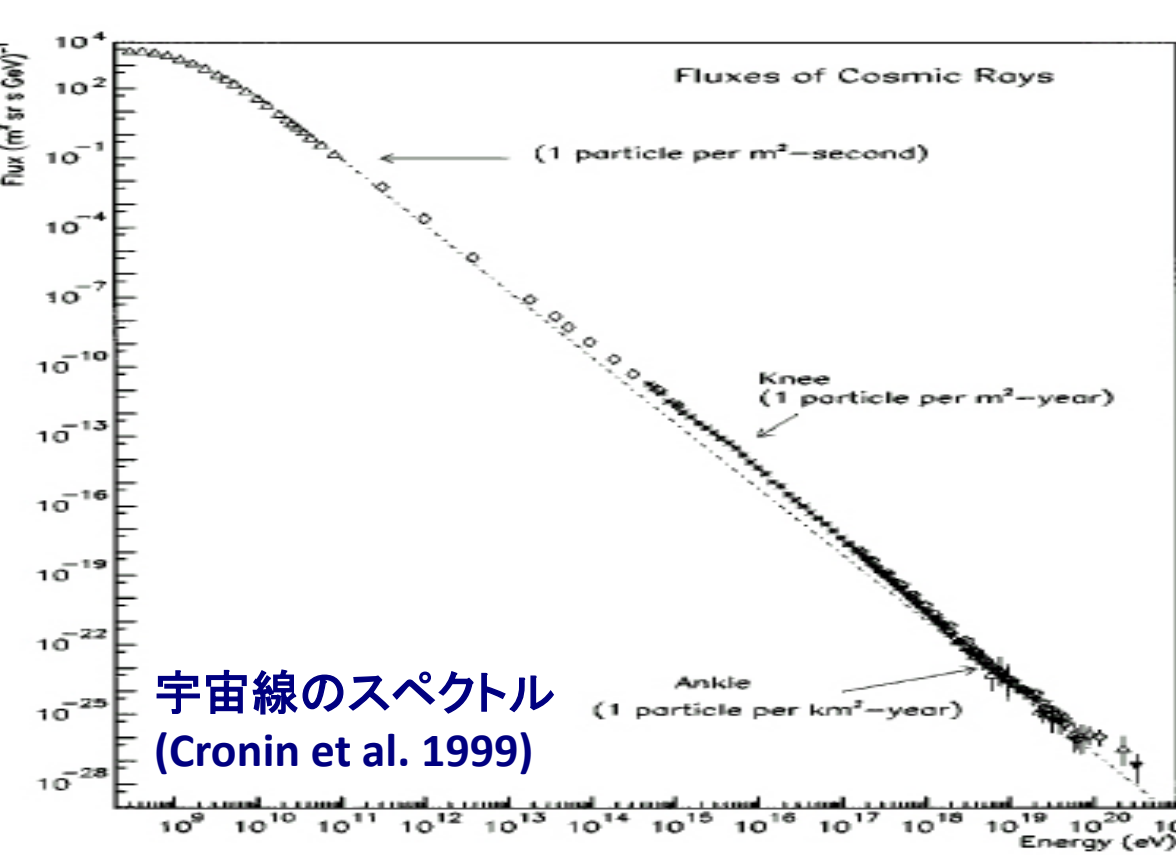


馬場彩 (青学大), 森浩二 (宮崎大), 鶴剛, 田中孝明 (京都大学),
栗木久光 (愛媛大), 内山泰伸 (立教大), 松本浩典 (名古屋大), 高橋忠幸 (宇宙研),
山口弘悦 (GSFC/NASA), ほかFORCEチーム

