

多様性の源：超新星残骸

馬場 彩

(東京大学理学系研究科・物理学専攻)

Outline

0. introduction

1. **超新星残骸progenitorに関する最近の話題**
2. **宇宙線加速に関する最近の話題**
3. **X線天文将来計画**

0. 1. 星の死: 超新星爆発

星の中には、死の際に大爆発を起こすものがある

(c)アングロオーストラリア天文台

SN1987A:
1987年に大マゼラン雲で
一つの星が爆発

11個のニュートリノが
カミオカンデで検出

-> 2002年
小柴先生ノーベル賞



0.2. どのくらいすごい爆発?

「明月記」(藤原定家の日記, 国宝)

西暦1006年5月1日
火星のように明るい星が
現れた
昼間でも見えて、
夜でも本が読める

知らない星が
突然現れた

もうすこし定量的に。

爆発のエネルギー: 10^{44} J

~ 日本の消費電力 10^{26} =100稔年分

~ 太陽が100億年かけて出すエネルギー

星一つ分の物質が吹き飛ぶ: $\sim 10^{33}$ g

-> $E = 1/2 mv^2$ より

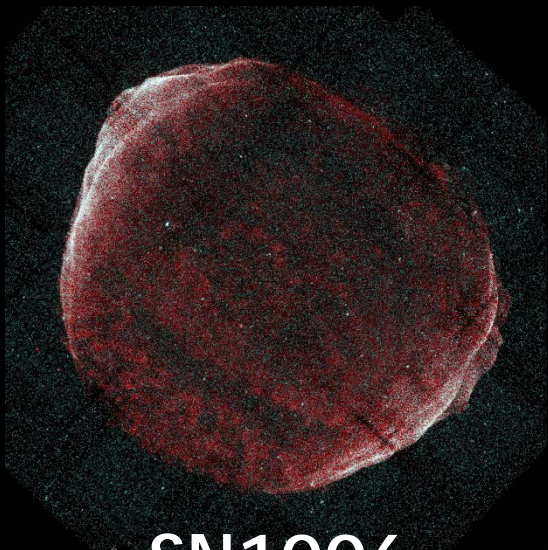
吹き飛ぶ物質の速度 ~ 秒速1万km

(光速の3%)

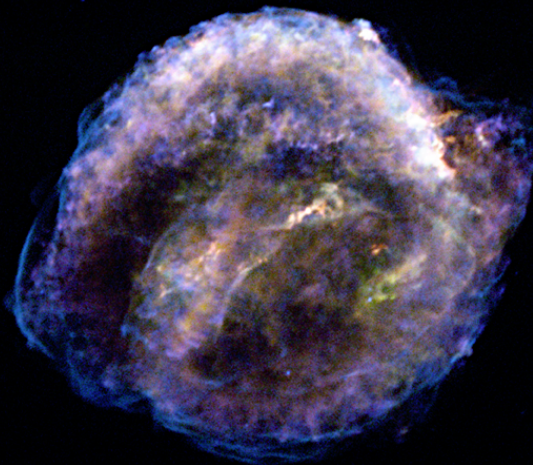
超音速なので、衝撃波を形成

衝撃波の内側は超高温のプラズマになる。

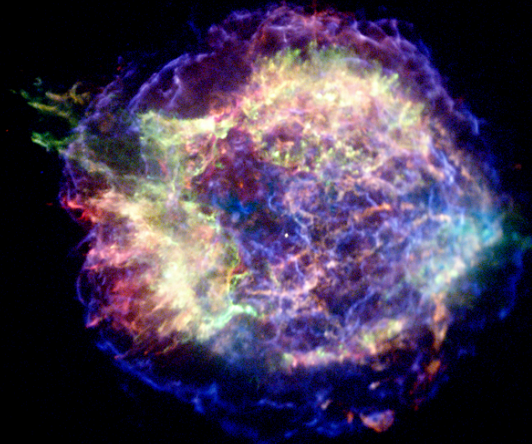
天の川銀河では、30年に一回くらい、
大爆発が起こっている。



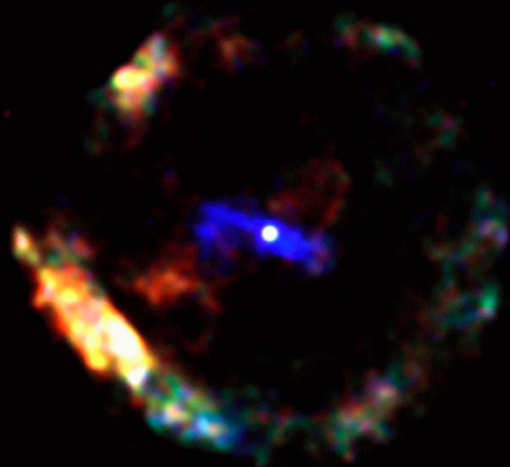
SN1006



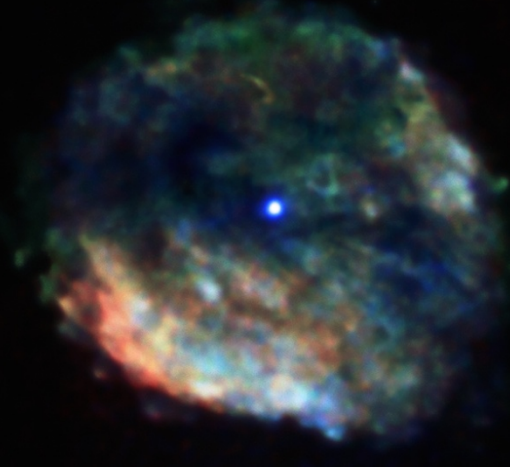
Kepler



Cas A



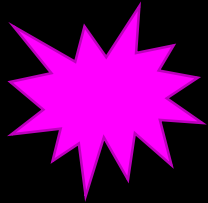
G11.2-0.3



RCW103

0.3. 超新星残骸の進化

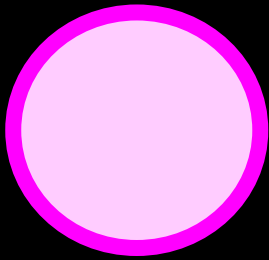
1. 自由膨張期



爆発後自由膨張

$R \sim t, v \sim \text{const.}$ time scale: 10^{2-3} years

2. 断熱膨張期



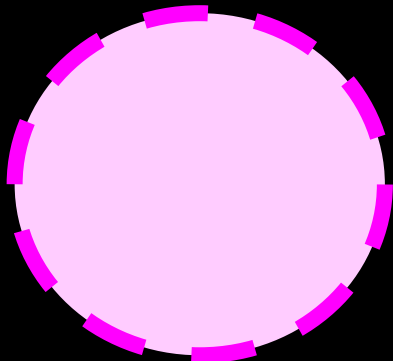
掃き集めた星間物質による減速が無視できなくなる

$R \sim t^{2/5}, v \sim t^{-3/5}$ time scale: 10^{3-4} years

断熱近似が成り立つプラズマを形成

$T \sim v^2 \sim t^{-6/5}$

3. 放射冷却期



断熱膨張により温度低下

0.2 keV程度で輝線放射が無視できず

さらに温度低下

速度が200km/sを下回り、星間空間に消える

time scale $\sim 10^{5-6}$ years

0.4. 宇宙での超新星残骸の役割

熱的観点から:

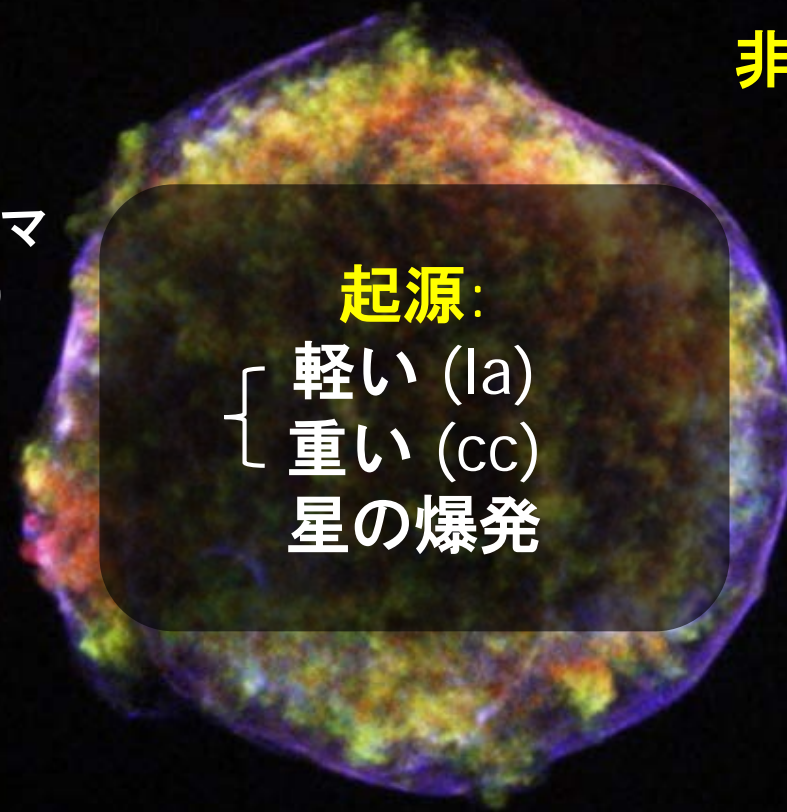
光学的に薄いプラズマ
(kT ~ keV)

time scale

< ~ 10⁴ yrs

電離非平衡

重元素を供給



起源:

{ 軽い (Ia)
 重い (CC)
 星の爆発

非熱的観点から:

衝撃波速度 ~ 10³⁻⁴ km/s
効率よい粒子加速

宇宙線の供給

熱的/運動エネルギーの供給
コンパクト星(NS/BH)の供給

宇宙に多様性を供給する!

0.4. 多くの未解決問題

熱的観点から:

光学的に薄いプラズマ
(kT ~ keV)

time scale

< ~ 10^4 yrs

電離非平衡

起源:

{ 軽い (Ia)
 重い (CC)
 星の爆発

非熱的観点から:

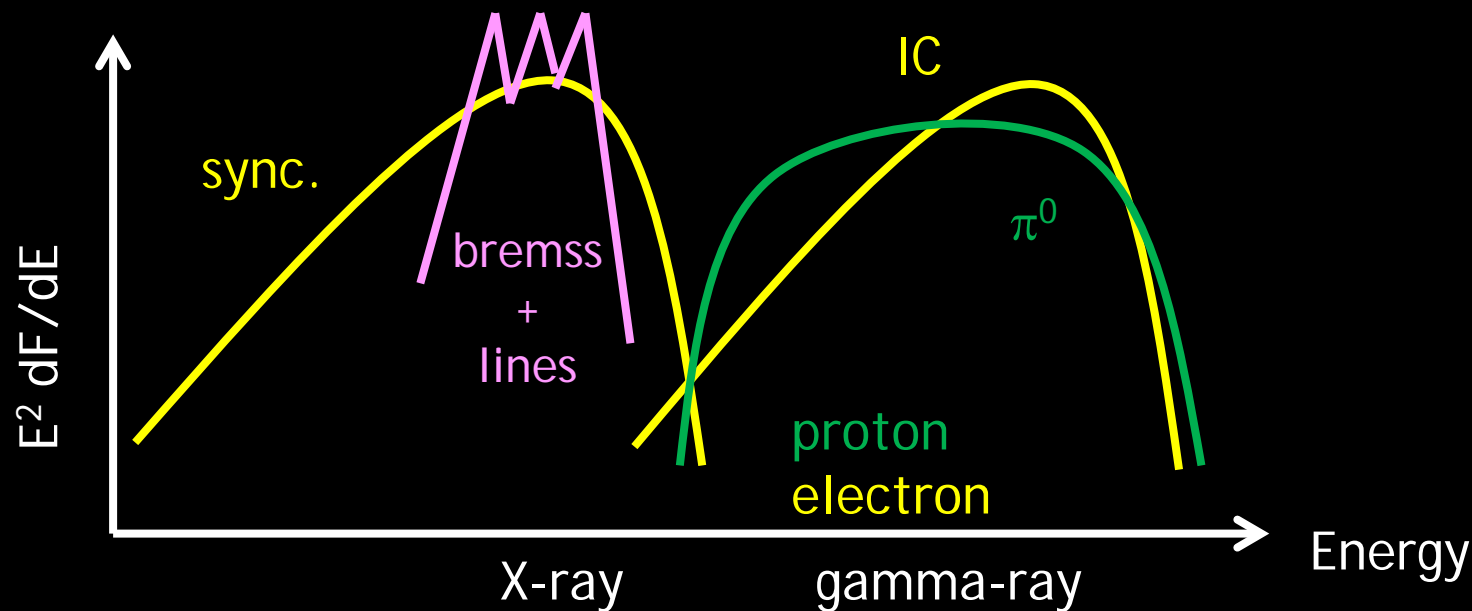
衝撃波速度 ~ 10^{3-4} km/s
効率よい粒子加速

2. 加速された粒子は
どのように
逃亡するか?

1. 各classをSNRから見分けられるか?
各class内の多様性は?

最近のX線観測に関する話題を提供します。

0.5. なぜX線で観測するか?

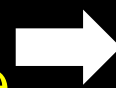


X-ray:

synchrotron from e
熱的制動放射+輝線

gamma-ray:

逆コンプトン from e
emission from pi-on



加速電子の情報

環境情報

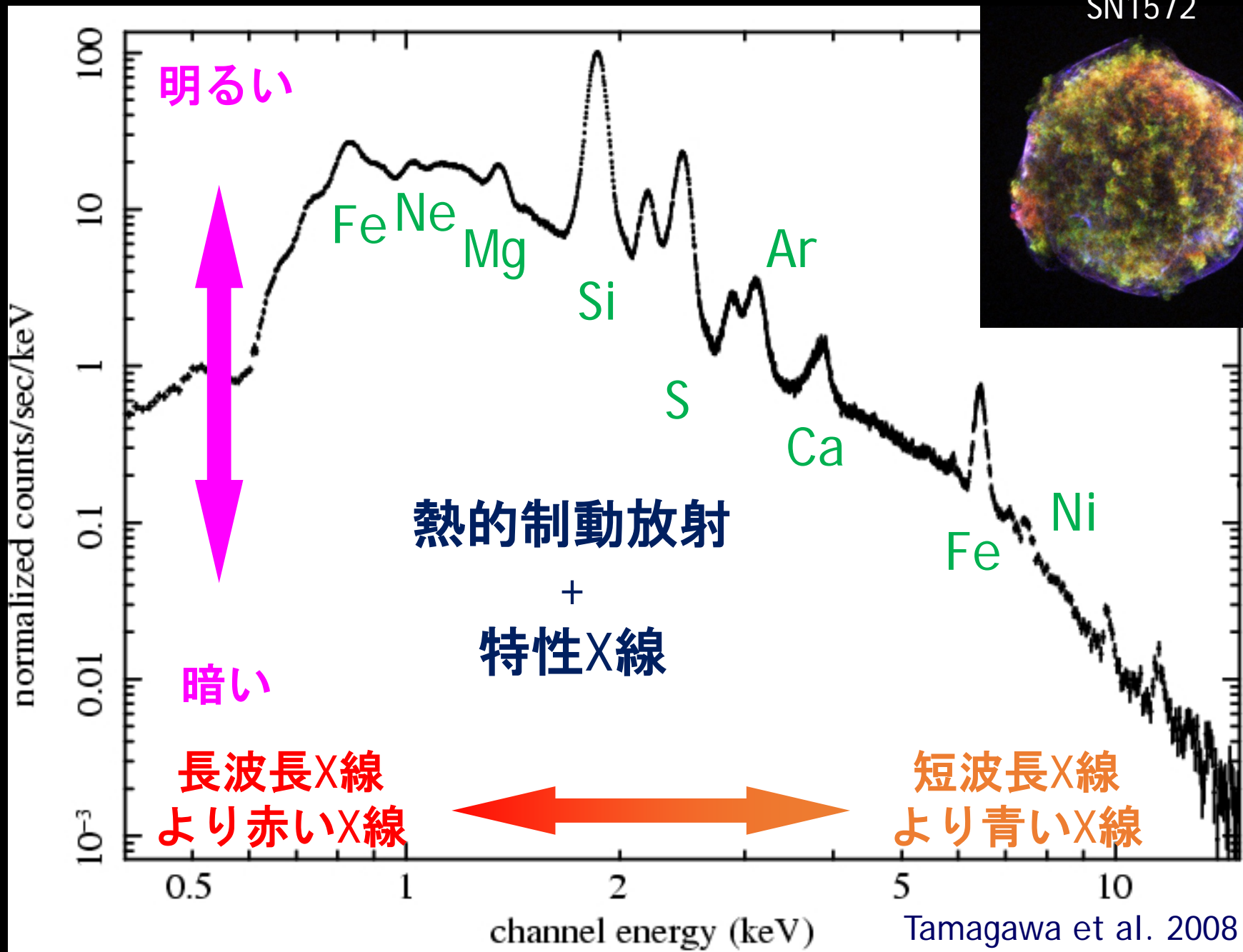
密度、温度、time scale ...

