「すざく」衛星を用いた Ia型超新星の起源解明と 宇宙における非平衡 プラズマ物理学の開拓

山口 弘悦(やまぐち ひろや) NASA ゴダードスペースフライトセンター および メリーランド大学カレッジパーク校

手前味噌で恐縮ですが…

NASA/GSFCの最高奨励賞 **Robert H. Goddard Award** (個人部門)を今月受賞します。

日米協力ミッション**「すざく」**の科学成果が SPSS (JAXA)・NASAの両機関から 評価いただけたことを誇りに思います。

謝辞を兼ねて…

本研究は「すざく」なしには 絶対に成し得ませんでした。

「すざく」の開発・運用に関わられた全ての皆様、 学生時代からご指導いただいた 小山勝二先生、 『XIS』の地上試験と初期運用で特にお世話になった 中嶋大さん、松本浩典さん、鶴剛さん、林田清さん 戦友の勝田哲さんに、厚く御礼を申し上げます。

謝辞を兼ねて…

本研究は、米国の研究者との コラボレーションなしには 絶対に成し得ませんでした。

日本学術振興会の海外特別研究員制度に 深甚の謝意を表します。

日本のX線天文衛星







はくちょう (1979年) **てんま** (1983年) **ぎんが** (1987年)







あすか (1993年)

すざく (2005年)

ひとみ (2016年)

「すざく」の主力検出器『XIS』



X線CCD = 「撮像分光」が可能な検出器 大学院時代は地上較正と初期機上較正に専念

CCDの性能を極限まで引き出し 史上最高の輝線検出能力を実現

ライバル衛星との性能比較

高空間分解能



高エネルギー分解能

すざく



Chandra



(主観ですが)「すざく」はより**「物理」**を引き出す衛星

Ia型超新星の研究



<u>白色矮星の核融合暴走による爆発現象</u> 大きさが地球程度、質量が太陽程度の「縮退星」









- ニュートリノ生成

- ブラックホール・ 中性子星の起源



- 爆発的元素合成 (鉄の主要起源)
- 明るさがほぼ一様



宇宙の加速膨張を発見(2011年ノーベル物理学賞)



宇宙の加速膨張を発見(2011年ノーベル物理学賞)



Single Degenerate (SD) 説 Double Degenerate (DD) 説 伴星からの質量降着 白色矮星同士の合体



現代宇宙物理学における最重要課題の一つ (米国科学アカデミー)





距離が近く、重元素組成を詳しく調査できる

© NASA/CXC

研究方法:「超新星残骸」のX線観測



各重元素の輝線から、その生成量を決定

元素合成に着目して "SD vs DD" を解決



元素合成に着目して "SD vs DD" を解決



元素合成に着目して "SD vs DD" を解決



元素合成に着目して "SD vs DD" を解決 **58** 12**C** 56Ni 16**()** 55**CO** + 中性子 ~80日 ~ 2.7年 ⁵⁵Co 58Ni 56**Ni** 陽子 27 28 28 ⁵⁶Fe ⁵⁵Mn 中性子 28 28 30

電子捕獲が起こると55Mnや58Niが増える!

Ia型超新星残骸 3C 397



Yamaguchi et al. 2015, ApJL, 801, L31

大量の Mn と Ni を発見



<u>電子捕獲反応の観測証拠(世界初)</u>



「すざく」はX線観測にしかできない方法で Ia型超新星の起源を解明した



非平衡プラズマの奥深い物理

<u>超新星残骸の</u>元素量測定は簡単ではない (正しくできるのは世界で数人)



放射過程の物理的 理解が不可欠

問題点:プラズマの「電離非平衡」

プラズマ温度と 鉄イオンの電離度の関係 超新星残骸(X線プラズマ)の 10⁷K **典型的な電子温度** 10⁸K 300 K (室温) 10⁶ K 温度 イオン化 ~10 eV ~0.1 keV $\sim 1 \text{ keV}$ ~10 keV エネルギー 若い超新星残骸に多く存在 平衡プラズマならこれらが卓越 (雷離が進みきっていないため) 多価イオンの 原子構造 M・N殻 中性(未電離) アルゴン状 ネオン状 ヘリウム状 水素状

(i) K殻のポテンシャルより高いエネルギーを持つ自由電子 と (ii) L殻・M殻に多数の束縛電子を残す低電離イオン が共存

「内殻過程」が起こる!