概要

宇宙線は宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子であり、銀河の基本構成要素の一つである。それにも関わらず、発見から100年以上経った現在も、その加速機構・加速効率など、定量的な理解は進んでいない。宇宙線電子は、磁場中でシンクロトン放射を起こす。特に硬X線帯域では、一番高エネルギーまで加速された電子からの放射がみられると考えられており、宇宙線加速理解に重要な役割を果たすと考えられている。日本は、超新星残骸衝撃波面からのシンクロトンX線の発見、衝撃波面での効率よい加速と磁場増幅の発見など、宇宙線の理解に大きなブレークスルーをもたらしてきた。現在残されている最大の謎は、衝撃波面での磁場構造だ。効率の良い加速のため衝撃波近傍では大電流が流れているような状態になっており、そこで乱流状態の誘電磁場が発生する。発生した磁場は荷電粒子を散乱し、さらに加速効率が上がる。したがって、衝撃波近傍の磁場構造を正確に理解することが、宇宙線加速理解の試金石となる。FORCE計画では10 keV以上で初めて10秒角の分解能での撮像が可能になる。10 keV以上では加速電子からのシンクロトンX線がbreakしており、今存在する最高エネルギーの電子の観測が可能になる。最高エネルギー電子の空間分布から、磁場構造・乱流度のエネルギー分布を調べ、最高エネルギー決定機構を決定する。また、そのフラックス変動は、break energyの空間・時間変動に強く依存する。したがって、磁場やそのゆらぎの時間変動が、シンクロトンX線の明滅として観測され、粒子の加速と減速の様子を直接観測できる。これらを併せ、超新星残骸衝撃波面の磁場構造を決定、加速機構や加速可能最高エネルギーを決定する。本講演では、観測の実現可能性などについて議論する。