加速粒子の情報

X線は熱的放射・非熱的放射両方を捉えることが可能。

ejecta, heated ISM, 加速粒子の情報を同時に得ることができる。

「すざく」衛星によるティコの新星のスペクトル



1. 超新星爆発の多様性

1.1. 超新星爆発のtype

Type Ia

白色矮星への質量降着

up to M_{ch} (SD)

or WD-WD merger (DD)

Core-collapsed (CC)

重い星の最期 ($> \sim 10 M_{\odot}$)

多くの鉄族元素: Fe, Ni, Cr, Mn

等方的爆発?

多くの軽い重元素

O, Ne, Mg, Si, S, ...

“Standard candle”

Neutron stars, black holes

未解決問題:

X線観測でSNRのprogenitor (Ia/cc)を見分けられるか?

型以上の多様性を見分けられるか?

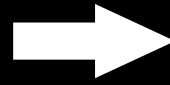
SD/DD?

progenitor mass of CCs?

1.2. X線morphologyから探る超新星残骸のtype (Lopez+11)

Ia: 等方的爆発?

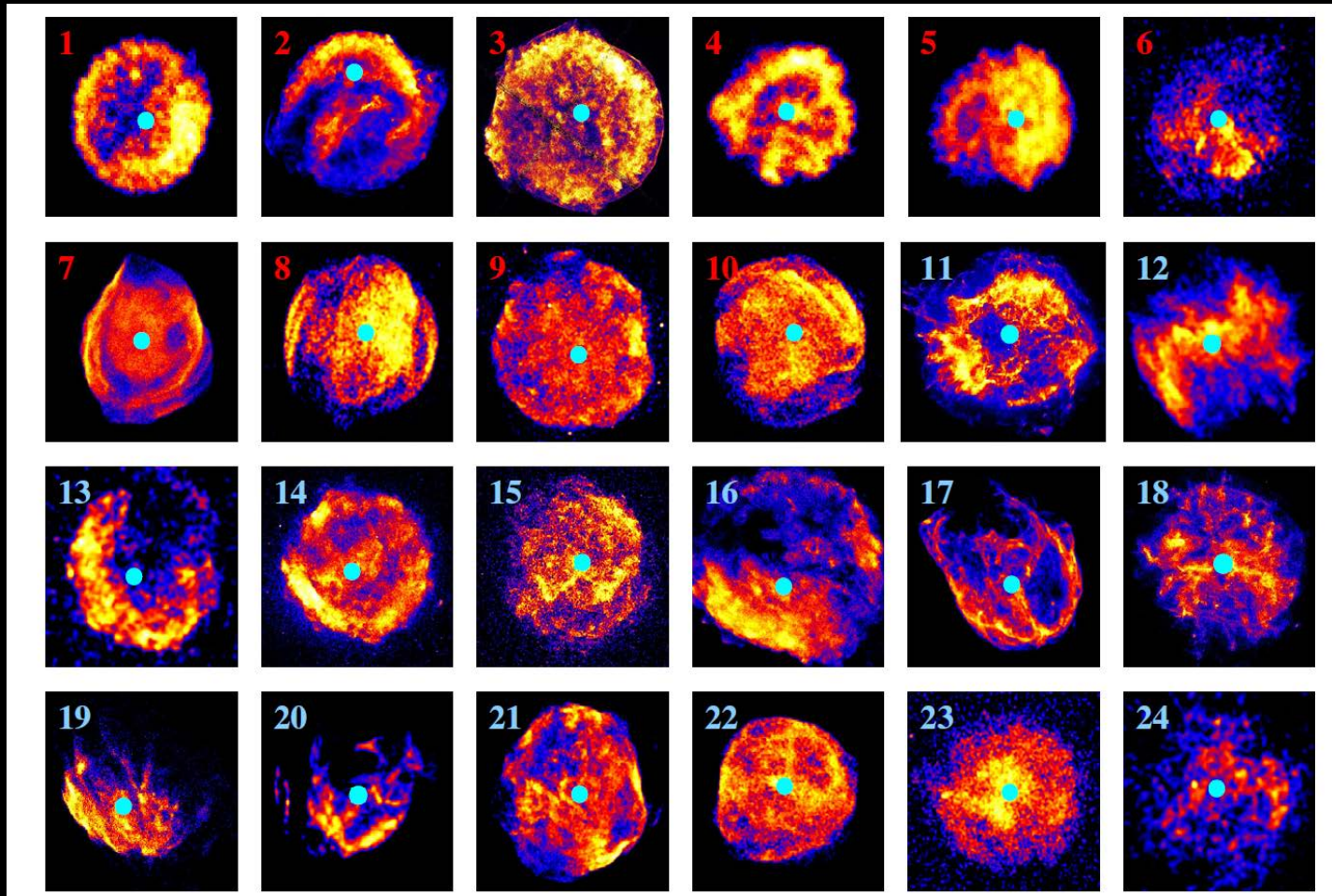
cc: 非等方的爆発?



より球形のSNR?

複雑な形状のSNR?

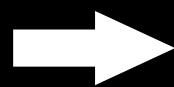
Lopez+11: SNR Chandra画像のwavelet analysis



1.2. X線morphologyから探る超新星残骸のtype (Lopez+11)

la: 等方的爆発?

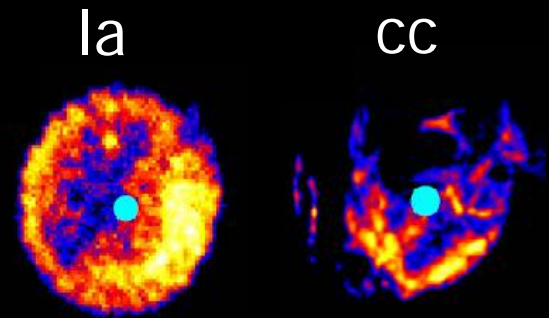
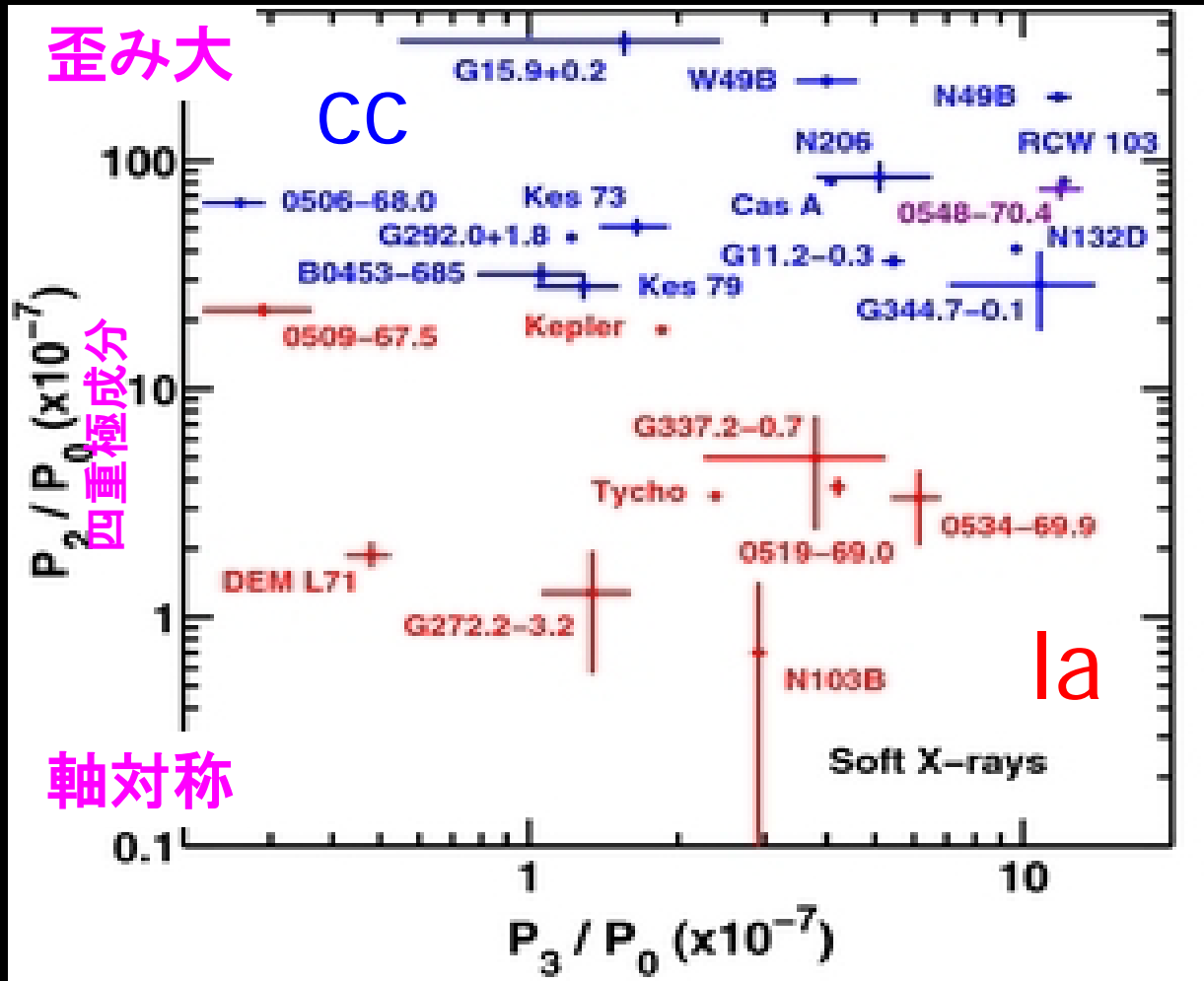
cc: 非等方的爆発?



より球形のSNR?

複雑な形状のSNR?

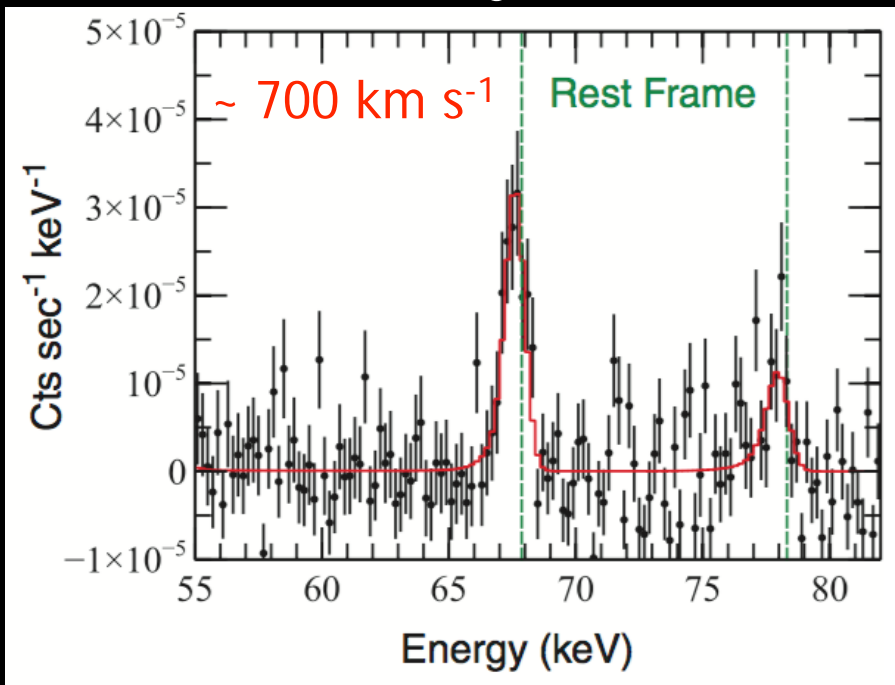
Lopez+11: Chandra画像のwavelet analysis



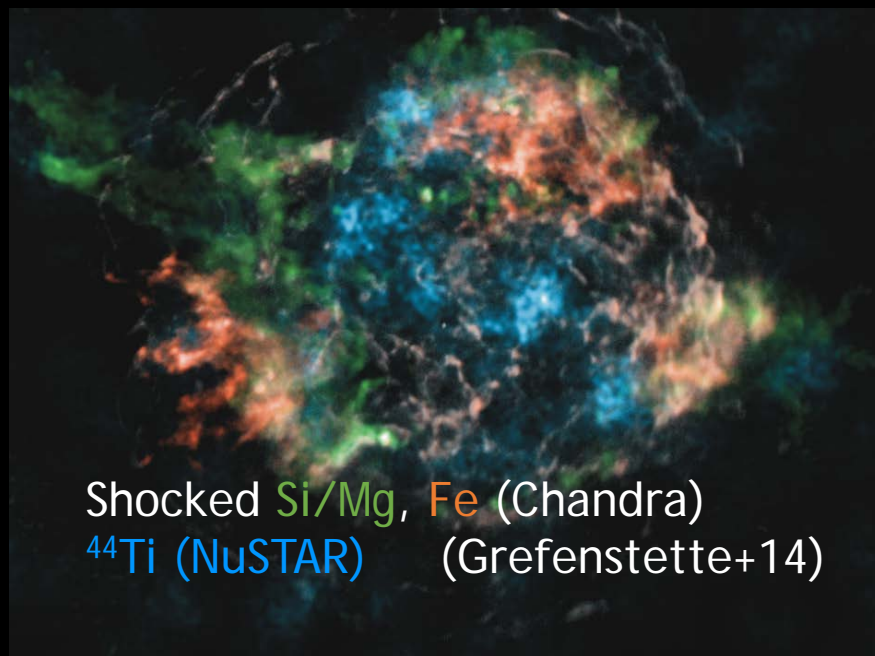
CC SNRs は
本当に歪んでいる

NuSTAR: ^{44}Ti 核ガンマ線で探るunheated ejecta分布

SN 1987A (~30 yrs)



Cas A (~330 yrs)



Shocked Si/Mg, Fe (Chandra)
 ^{44}Ti (NuSTAR) (Grefenstette+14)

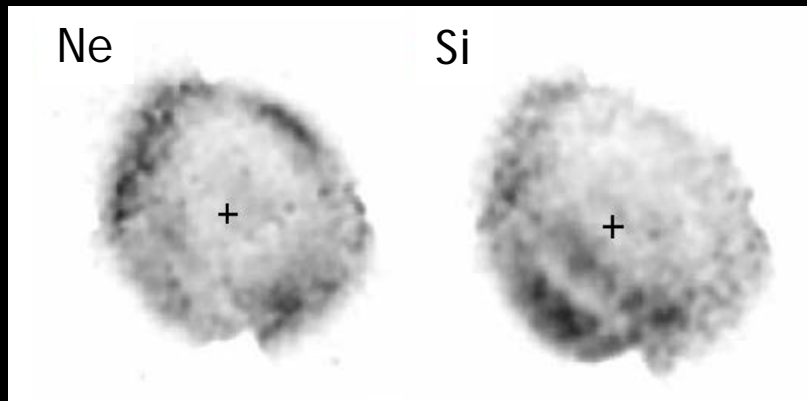
^{44}Ti 赤方偏移成分のみ
-> ejectaの非等方分布

非等方的分布
等方的でも軸対称でもない
複雑な膨張構造

CC SNRs show highly asymmetric expansion

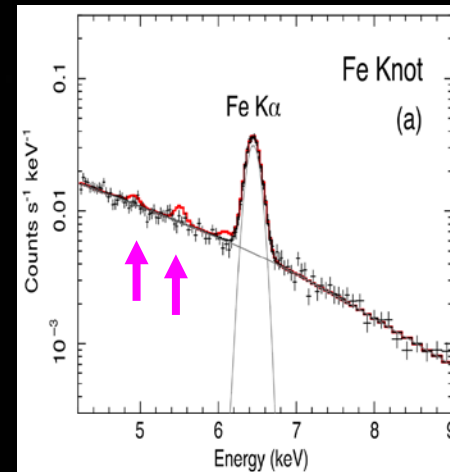
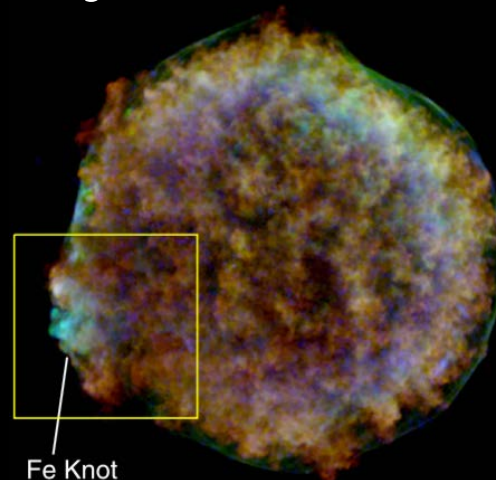
Iaは等方的膨張を示すのか？

SN1006 (Uchida+13)



南東部で多くのSi, S, Fe

Tycho (Yamaguchi+17)



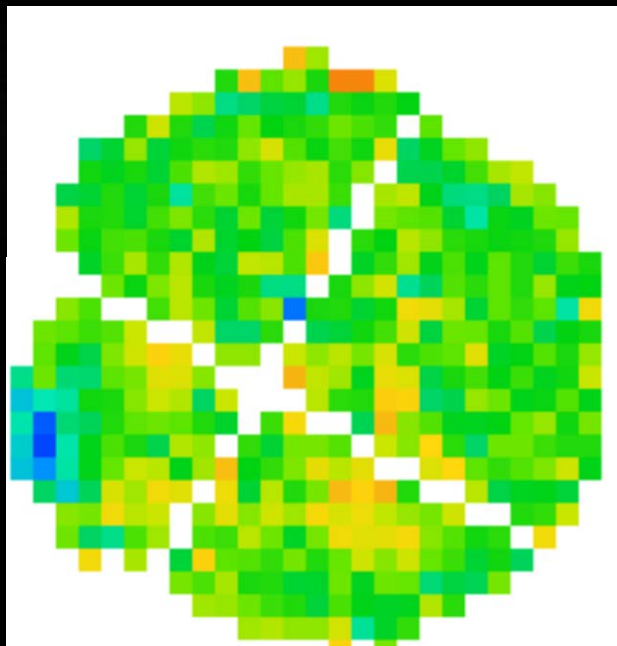
純粋な鉄のejecta (no Cr, Mn)

「教科書」Iaでも一部は非等方
Ia SNがどのくらい等方的かは、まだ不明

均一とされるIa型超新星残骸の多様性??

