巨大BH
(Suzaku)



Type II

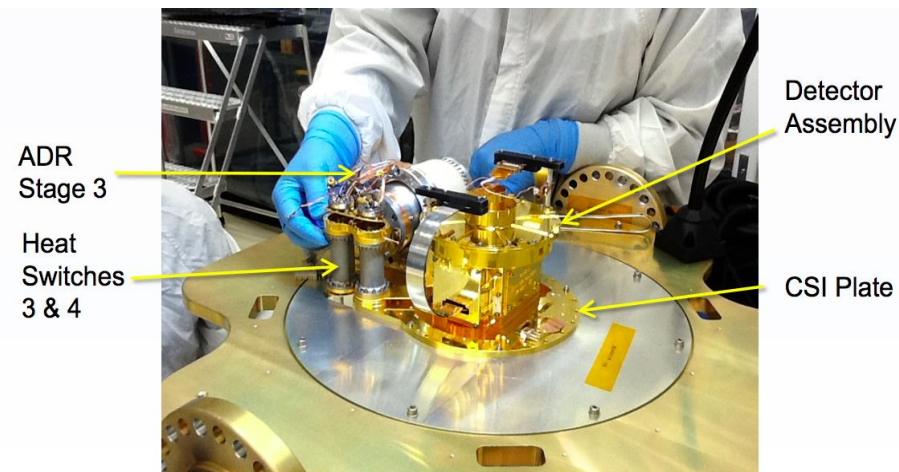
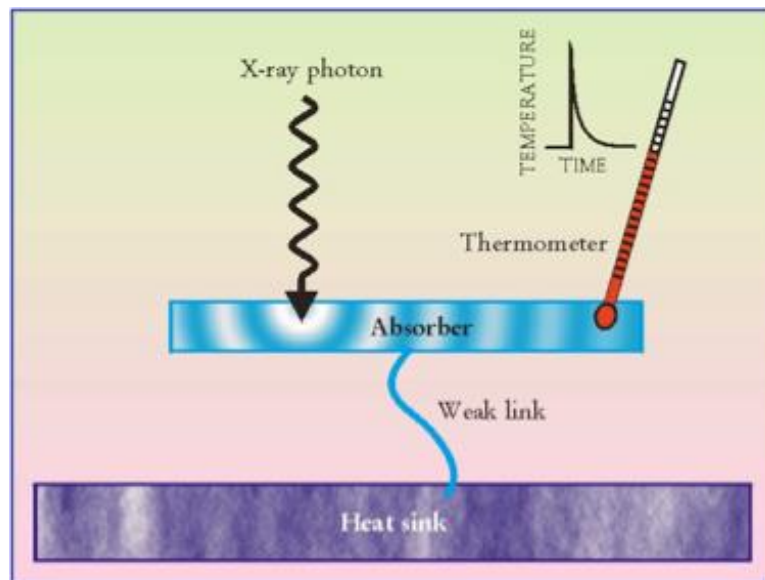
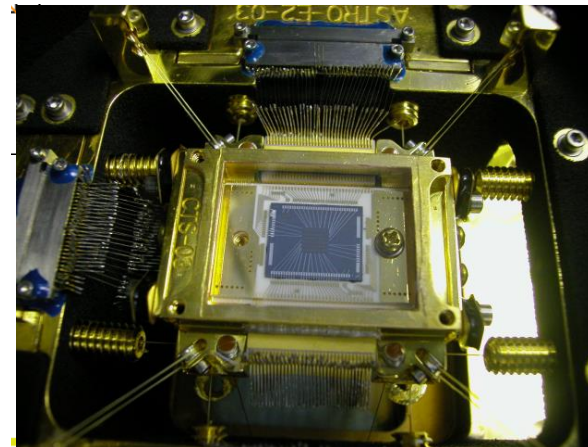
硬X線撮像で
BHを検出する割合
Astro-H(2015)
IXO(202?)