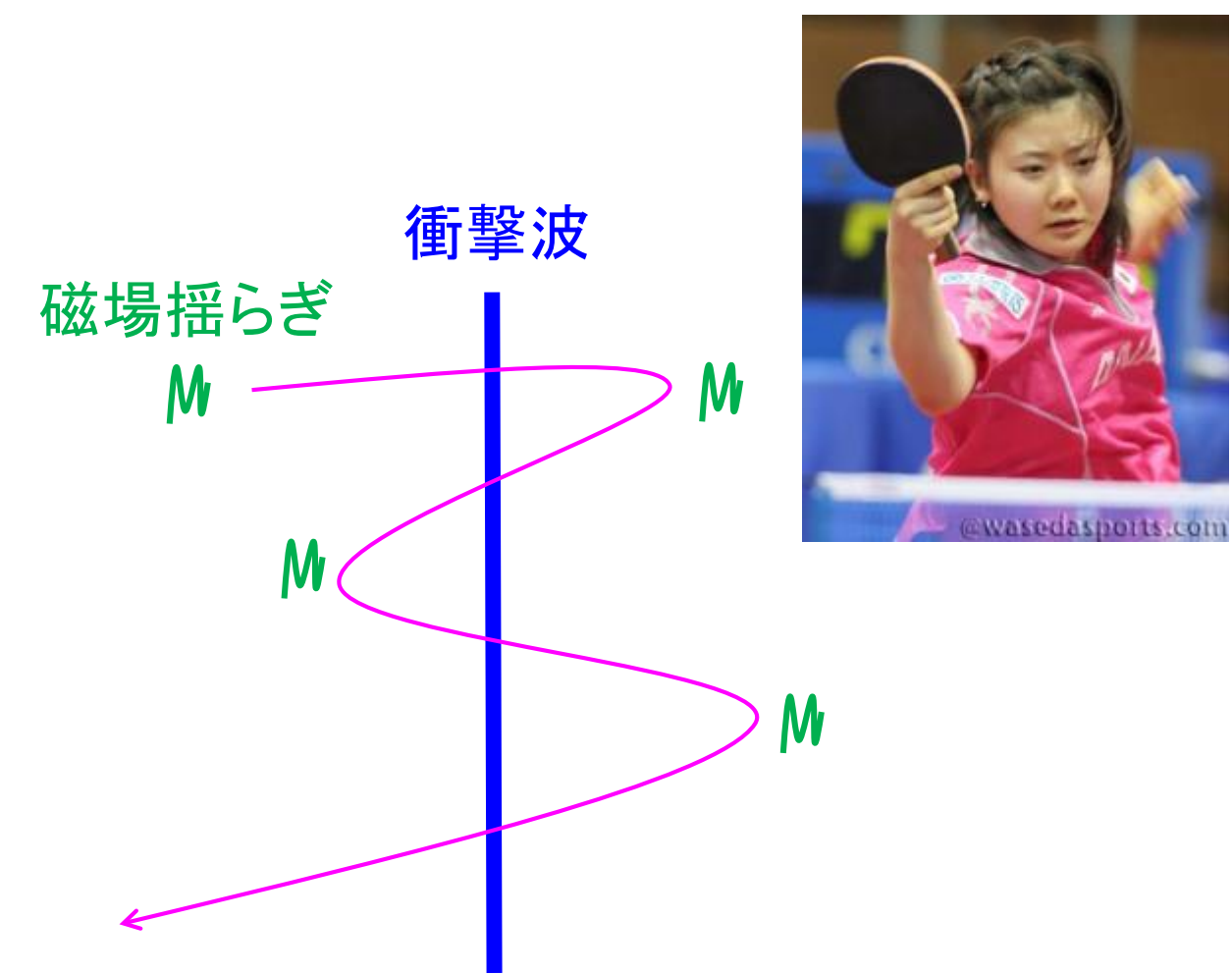
1. 宇宙物理最大の謎:宇宙線と加速機構



宇宙線
宇宙を飛び交う超高エネルギー粒子
エネルギー密度: ~1eV/cc
~星の光、磁場などのE密度
「銀河の基本構成要素」

発見(Hess, 1912)以来100年経った現在も
起源や加速機構は謎のまま。

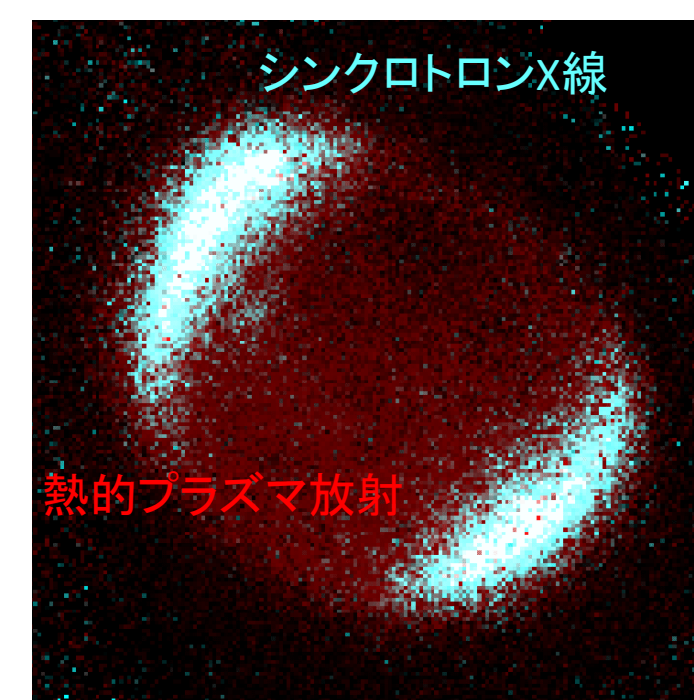
加速機構
衝撃波での粒子加速 (Bell 1978)??
粒子の一部は衝撃波を往復するたびに
エネルギーを得る
スペクトルは衝撃波圧縮比で決定
方向転換は磁場揺らぎで決定
-> 衝撃波の磁場構造を知ることが
宇宙線加速機構の理解につながる