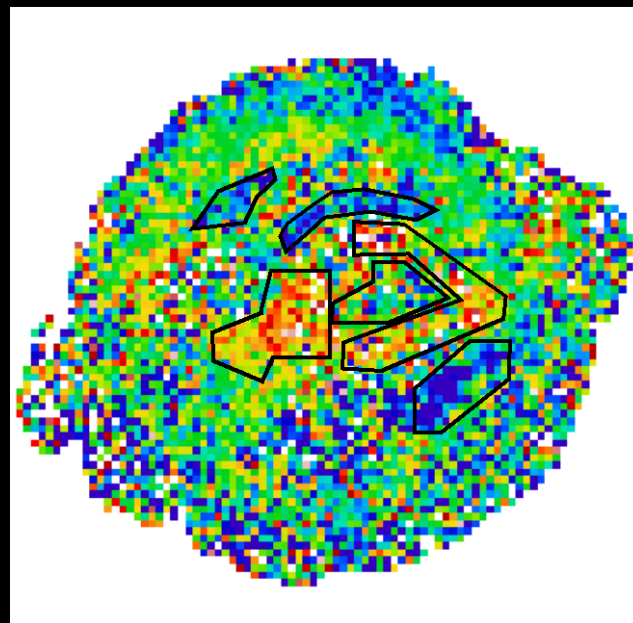
鉄輝線ドップラーマップ (Kasuga+18)

Tychoの新星(SN1572)



ほとんど等方的膨張

Keplerの新星(SN1604)



赤方偏移・青方偏移
-> 非等方に膨張

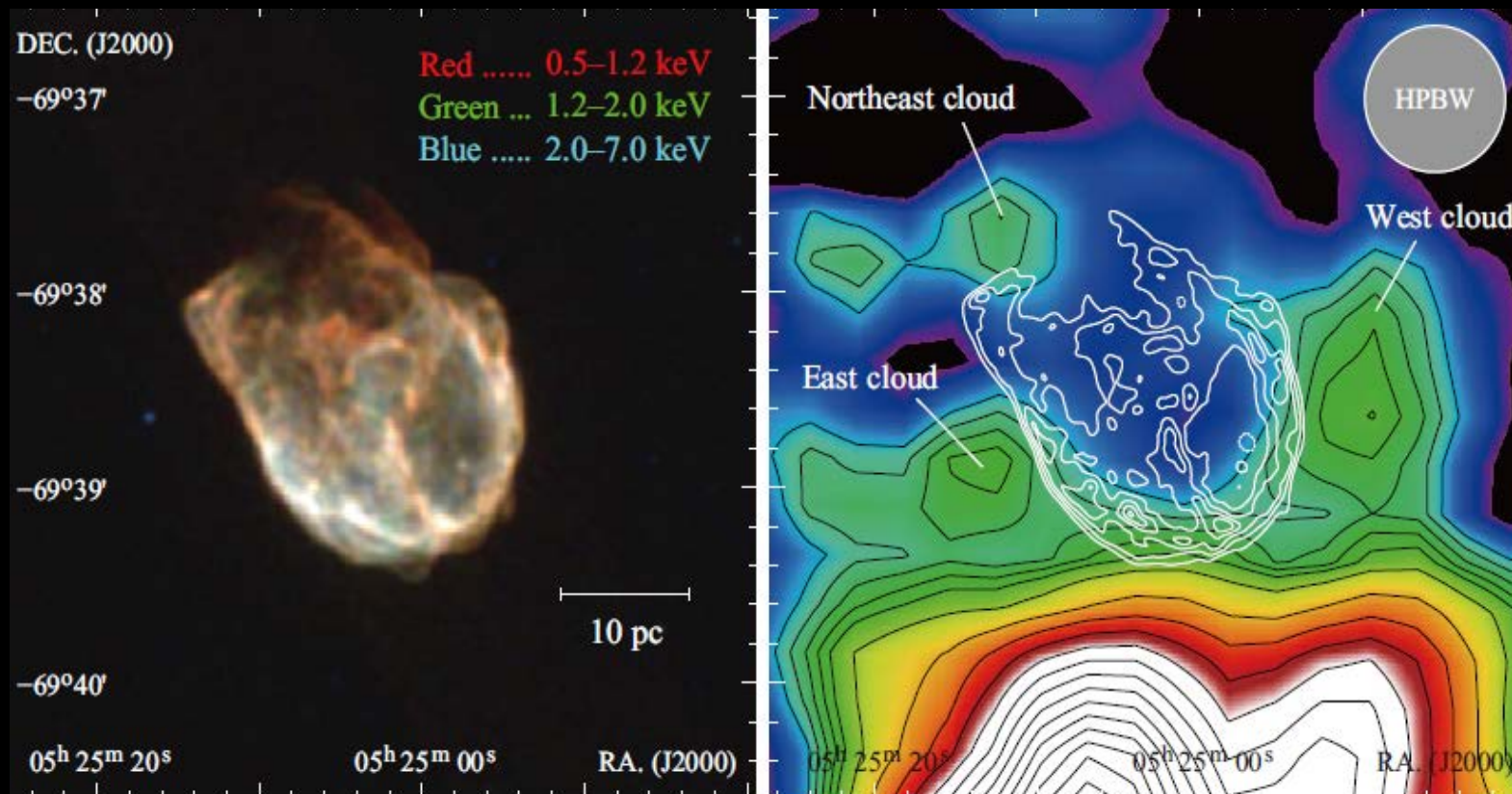
多様性??

注意点：膨張の非等方性 \neq 爆発の非等方性

(Sano+15)

X-rays

$^{12}\text{CO}(J=1-0)$



N132D: LMCに存在するSNR 南部のみ分子雲と衝突
非等方膨張??

全貌理解には、ここにいる皆さんの情報が必要

1.3. Origin of Ia ?

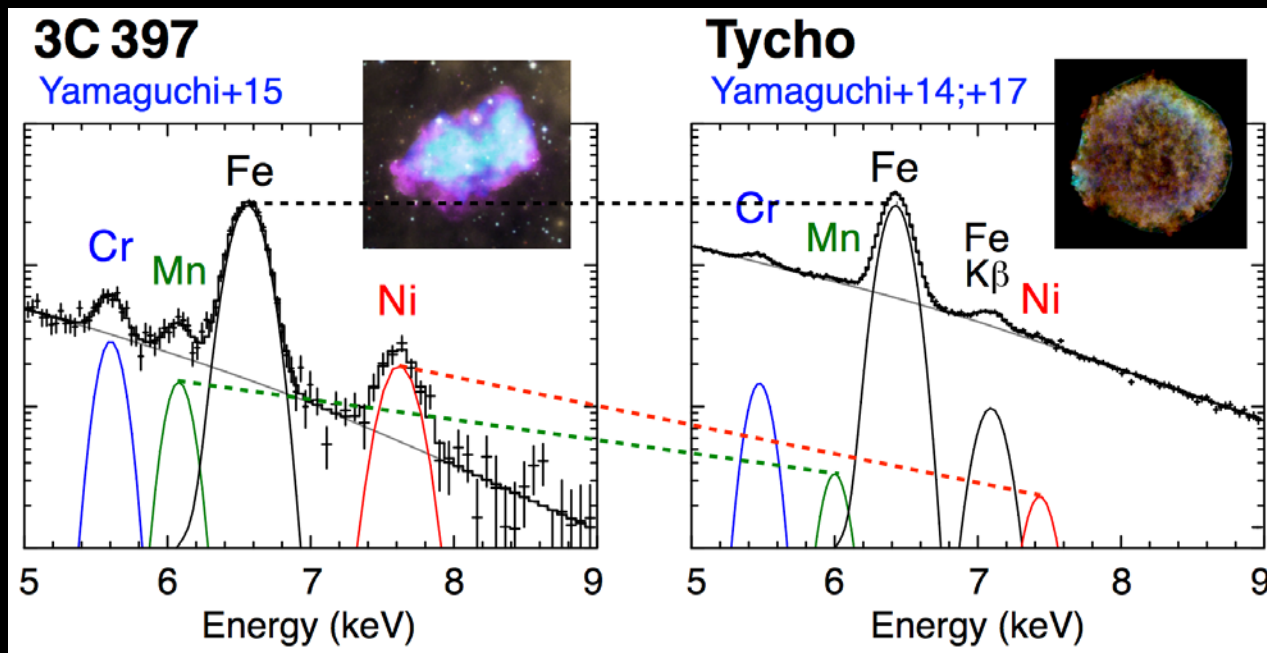


~ M_{ch} , 高密度コア ($\rho \geq 2e8 \text{ g/cm}^3$)

sub M_{ch} , 低密度コア

高密度コア = より多くのelectron capture

-> より多くのNi, Mnができるはず



3C397 needs M_{ch}

強いSD/DD判定法

現在適用できるのは
数天体

1.4. Variety of CC SNRs

Cas A

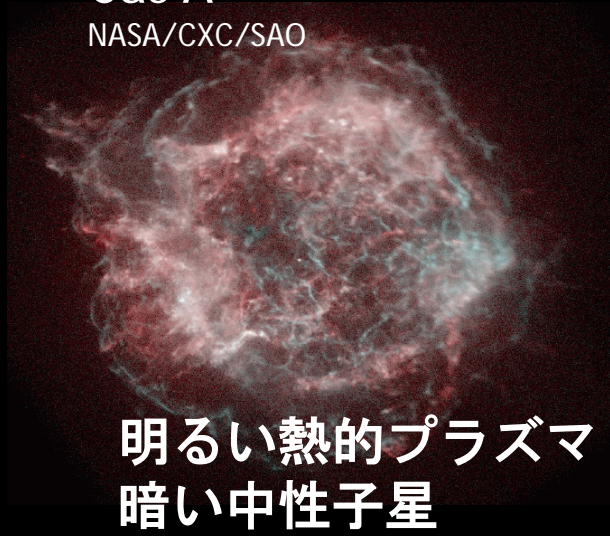
NASA/CXC/SAO

G11.2-0.3

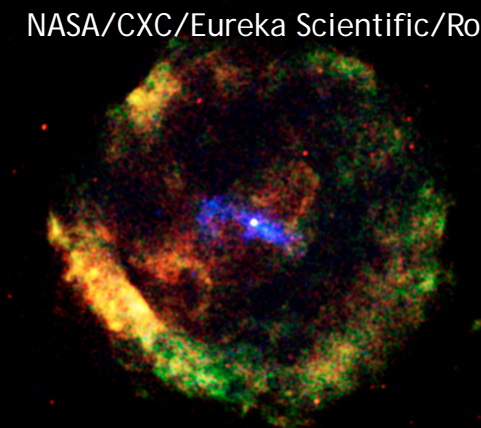
NASA/CXC/Eureka Scientific/Roberts+

Crab nebula

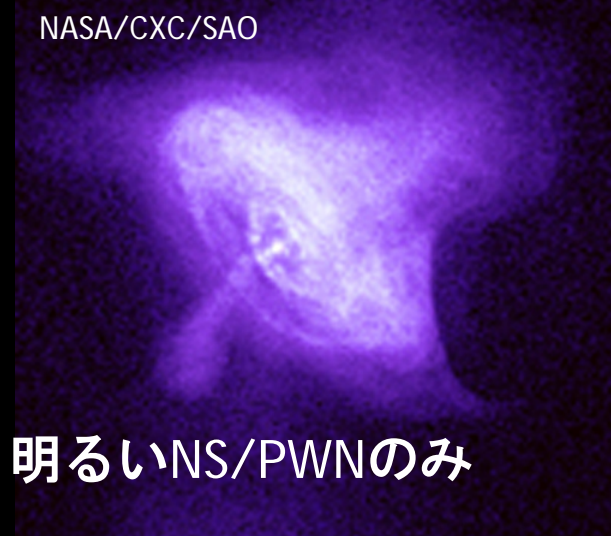
NASA/CXC/SAO



明るい熱的プラズマ
暗い中性子星



熱的プラズマ+NS

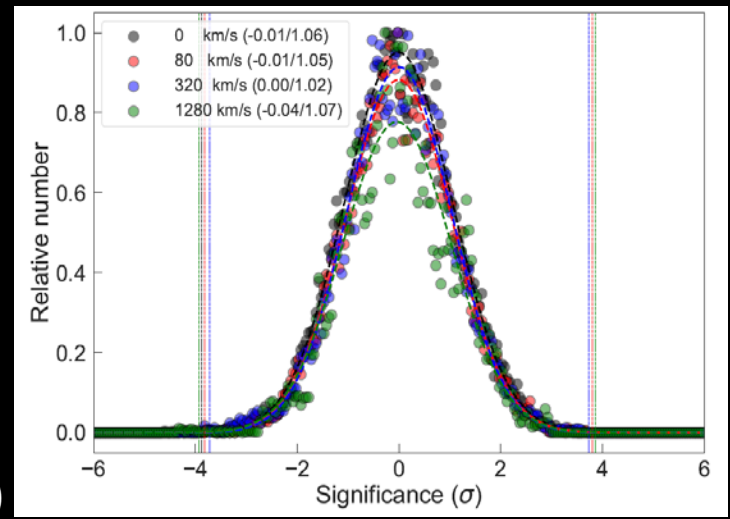


明るいNS/PWNのみ

何が違いを作る？ 第一歩はCrabの熱的プラズマ探査

「ひとみ」による
Crab thermal line探査

-> blind search で
有意な輝線/吸収線は
見つからず (Hitomi collaboration 18)

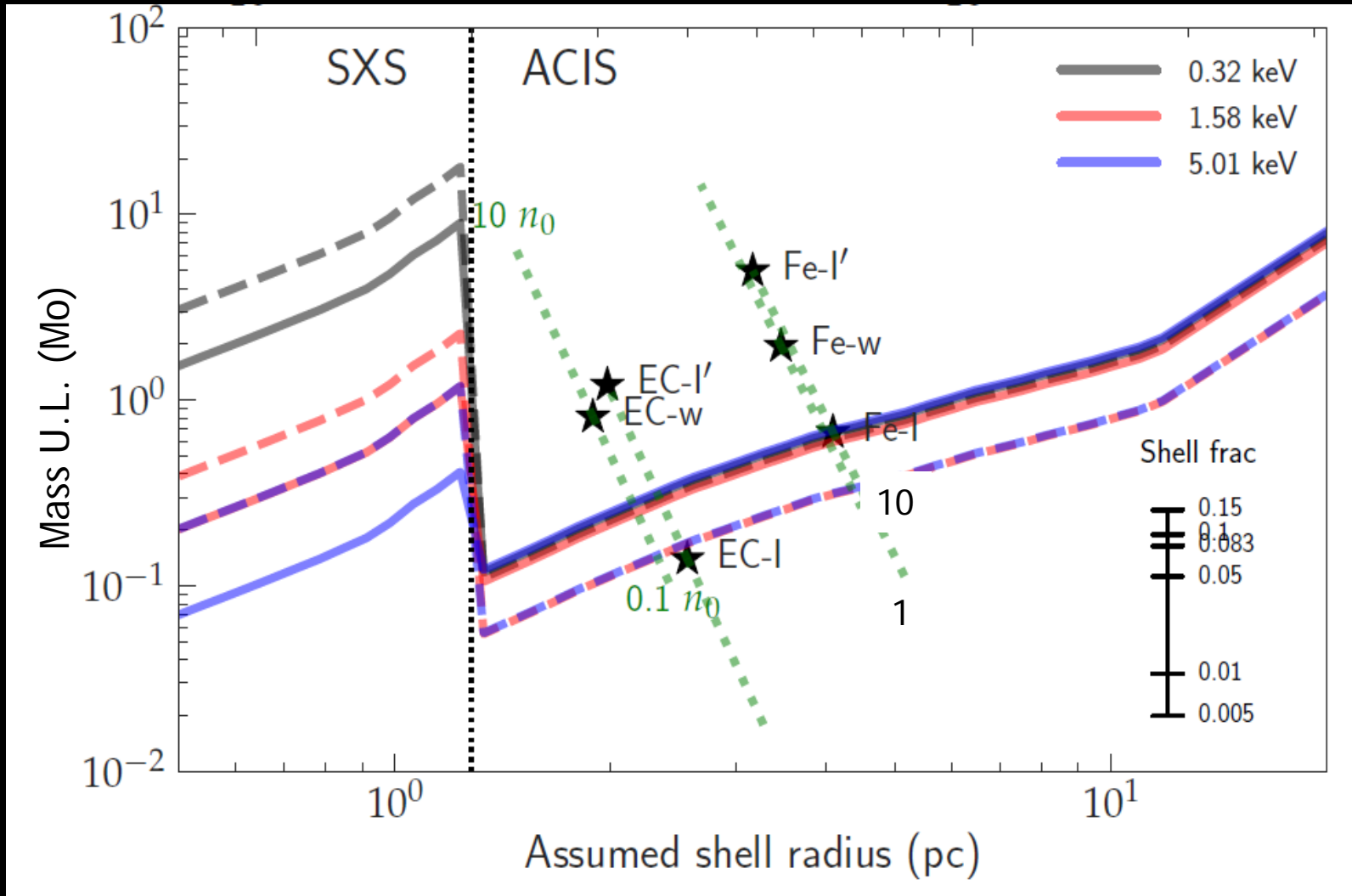


Crab Thermal line search with Calorimeter onboard Hitomi

プラズマ質量 < 1Mo

-> electron capture SN ?