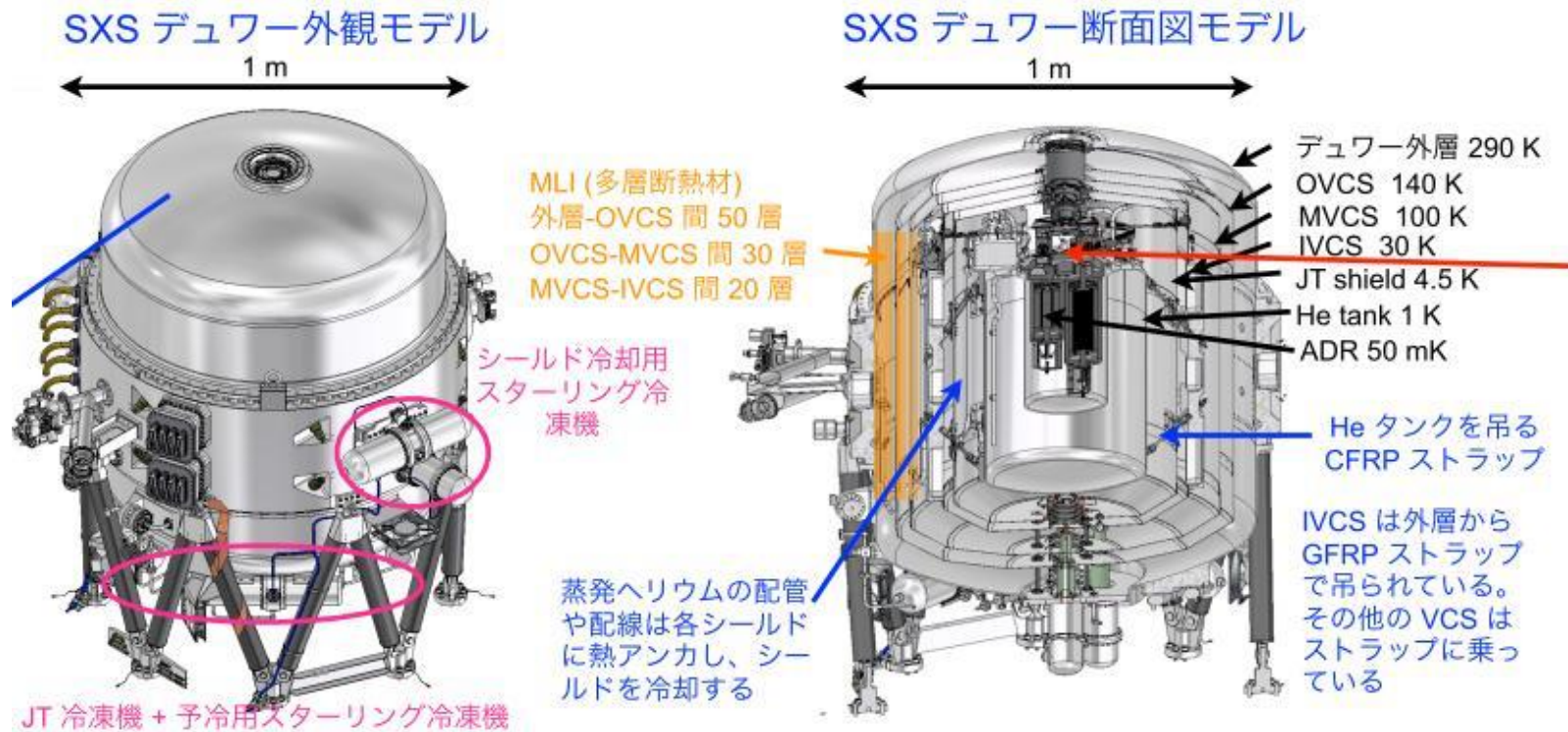


ASTRO-Hの搭載観測装置：SXS

軟X線分光検出器(SXS/XCS)：X線マイクロカロリメーター

マイクロカロリメーターは、エネルギーを熱に変えて温度上昇を精密に測定する。そのために、センサー部を50ミリ度という極低温にまで冷却することが必要である。ASTRO-Hでは日米協力により、これらの高い技術的要求を満たして、従来より一桁以上も良い分光性能を実現して、高温ガスの運動が初めて測定可能となる。