2. 超新星残骸と宇宙線加速

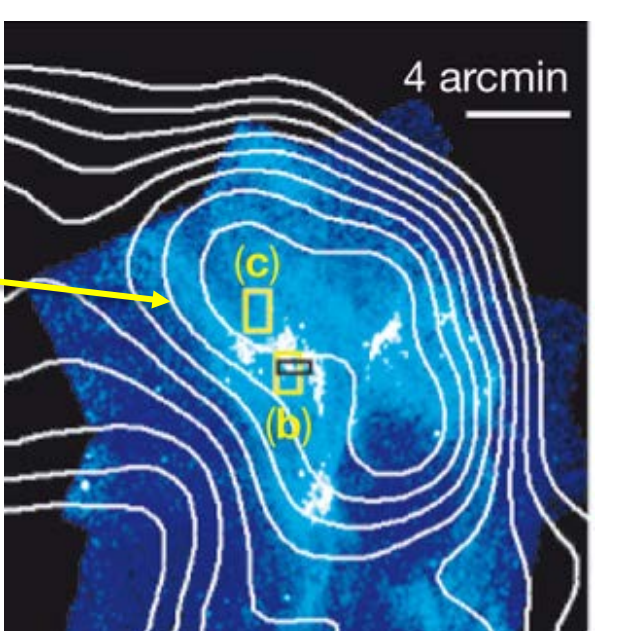
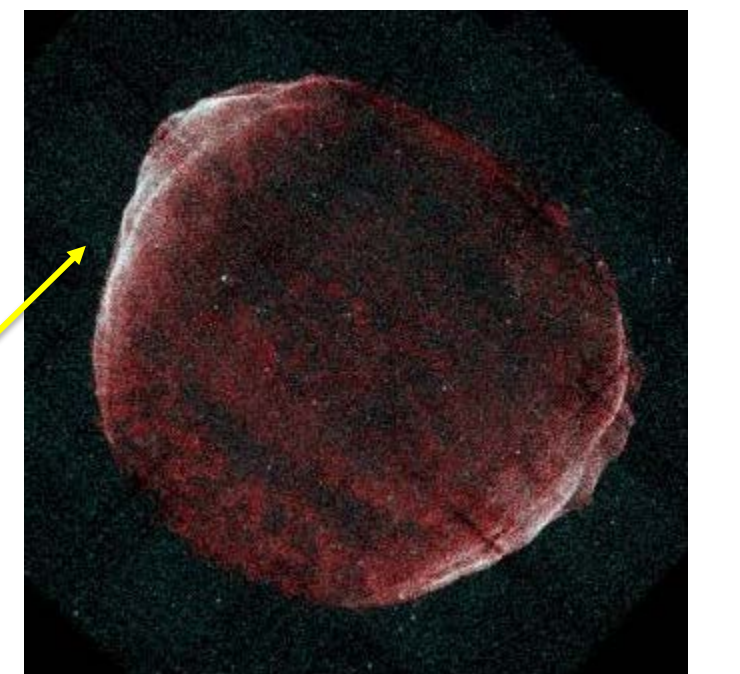
超新星残骸: 星が死ぬ時に起こす大爆発
運動エネルギー: ~10⁵¹ erg
衝撃波速度: ~ 秒速数千km
爆発頻度: 30年に一回 @ 銀河系

超新星残骸での宇宙線加速の観測的証拠
Koyama et al. (1995)
「あすか」が超新星残骸
SN1006衝撃波面から
シンクロトンX線を発見



-> 高エネルギー電子の存在を
初めて示した

衝撃波面での磁場増幅??
Bamba et al. (2003,2005)
シンクロトンX線は
衝撃波の薄い領域に集中
-> 磁場は増幅、乱流??
Uchiyama et al.(2007,2008)
シンクロトンX線の一部が
~年単位で明滅
-> 磁場増幅と数年での加速減速??