(Hitomi collaboration 18)



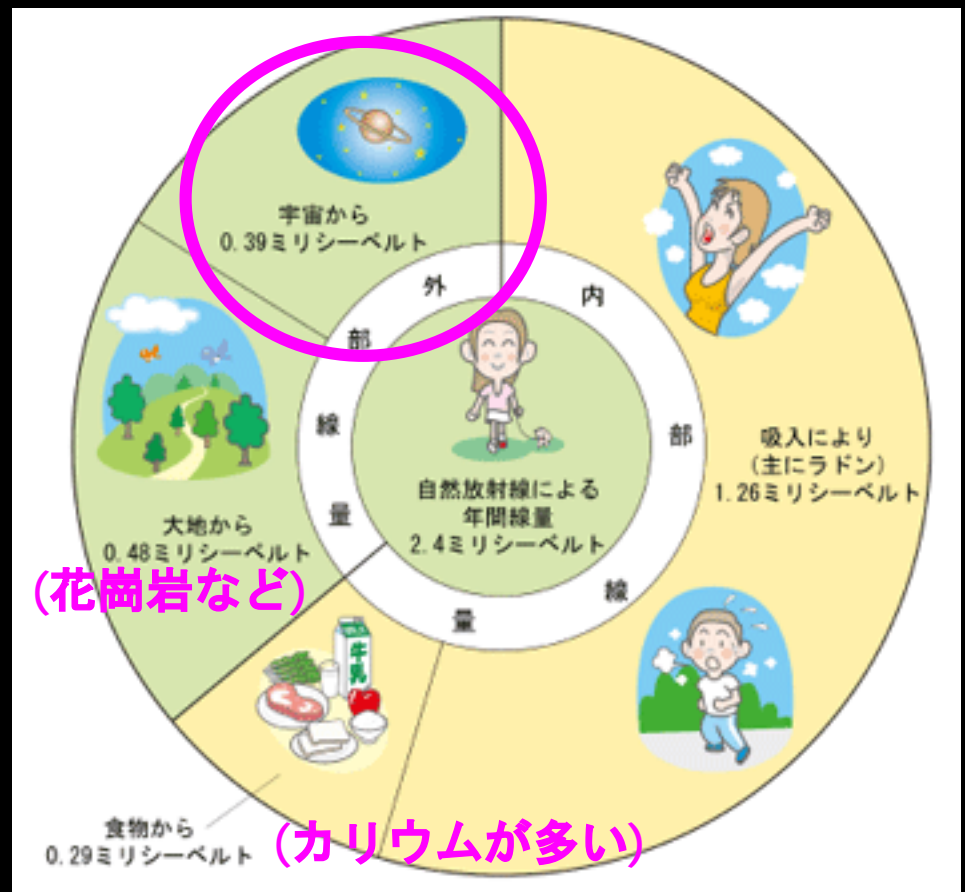
3. 非熱的現象(宇宙線加速)に関する話題

宇宙線とは?

宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子
速度はほとんど光速

今も1秒に1個程度あなたの指先を通過

自然放射線の約2割は
宇宙線由来
例: 飛行機搭乗時の被曝



宇宙から飛来する放射線：偶然から生まれた大発見



Victor Franz Hess 博士
(1883-1964)

1912年 宇宙線を発見
宇宙からも放射線が降ってきている!!
「宇宙線」

1936年 ノーベル物理学賞受賞



5~9 km

放射線は地面から来ているはず

だったら、エッフェル塔の上では放射能がすくないはず!



よく分からんから気球に乗り込むぞ!

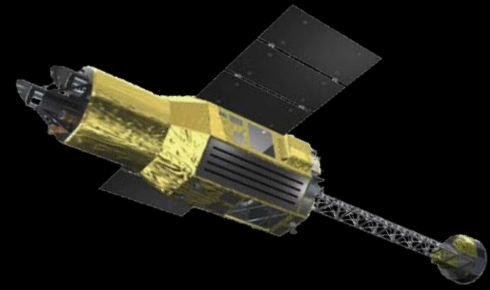
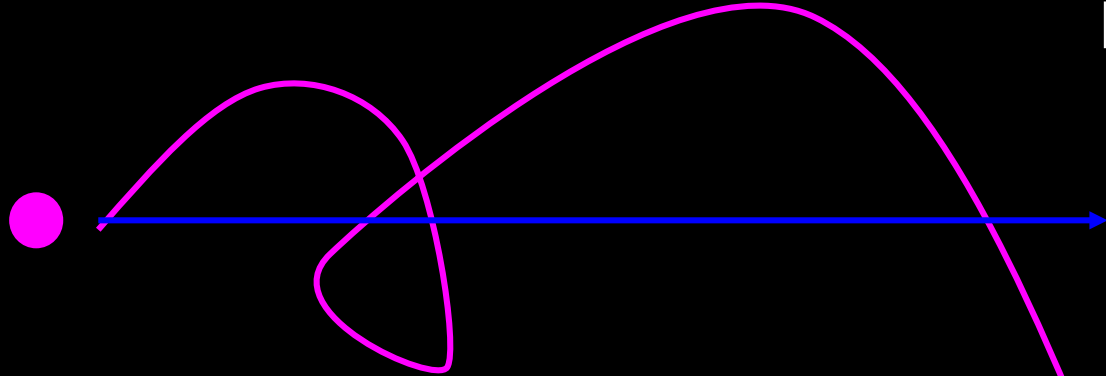
宇宙から来てるやん!

100年経った現在も、宇宙線加速源は謎のまま

宇宙線は星間磁場中でジャイロ運動をして方向が変わる!
宇宙線の到来方向からは加速源は分からない。

-> 宇宙線加速源が100年の謎だった理由!

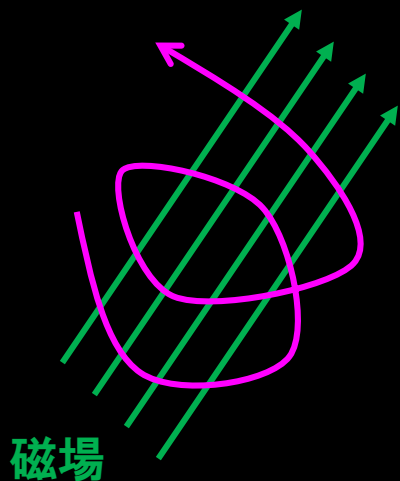
「宇宙物理最大の謎」



一方...
宇宙線が光を放射していれば
光はまっすぐ進むので
加速源が見える!



宇宙線は光を出せるのか?



荷電粒子(電子や陽子)は、
磁場に巻き付くように
ぐるぐる回転運動する (ローレンツ力)

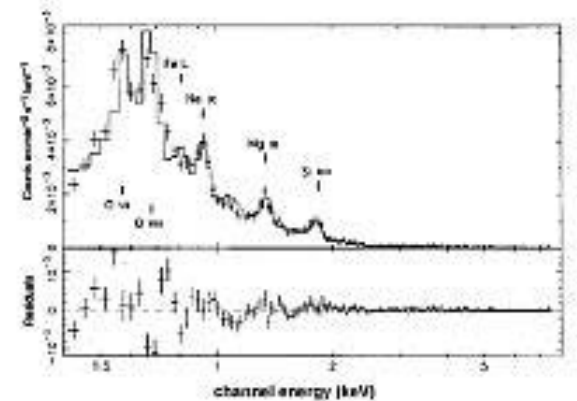
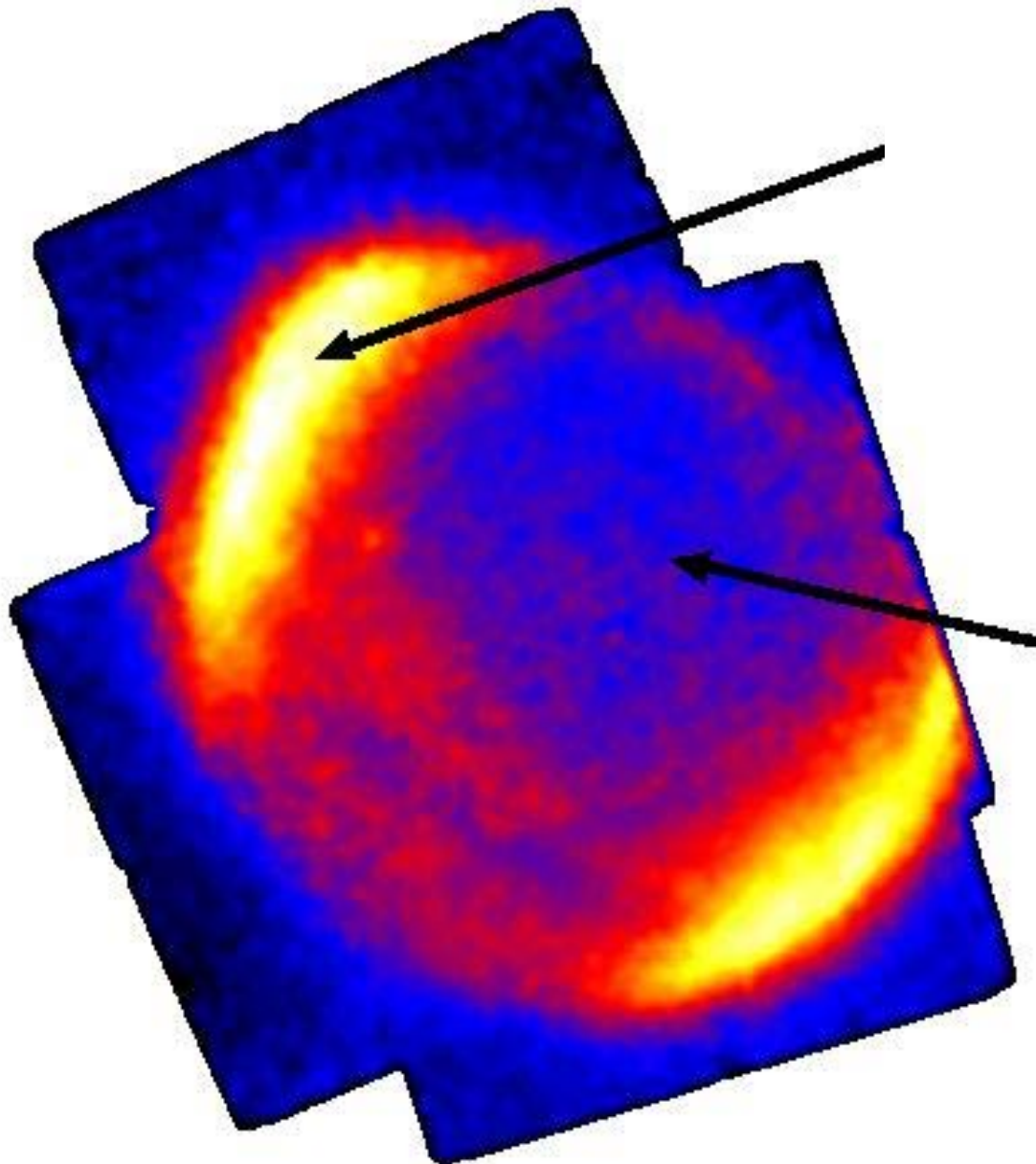
この時、特に電子は
「シンクロトロン放射」という光を放射
-> これを見つければよい!

地上でも大型施設で作られ
X線元素分析などに
用いられている光



日本最大のシンクロトロン放射光施設 Spring 8

SN1006のX線スペクトル



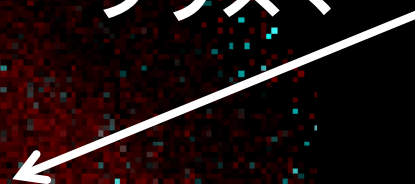
酸素やMg, Siからの
特性X線
-> 普通の超新星残骸と
同じ

1995年、日本のX線天文衛星「あすか」は、
この超新星残骸の衝撃波から
シンクロトロンX線を発見しました。

電子からの
シンクロトロン放射



200万度に熱せられた
プラズマ



宇宙線は、確かに超新星残骸の衝撃波で生まれていた

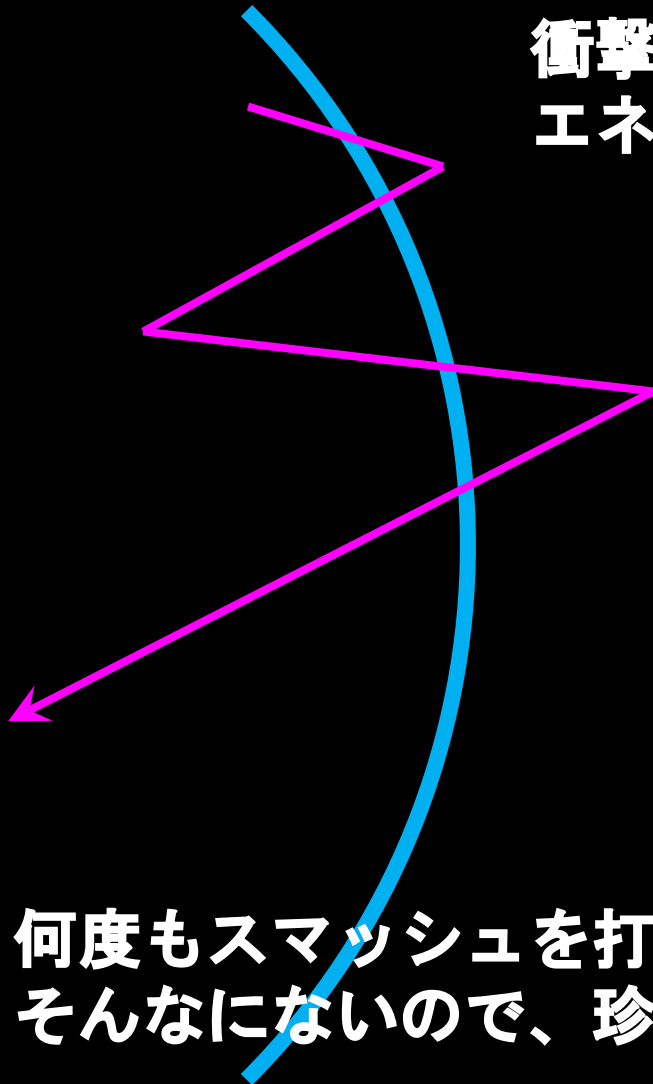
(Koyama et al. 1995)