非平衡プラズマの複雑な物理が 超新星残骸の元素量測定を困難に

電子遷移と放射の物理を解く

米国の理論原子物理学者と連携(海外学振)

→ 非平衡プラズマのX線放射モデルを構築

→ 元素量の精密測定を初めて実現

「すざく」は量子物理学の発展に寄与した

例:鉄イオンの蛍光輝線エネルギーを電離階数ごとに算出



鉄Kα蛍光を利用した新しい天体分類法



「すざく」は非平衡プラズマの難点を利点に変えた

鉄<u>K</u>β蛍光を利用した超低電離プラズマ診断



鉄KB蛍光を利用した超低電離プラズマ診断



ティコ(Tycho)の超新星残骸





ティコ・ブラーエ



鉄Kβ蛍光輝線を初めて検出



KαとKβは別起源!



「すざくの結果で一番面白く教訓的」by 小山先生 KβはKαの"付属物"に過ぎないと長らく思われていた

宇宙物理学的意義 ①







逆行衝撃波の現在位置と 加熱直後のプラズマ状態を 知る手段を初めて提供した

等高線:Fe Kα カラー:Fe Kβ



「無衝突電子加熱」の観測証拠 強いKβ蛍光 → $kT_e \gtrsim I_K \approx 7 \text{ keV}$





「無衝突電子加熱」の観測証拠

強いKβ蛍光 → $kT_e \gtrsim I_K \approx 7 \text{ keV}$ $V_s = 5000 \text{ km/s} \rightarrow kT_e = (3/16) m_e V_s^2 \approx 0.03 \text{ keV}$





「無衝突電子加熱」の観測証拠

強いKβ蛍光 → $kT_e \gtrsim I_K \approx 7 \text{ keV}$ $V_s = 5000 \text{ km/s} \rightarrow kT_e = (3/16)m_eV_s^2 \approx 0.03 \text{ keV}$



「すざく」は宇宙特有の非平衡現象を多数発見した



Mach 1000 Shock Wave Lights Supernova Remnar

Release No.: 2013-28

For Release: Monday, November 25, 2013 - 3:00pm



Cambridge, MA - When a star explodes as a supernova, it shines brightly for a fe or months before fading away. Yet the material blasted outward from the explo glows hundreds or thousands of years later, forming a picturesque supernova remna powers such long-lived brilliance?

In the case of Tycho's supernova remnant, astronomers have discovered that a rever wave racing inward at Mach 1000 (1000 times the speed of sound) is heating the and causing it to emit X-ray light.

"We wouldn't be able to study ancient supernova remnants without a reverse shoc them up," says Hiroya Yamaguchi, who conducted this research at the Harvard-Sm Center for Astrophysics (CTA).

Tycho's supernova was witnessed by astronomer Tycho Brahe in 1572. The appear this "new star" stunned those who thought the heavens were constant and uncha its brightest, the supernova rivaled Venus before fading from sight a year later.

Modern astronomers know that the event Tycho and others observed was a supernova, caused by the explosion of a white dwarf star. The explosion spewed like silicon and iron into space at speeds of more than 11 million miles per hou km(s).

When that ejecta rammed into surrounding interstellar gas, it created a shock we equivalent of a cosmic "sonic boom." That shock wave continues to move outward about Mach 300. The interaction also created a violent "backwash" - a reverse she that speeds inward at Mach 1000.

ハーバード プレスサイト



MAGAZINE | BLOGS | TOPICS | PHOTOS | SEARCH | RSS m

TOPPICS Space Exploration | Math | Stars | Physics | Subatomic Particles | Cosmology | Mars | Extraterrestrial Life | Dark Matter | Solar System | Stargazing | Exoplanets | Meteors & Asteriolds | Comets

Home » May » Supernova's Shocking Second Act

FROM THE MAY 2014 ISSUE

Supernova's Shocking Second Act

Scientists have discovered what fuels the high-energy X-rays bursting from Tycho's supernova.

By Sarah Scoles | Friday, April 04, 2014

RELATED TAGS: STARS, PHYSICS, SUPERNOVA





glows in both high-energy (blue) and low-energy (red) X-rays. Chandra X-ray Observatory/NASA

ディスカバー誌



1 D

SUBSCRIBE

DIGITAL

RENEW | BACK ISS DIGITAL I

Discover



天文月報・物理学会誌

研究成果のまとめ

- Ia型超新星に伴う電子捕獲の証拠を特定 → 親星の進化解明に向けて大きな一歩

– 非平衡プラズマの内殻過程を初めて計算
→ 超新星残骸の元素量精密測定を実現
→ 物理学としても重要な諸現象を発見

「すざく」のポテンシャルを 最大限に引き出せた

X線超精密分光の時代が到来



X線超精密分光の時代が到来



– 飛躍的な精度で元素量測定・プラズマ診断 – <u>予想外の発見</u>も必ずもたらされる

「すざく」から学んだフィロソフィー - 基礎物理に忠実に - 自然の声を聞き逃さない (データを隅々まで見る)

→「ひとみ」のサイエンスにも活かし、 X線天文の伝統を次に繋ぎたい

「すざく世代」として研究できたことを 誇りに思います!