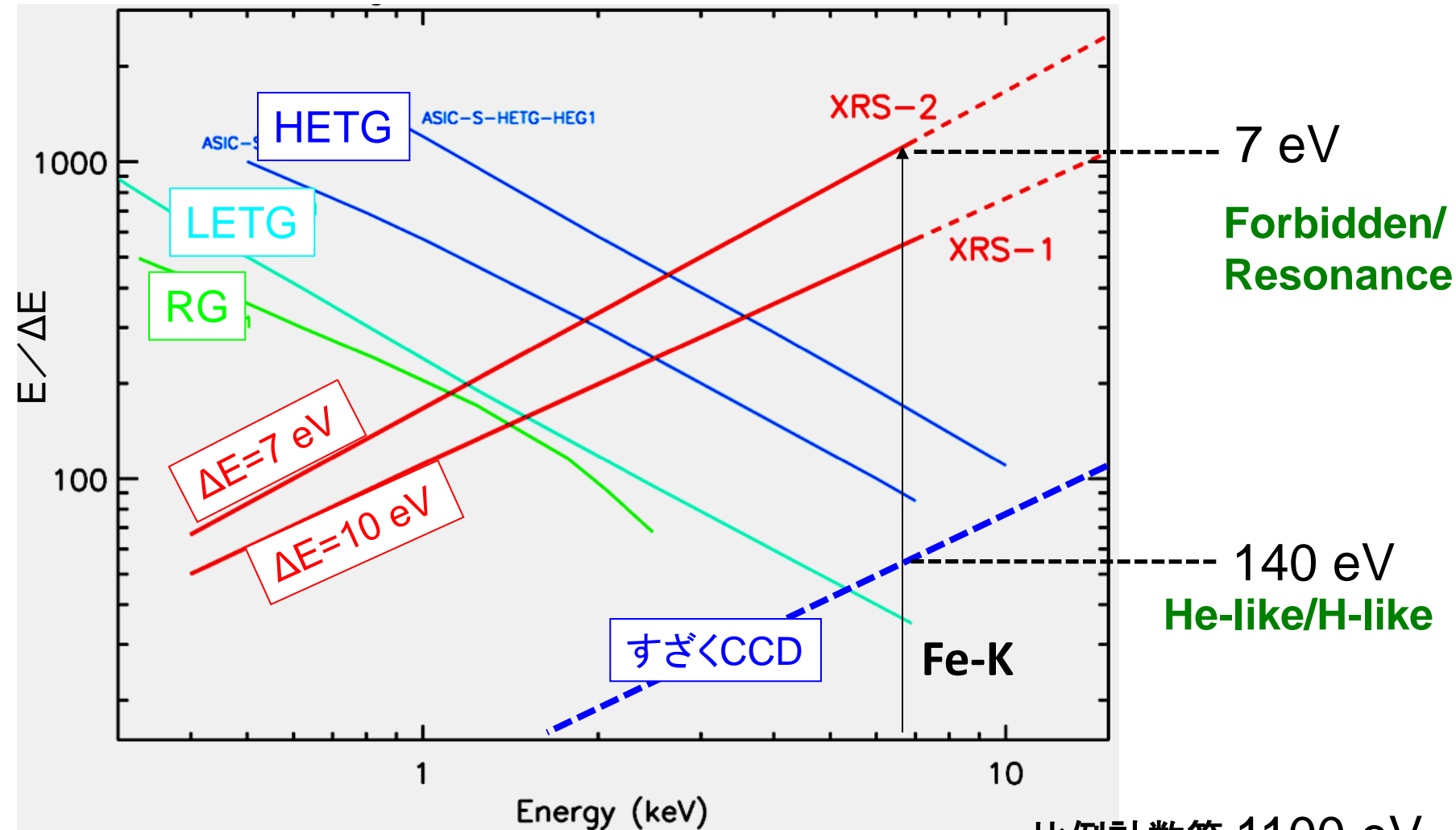


断熱消磁冷凍機+液体He+ジュールトムソン
冷凍機+2段式スターリング冷凍機

ASTRO-Hの目指すもの

(1) 高分解能分光($\Delta E < 7\text{eV}$)