どうやって宇宙線は加速されているのか？

超新星残骸の衝撃波は、秒速3000km。

中には、衝撃波を行ったり来たりする粒子もあります。

衝撃波に跳ね返されると
エネルギーをもらう！

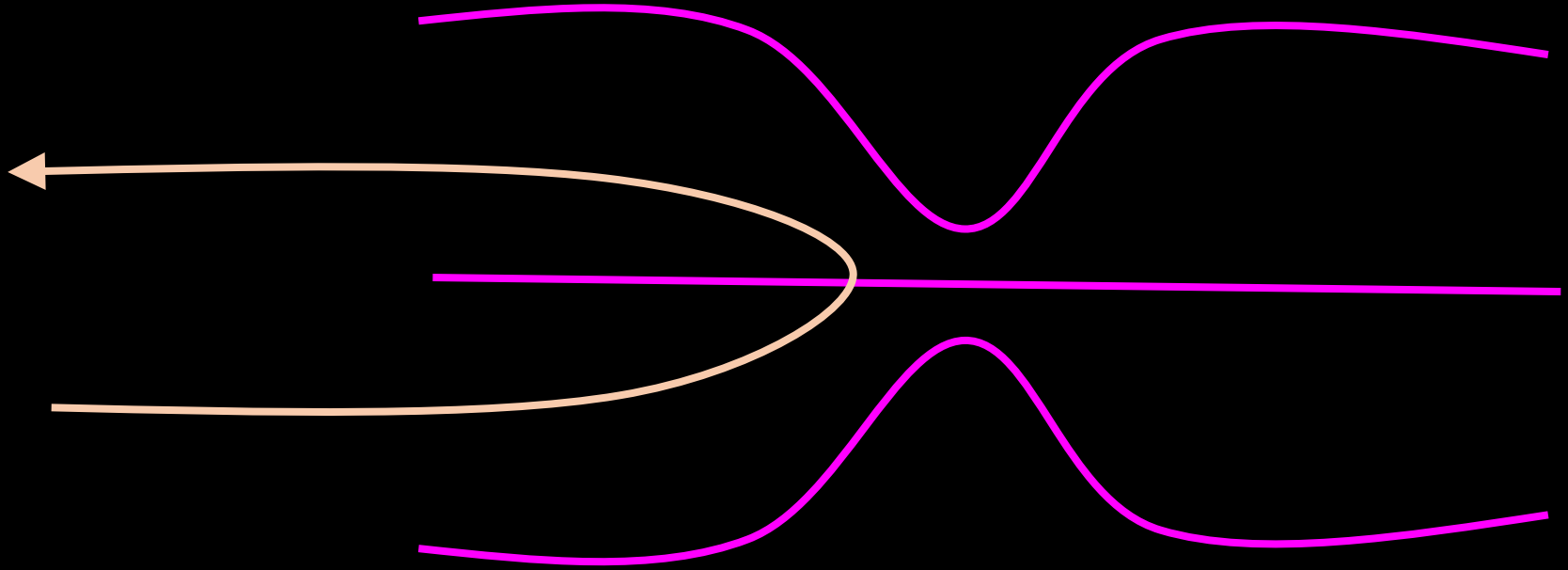


何度もスマッシュを打たれる確率は
そんなにないので、珍しい



スマッシュを打たれた
ピンポン球と同じ。

粒子を跳ね返しているものは??



粒子は磁場が歪んでいるところで、方向が変わる (磁気ミラー)

磁場が強いほど、揺らぎが大きいほど、加速されやすい

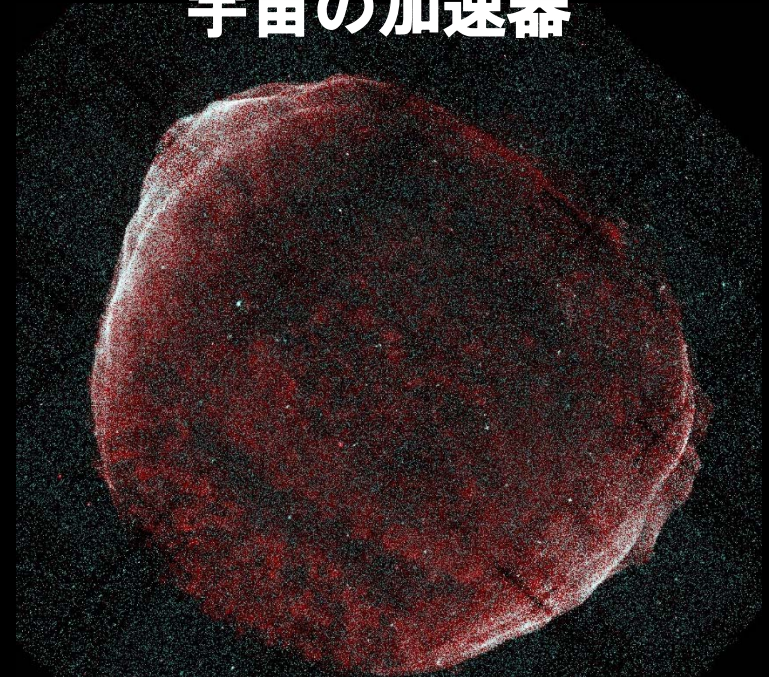
巨大な宇宙の加速器

人類最大の加速器



直径10 km
(山手線と同じくらい)

宇宙の加速器



直径500兆km !!

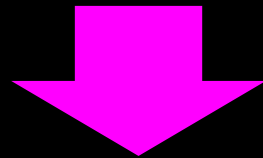
粒子は速度が速くなるほど、加速器から逃げやすくなる
より高エネルギーに加速するためには、

より大きな加速器が必要!

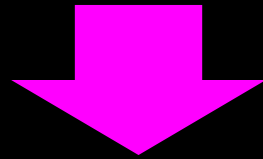
大きな加速器で、1000年以上かけて加速されている

宇宙線がたくさん加速されるということは?

電子や陽子が衝撃波付近で飛び交っている
-> 電流が流れている!!



電流が流れると、そこには磁場が出来る (誘電磁場)



粒子は、さらに加速されやすくなる!

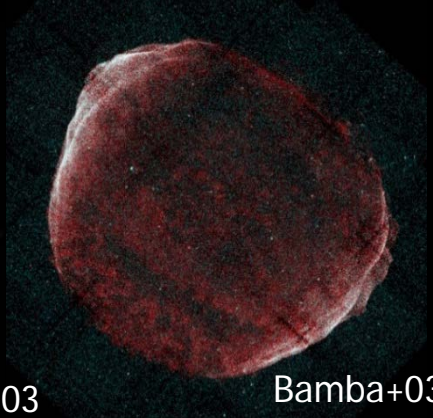
正のフィードバック (非線形的) がかった加速
超新星残骸の衝撃波は、天然の効率のよい加速器

3.1. 超新星残骸衝撃波は銀河宇宙線加速源か?

超新星残骸が若い時



Vink+03

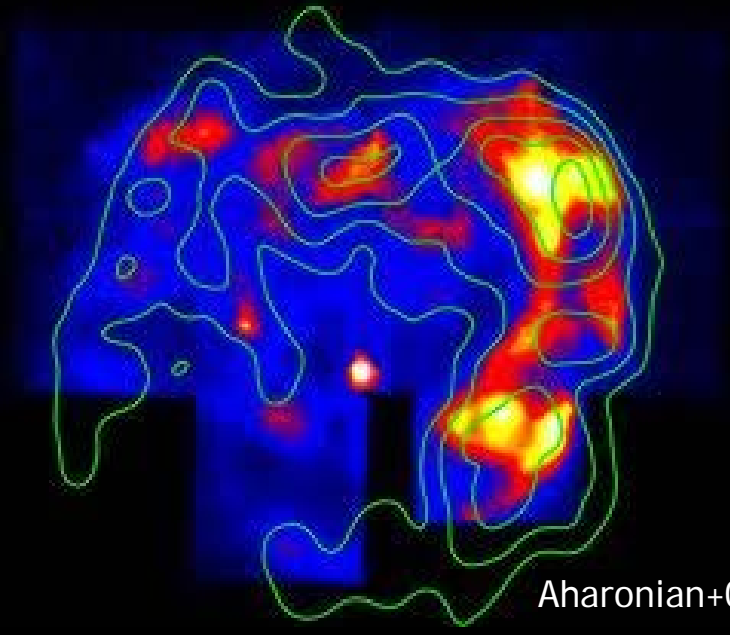


Bamba+03



Uchiyama+07

薄く時間変動する
synch. X-ray filaments
->
増幅乱流磁場

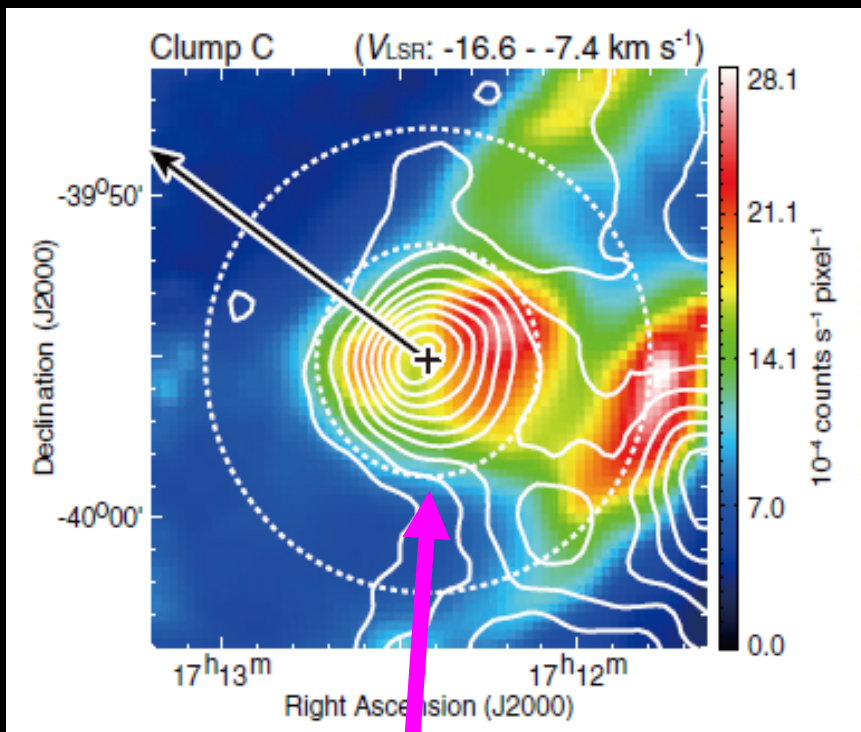


Aharonian+08

GeV - VHE gamma-rays
-> TeV particles

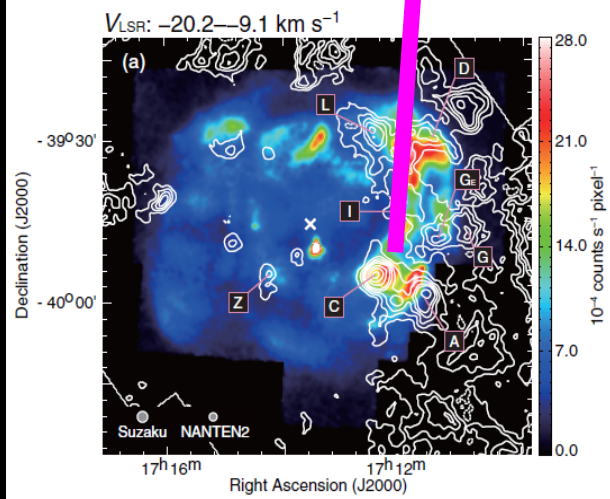
-> 効率の良い粒子加速現場

星間物質と衝撃波の相互作用があるときの粒子加速



RXJ1713-3946 clump C
分子雲clump周辺に
シンクロトロンX線

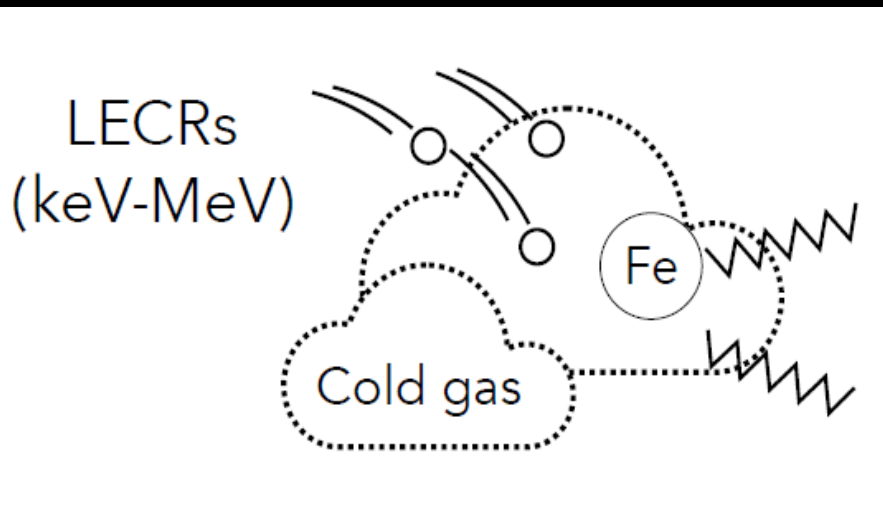
clumpと衝撃波の相互作用で
磁場が増幅され
トラップされている??



どんどん粒子はトラップ
-> 出てこれない??

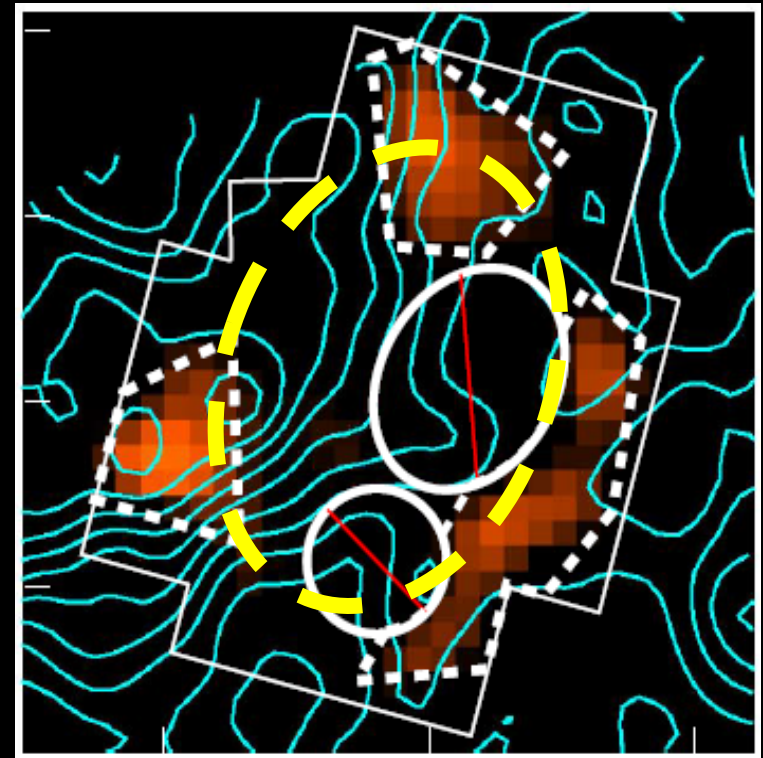
より低エネルギーの宇宙線??

MeV - GeV protons:
エネルギー密度が一番高い
sync.放射などは見えない



W44

(Nobukawa+18)



~10 MeV陽子が分子雲に衝突
-> 中性鉄輝線

超新星残骸周辺分子雲から
中性鉄輝線の発見
-> 今後より深い共同研究が必要

3.2. 超新星残骸が年老いてくると (~2000 yrs old) ...

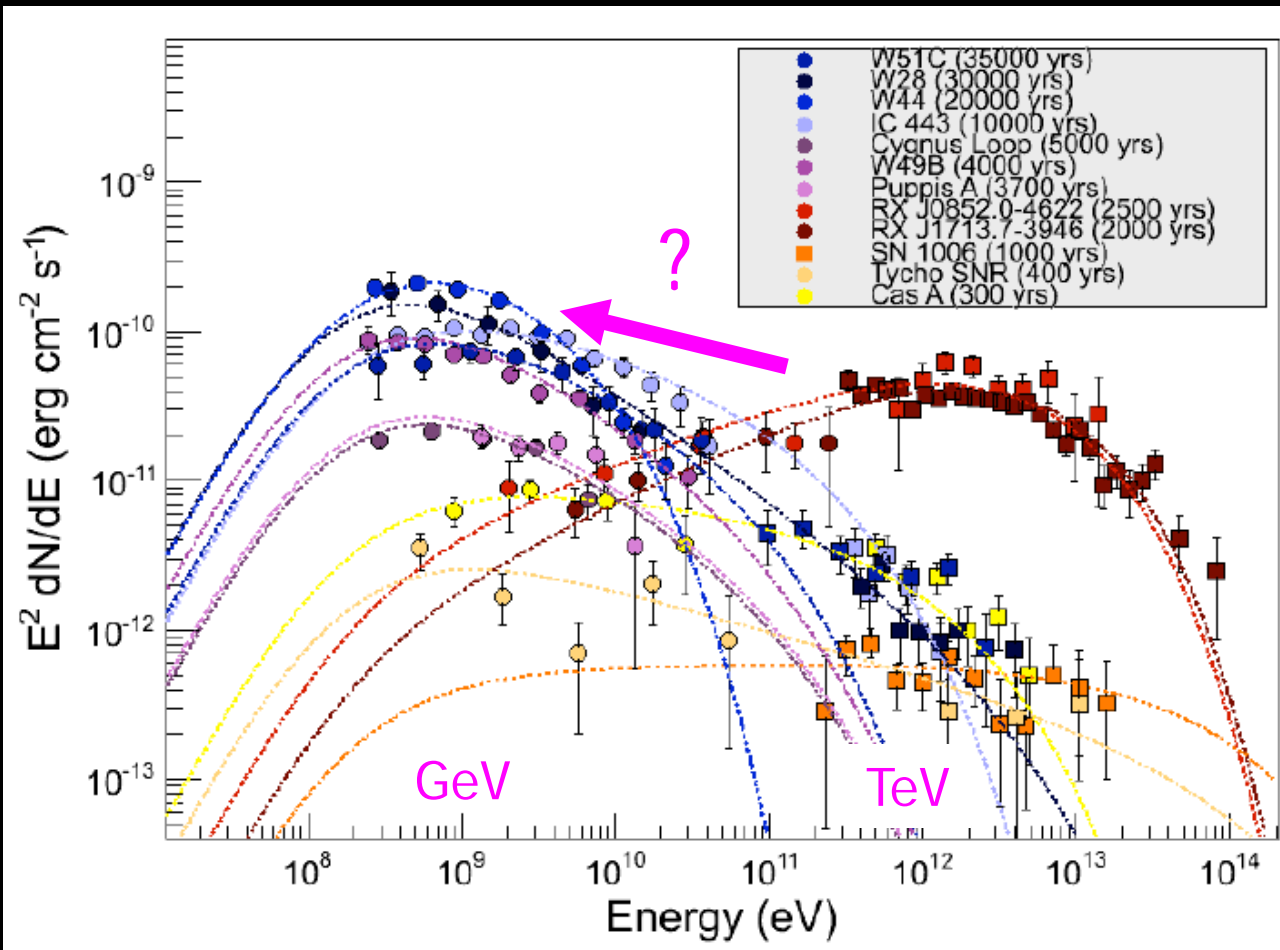
衝撃波速度 < 2000 km/s -> no sync. X-rays

only GeV gamma-rays

with cut-off ~ 10 GeV

(Acero+16)

加速粒子は逃亡して
宇宙線になれるのか?



(Funk11)

宇宙線逃亡の観測的証拠?

VHE gamma-ray image of RX J1713-3946 (H.E.S.S.+16)

exposure: 163 hour !



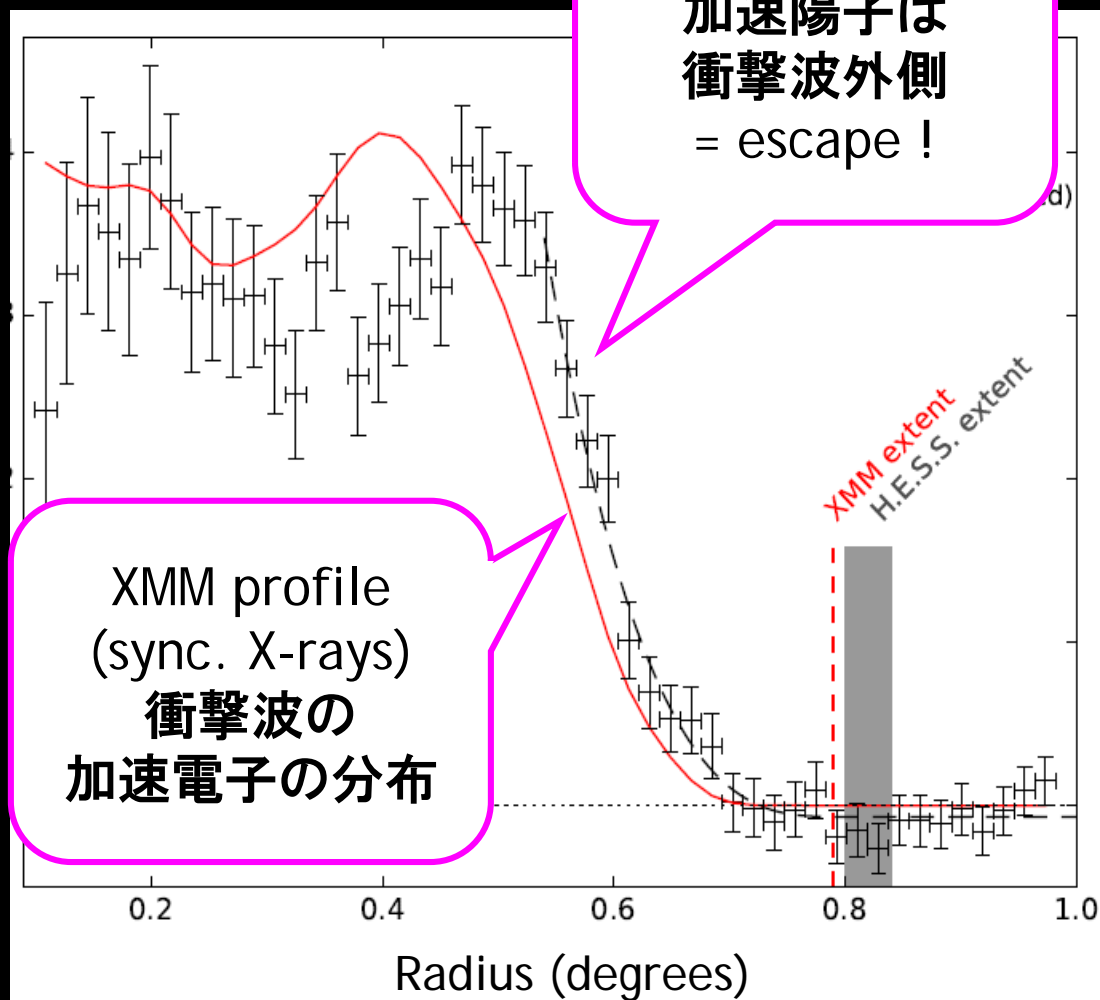
CTA will resolve more.

(Nakamori+17)

分子雲と相互作用のある場所は?

ALMA/Chandra/CTAの

共同研究が必須の時代に

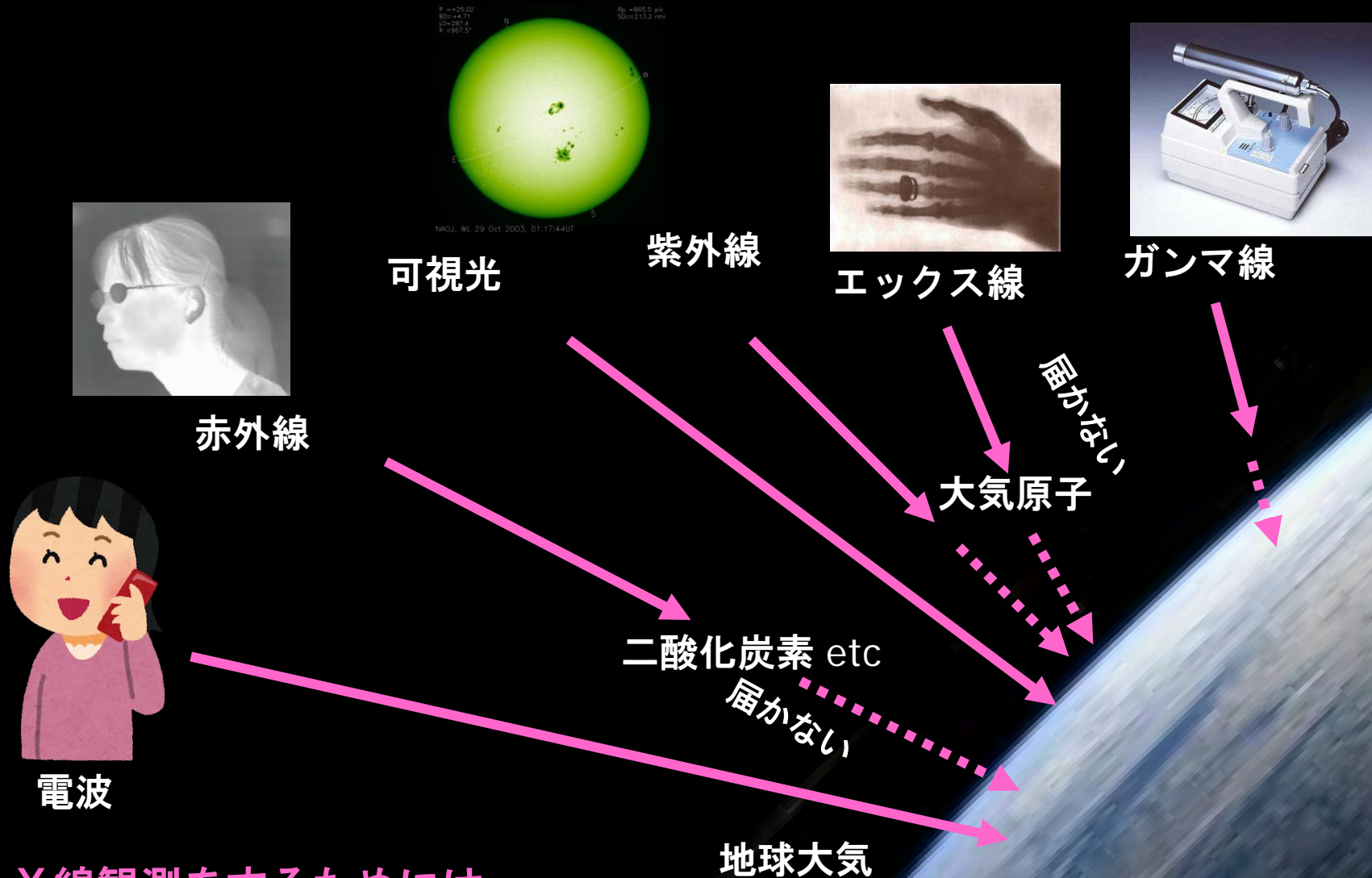


HESS profile
加速陽子は
衝撃波外側
= escape !

XMM profile
(sync. X-rays)
衝撃波の
加速電子の分布

4. X線天文学の歴史と将来計画

4.1. X線で宇宙を観るには...



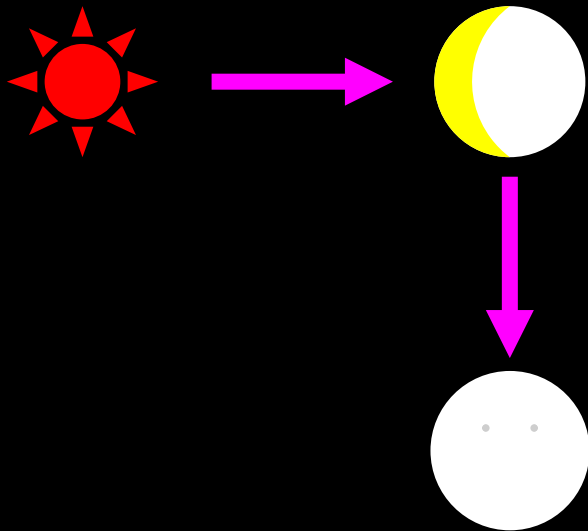
X線観測をするためには
宇宙に出るしかない

4.2. Bruno Rossiの作戦

当時太陽からのX線は検出されていたが、
隣の星が太陽と同じX線光度だと検出は不可能だった

「自然は人間よりはるかに想像力に富んでいる」

-> 月からのX線を調べるロケット実験計画を
立ち上げる



(c) MIT

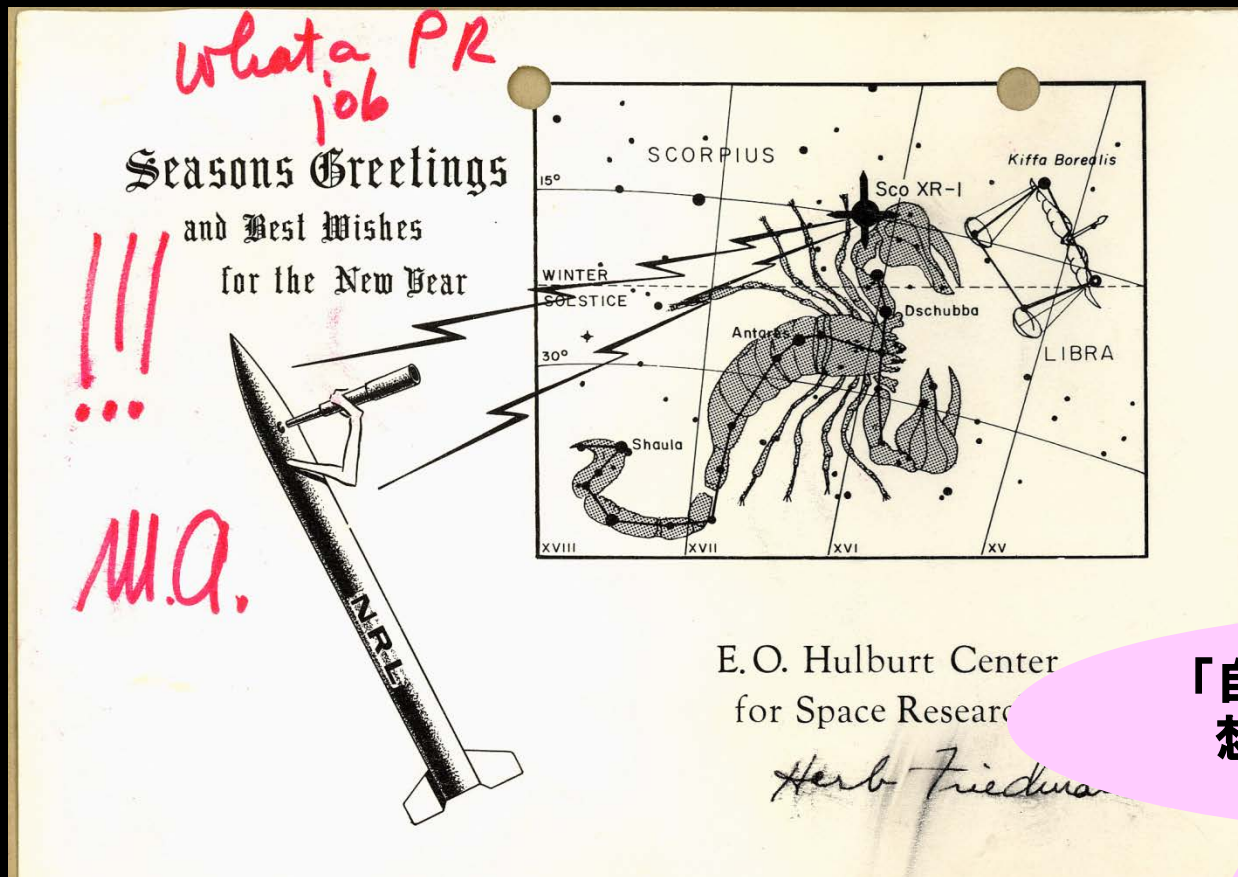
Photograph courtesy of the MIT Museum

太陽からのX線の反射を見ることで、月に含まれる元素を調べる
(X線元素分析と同じ原理)

アポロ計画(1961-1972)のさなかであり、採択された

X線天体の発見

1962年、Rossi, Giacconiらによるロケット実験



「自然は人間よりはるかに想像力に富んでいる」
(Rossi)

月からのX線を探そうとして、
偶然、さそり座の方向に強力なX線源を発見

この発見を報じる論文

Physical Review Letters に1962年12月掲載
(重力波発見論文と同じ雑誌。物理学で最も権威がある。)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1962年12月1日

VOLUME 9

DECEMBER 1, 1962

NUMBER 11

「太陽系外天体からのX線の証拠」

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)

Aerobee rocket

Data from an Aerobee rocket carrying a payload consisting of three large area Geiger counters have revealed a considerable flux of radiation in the night sky that has been identified as consisting of soft x rays.