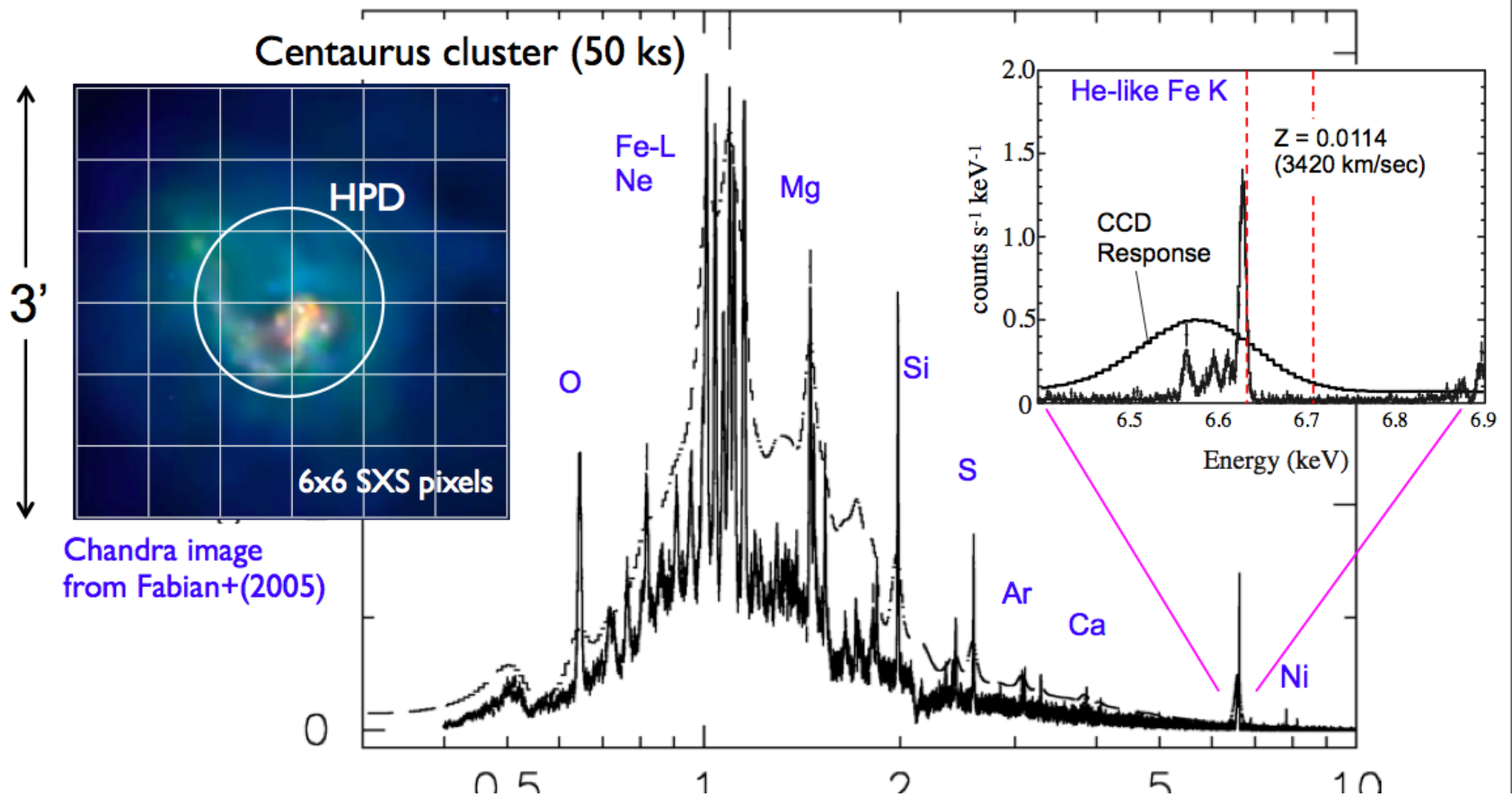
ΔE @ 7 keV



高分解能分光器(SXS)

High Resolution Spectroscopy by a micro-calorimeter array

<7 eV (FWHM) @ 6 keV



衛星試験中のASTRO-H衛星 (音響試験)