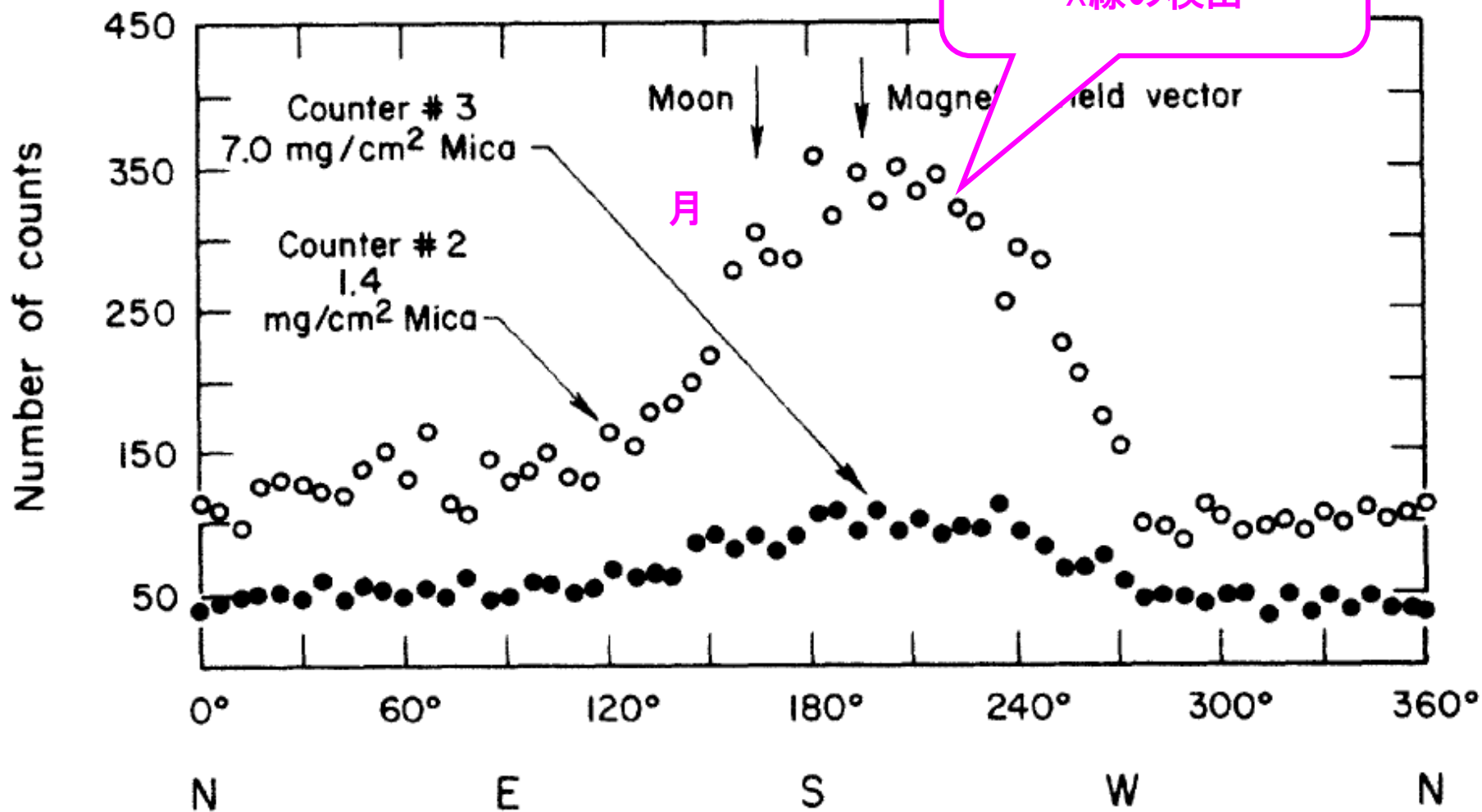
The entrance aperture of each Geiger counter

to reduce the anticoincidence cosmic-ray background. The experiment was intended to study fluorescence x rays produced on the lunar surface by x rays from the sun and to explore the night sky for other possible sources. On the basis of the known flux of soft

ガイガーカウンター

ロケットは1962年6月18日に350秒の飛行。最大高度225 km。
ロケットは1秒間に2回転することで軸安定に。

月とずれた位置から
X線の検出



2002年度ノーベル物理学賞

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

a. エックス線天文学

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

(天体物理学の先駆的な貢献をし、彼が主導して宇宙X線源を発見)



Riccardo Giacconi

b. ニュートリノ天文学

... for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos (先駆的な貢献をする天体物理学の立ち上げ、特に宇宙ニュートリノの検出)



Raymond Davis Jr.

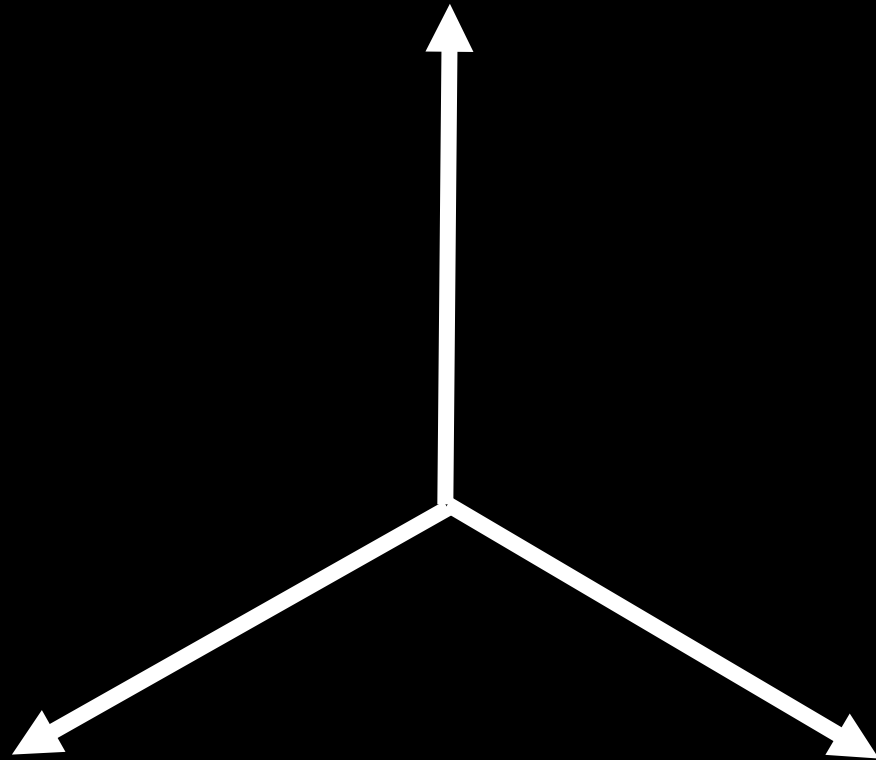


小柴昌俊

人類の ” 世界観 ” を変えた天体物理学の研究分野を立ち上げた功績に対して与えられた。

4.3. 各国のX線天文学の方向性

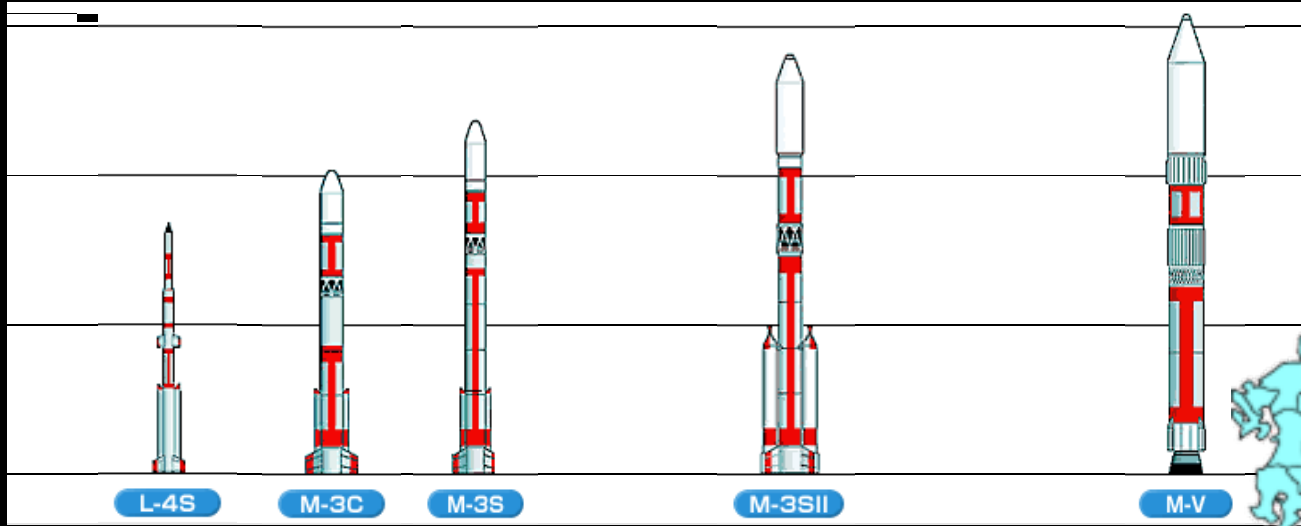
アメリカ: 空間分解能!



ヨーロッパ: 高統計!

日本:
広エネルギー帯域
エネルギー分解能!

X線衛星をあげ続けてきた日本



内之浦宇宙観測所

Ohsumi
大隈
(1970)

Hakucho
はくちょう
(1979-1985)

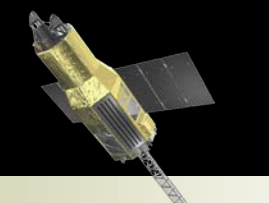
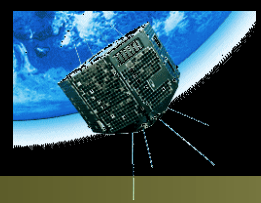
Tennma
てんま
(1983-1989)

Ginga
ぎんが
(1987-1991)

ASCA
あすか
(1993-2001)

Suzaku
すぎく
(2005-2015)

Hitomi
ひとみ
(2016)



Ufuru
(1970-73)

Einstein
(1978-91)

ROSAT
(1990-99)