自己紹介

宇宙科学とは

X線で宇宙を見ると

X線で宇宙を見るには

名古屋大学では



名古屋大学理学研究科

宇宙物理学グループ

宇宙の構造と進化を解明

4つの観測チーム

2つの理論チーム



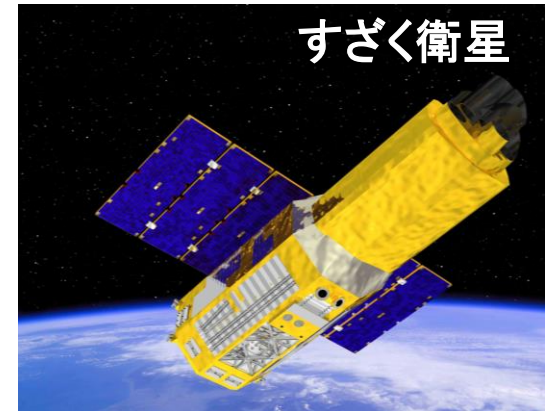
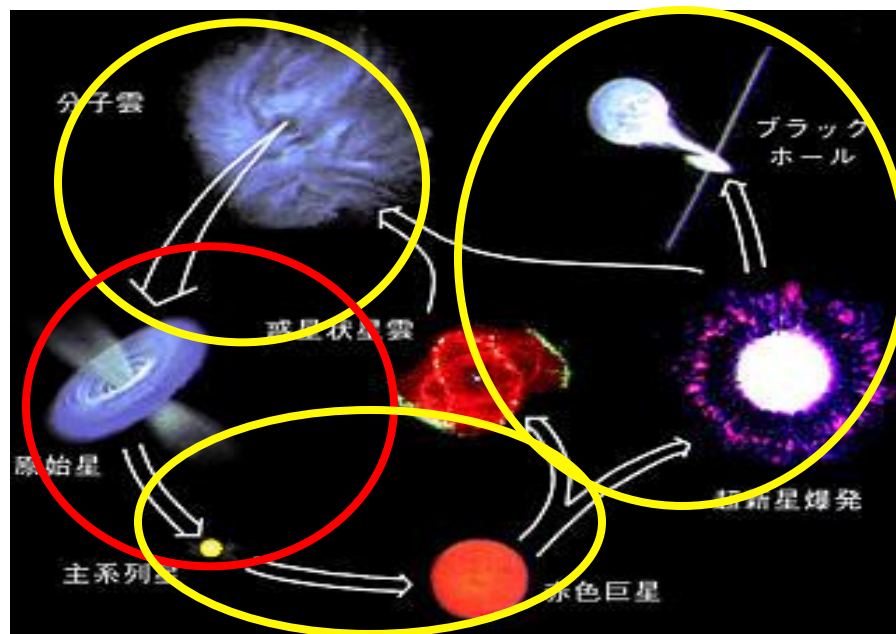
あかり衛星