Chandra/Newton

Chandra/Newton

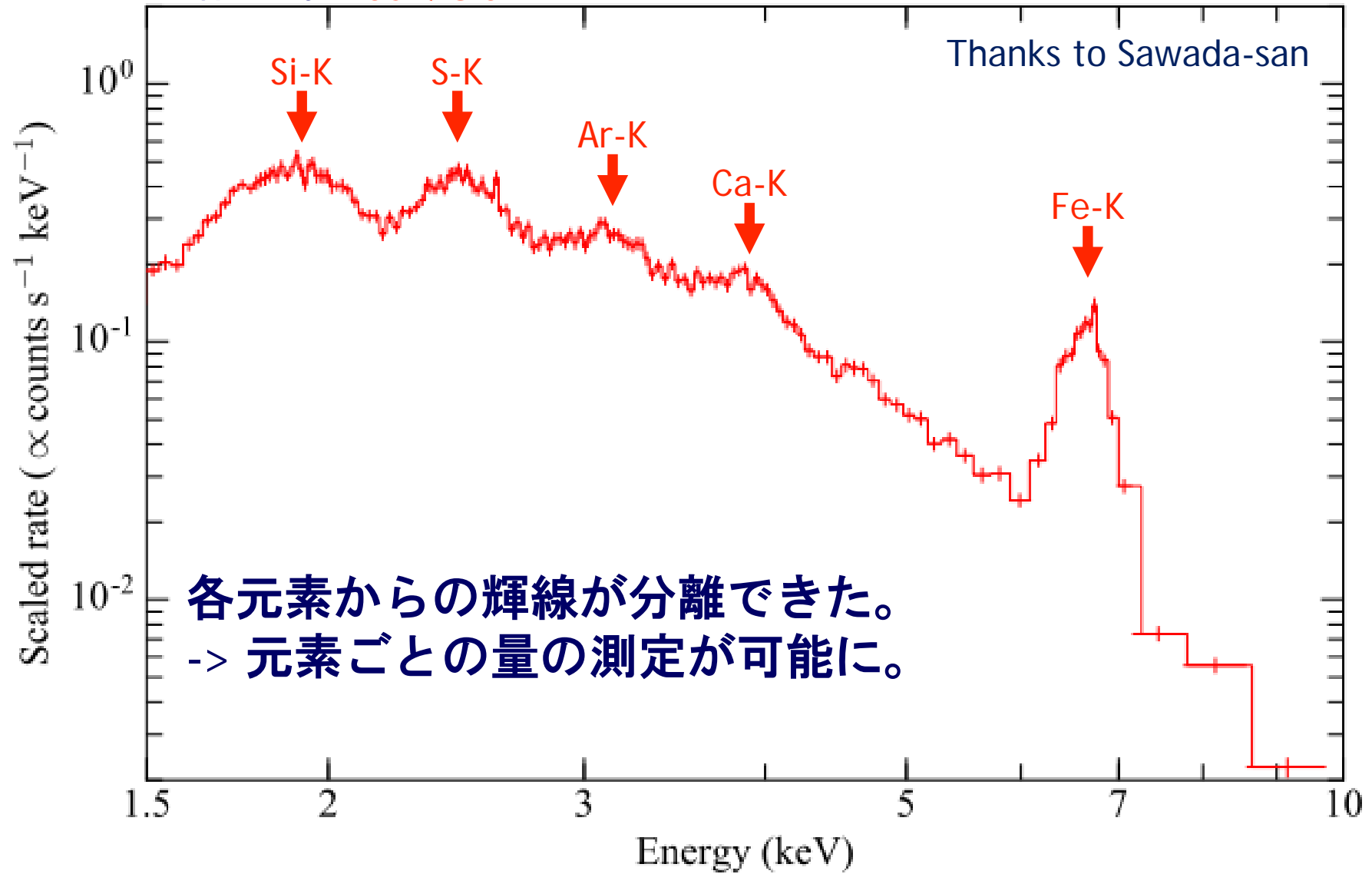
(c) JAXA



1990年代のX線エネルギー分解能

W49B with ASCA/GIS

Thanks to Sawada-san

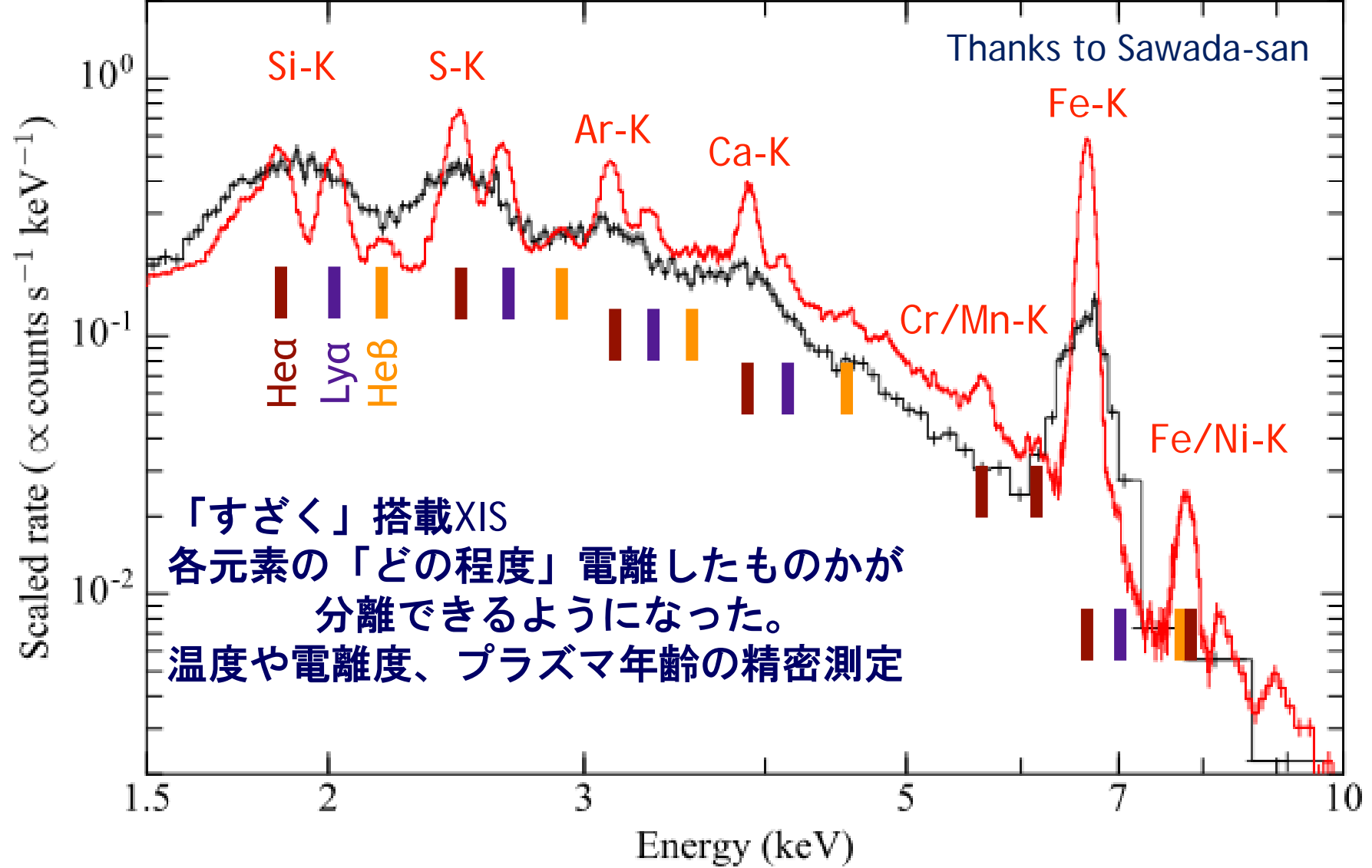


各元素からの輝線が分離できた。
-> 元素ごとの量の測定が可能に。

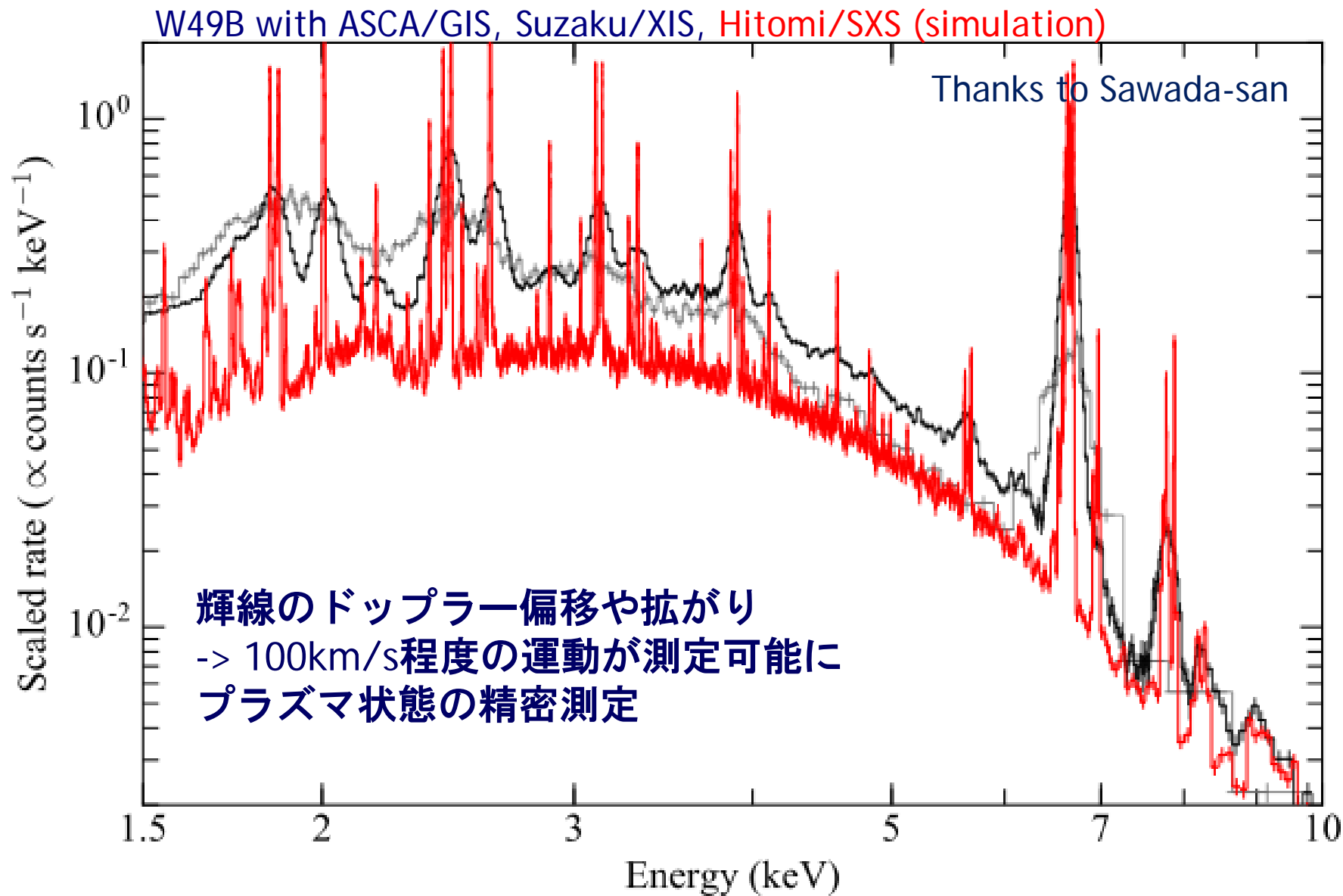
2000年代のX線エネルギー分解能

W49B with ASCA/GIS, Suzaku/XIS

Thanks to Sawada-san

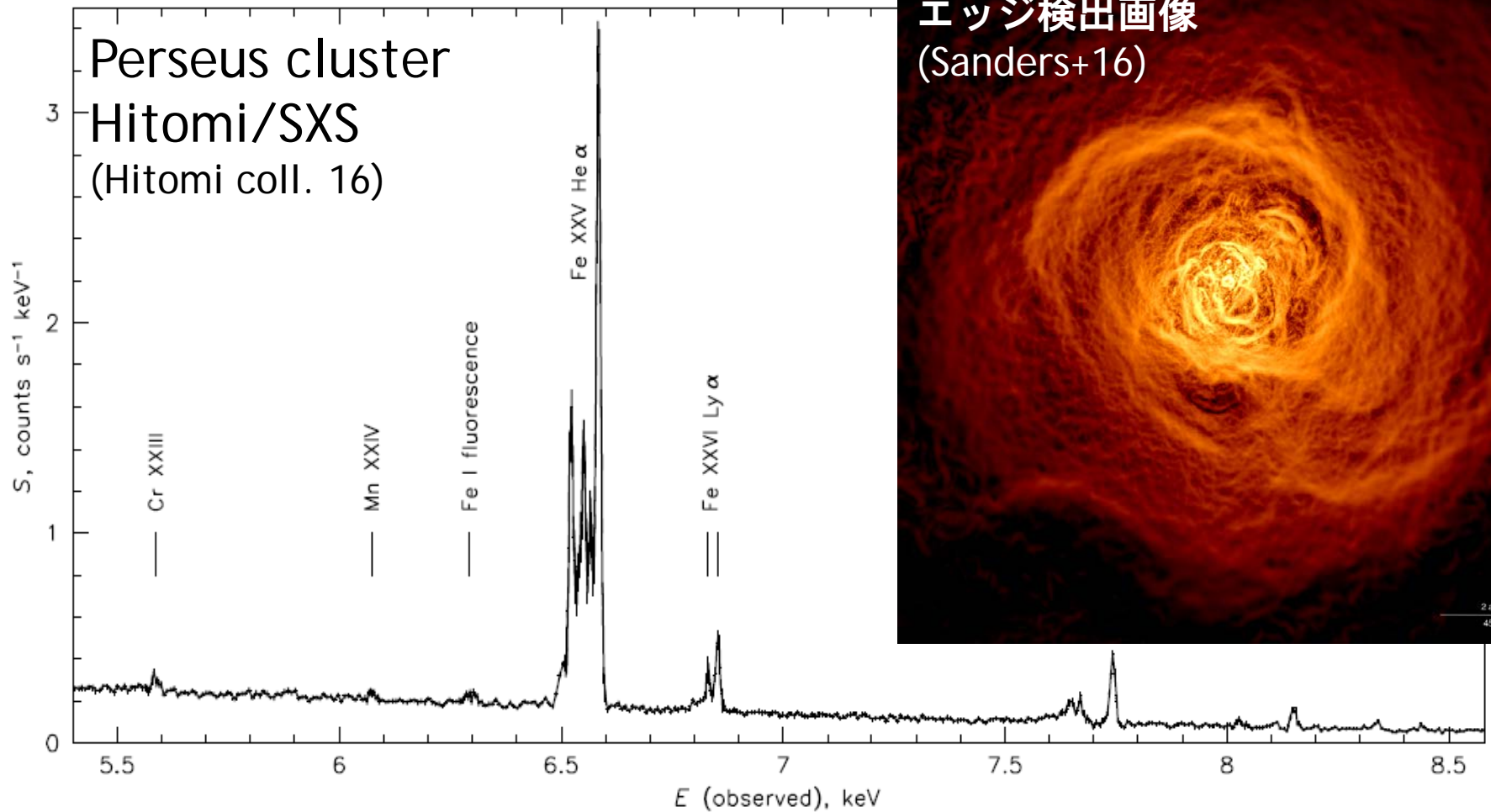


2010年代のX線エネルギー分解能 (になるはずだったもの)



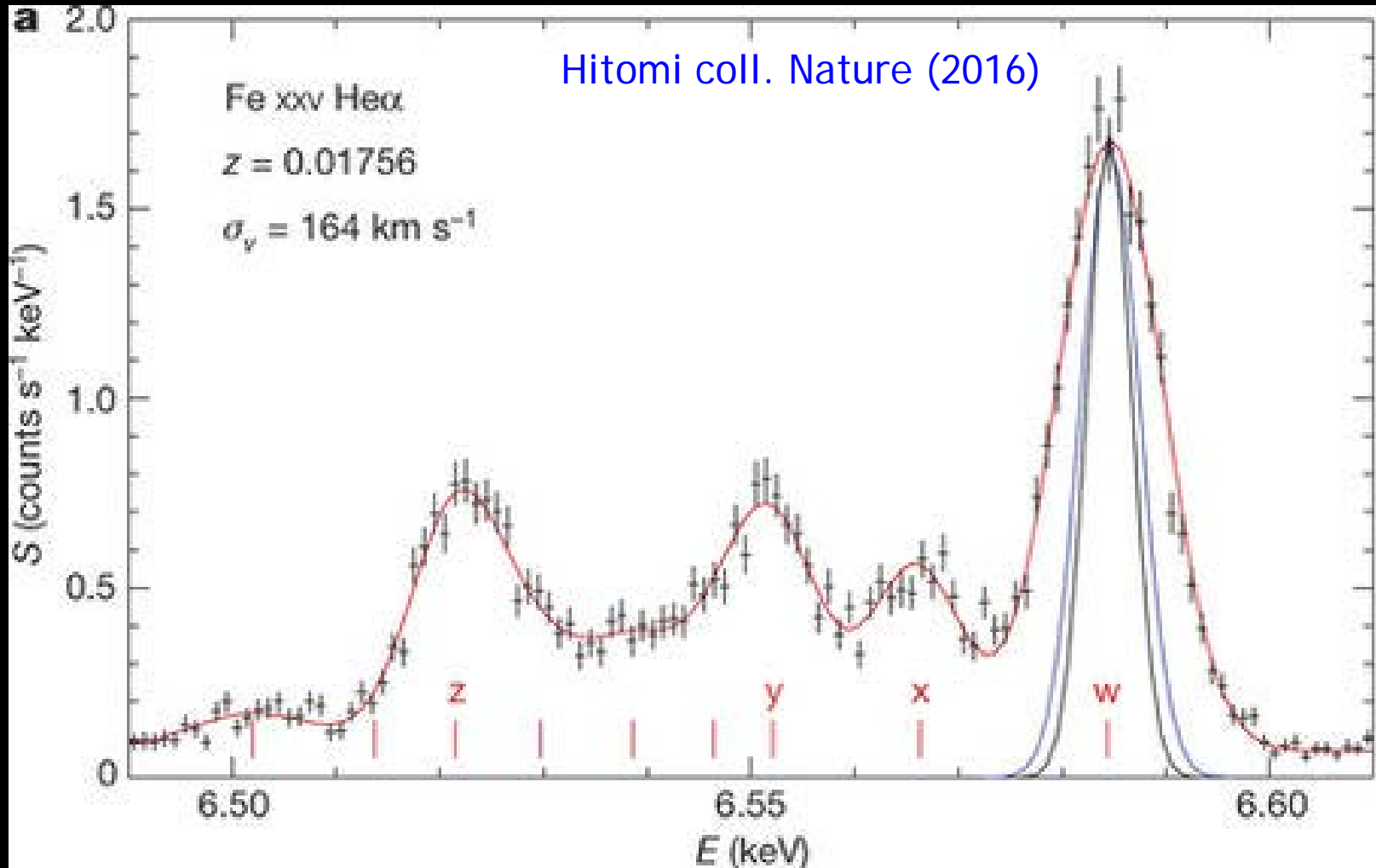
「ひとみ」は短命ながらカロリメータの威力を見せてくれた

ペルセウス銀河団
エッジ検出画像
(Sanders+16)



Calorine Kilbourneが見た瞬間泣き崩れました。

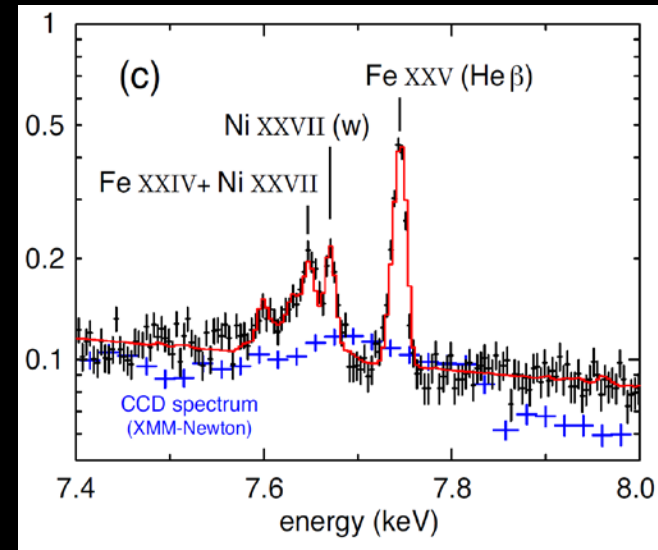
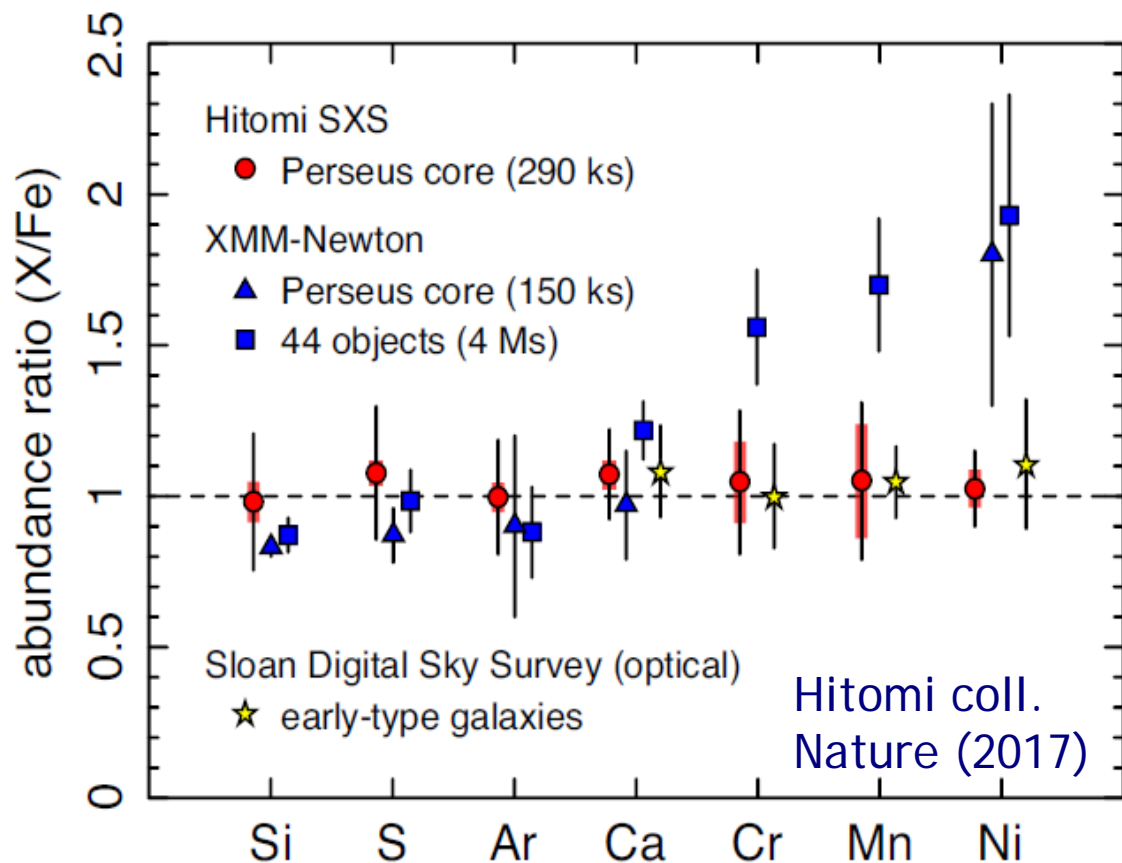
意外に「静か」だったペルセウス銀河団



輝線がほとんど広がっていない (乱流速度 ~ 164 km/s)
あれほど激しく衝撃波が舞い散っているのに、
なぜかき混ぜられていないのか?
「ひとみ」の遺した新しい謎

FeとNiはどこから来た?

星が核融合で作ったFeとNiが、銀河団ガスにばらまかれている
Fe/Ni比は、どんな種類の星が多く存在するかを知る指標



ペルセウス銀河団と我々の太陽系でFe/Niは同じ
-> 宇宙の「レシピ」はどこも同じなのか...?

2021年度にXRISM衛星として再挑戦させていただきます。

まとめ

0. 超新星残骸は、宇宙の多様性の源である
1. 超新星残骸progenitorに関して、近年のX線や電波観測が多くを示唆を与えている
2. 宇宙線加速源としての超新星残骸研究は、宇宙線逃亡の研究が精力的に行われている