赤外線観測

電波観測



なんてん2



すざく衛星

X線観測



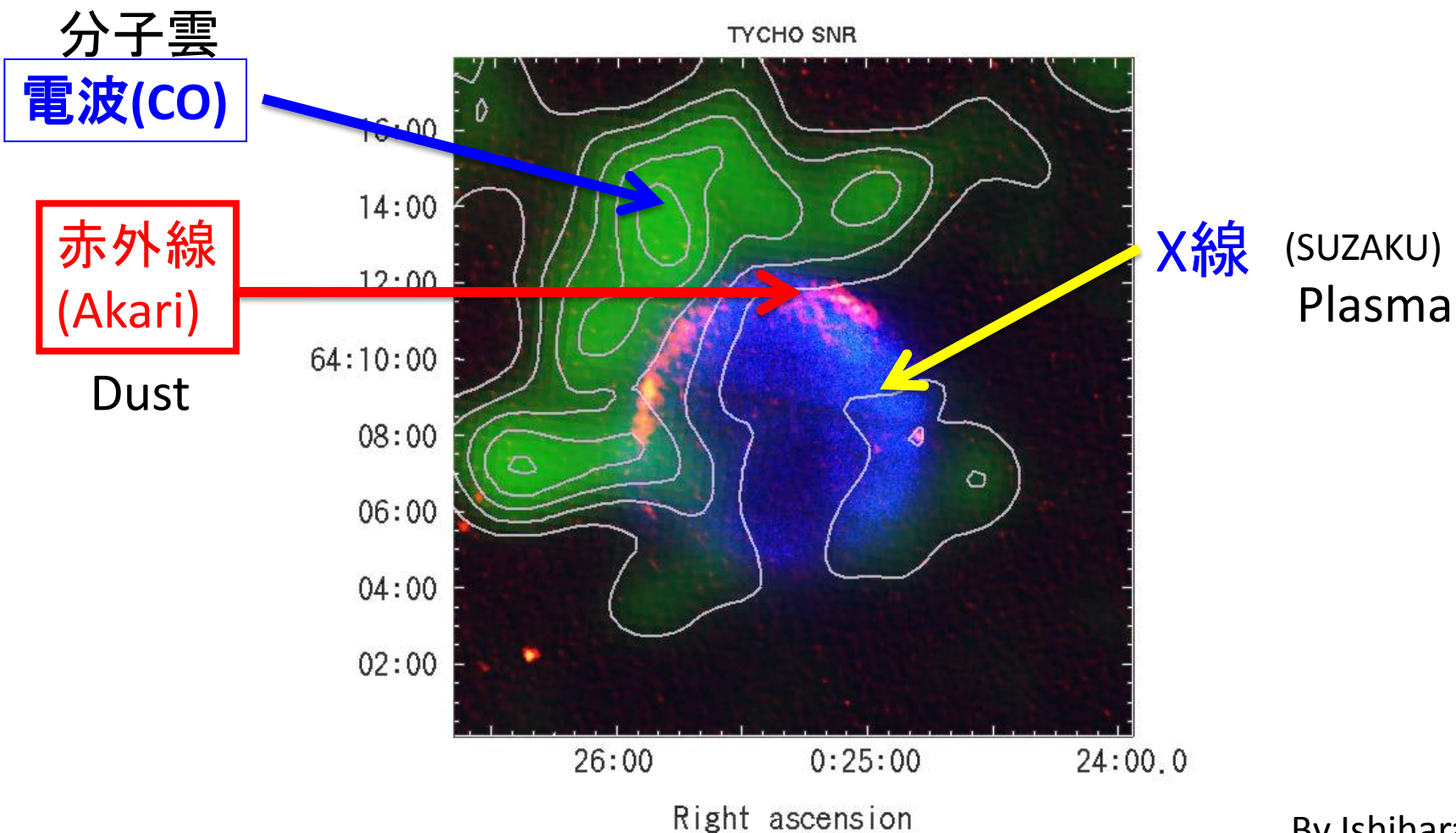
南アフリカ望遠鏡

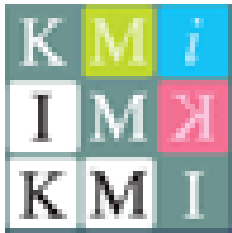
可視・赤外光観測



多波長観測+解析・理論研究

超新星残骸 Tycho SNR 多波長観測





素粒子宇宙起源研究機構

Kobayashi-Maskawa Institute for the Origin of Particles and the Universe

Kobayashi-Maskawa Institute
for the Origin of
Particles and the Universe

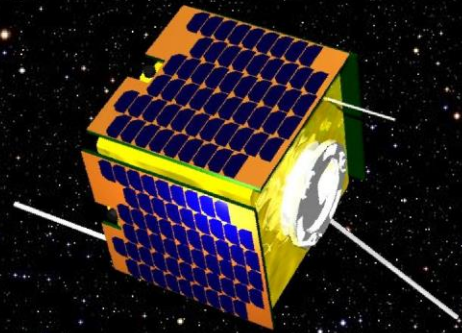


機構長：益川敏英特別教授
専任教員 8名



レストラン

ノーベル賞展示室



リーディング大学院
横断型プログラム

フロンティア「宇宙」開拓リーダー — 養成プログラム

プログラム責任者: 國枝秀世
プログラムコーディネータ: 田島宏康
名古屋大学

2015天文夏の学校
X線の観測で見えてくる宇宙

第一部：X線で見える激動の宇宙
第二部：X線望遠鏡用反射鏡開発

名古屋大学
國枝秀世

2015.07.29