銀河系内宇宙線加速源の最有力候補

日本は宇宙線の謎解明に大きく貢献

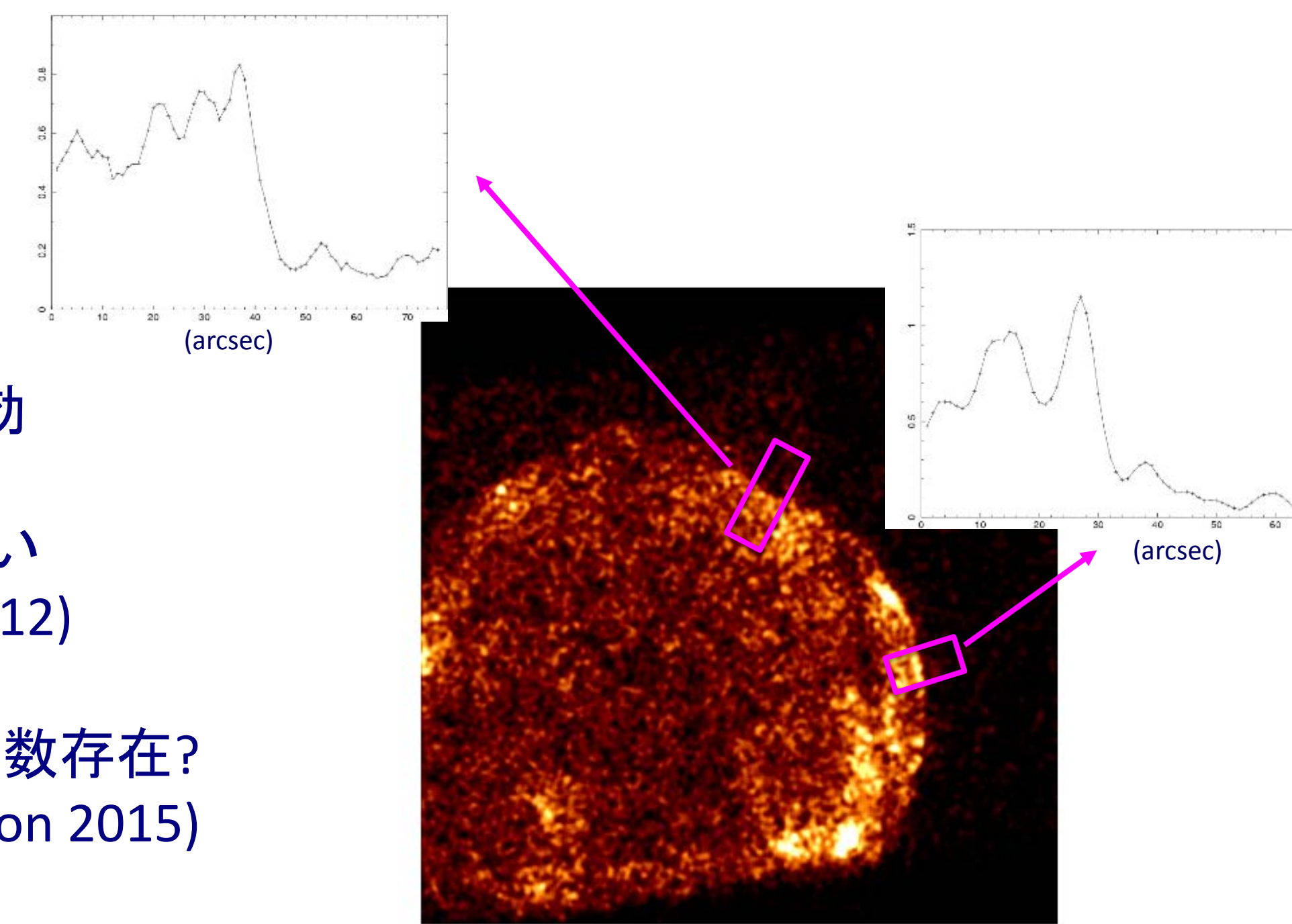
3. 硬X線撮像を用いた超新星残骸衝撃波面磁場測定

現在までの観測の問題点:
超新星残骸の磁場に定量的見積もりを与えた
しかし、
filamentの幅: Chandraでもぎりぎりの分解
単一エネルギーでの測定しかない
knot時間変動: 超新星残骸のごく一部の測定
-> 衝撃波磁場構造の全貌を知るには至らない

より硬X線帯域では?:
- filamentの幅~粒子拡散スケール (Kt)^{1/2}
K: 拡散係数 ~ 電子ジャイロ半径 ~ 電子E
t: 拡散時間 最高E決定機構によって依存性が変わる
(age limited case; 幅~E^{1/4}, sync. cooling limit case: 幅~E⁰)
-> 観測エネルギーごとの幅を決定することで
最高エネルギー決定機構が分かる
- シンクロトン放射のカットオフはX線帯域
-> knotの明滅は激しくなり、観測しやすくなる
(E_{cut}: 5keV->10keVに変化したとき、
フラックス変動は30%@1keV, 350%@10keV)
- スペクトルカットオフ形状は最高E決定機構によって変わる
(Yamazaki et al. 2014)
-> 微小領域でのカットオフ形状の決定が重要

FORCE観測の実現可能性
filament・knot構造は10秒程度の構造
-> 10秒程度の角度分解能が必要
遠方の天体の観測にも高空間分解能は有効
観測可能天体
若い超新星残骸はシンクロトンX線で明るい
(Nakamura et al. 2012)
非熱的放射が優勢な超新星残骸も明るい
大マゼラン雲には加速効率のよい天体が複数存在?
(HESS collaboration 2015, Fermi collaboration 2015)

若い超新星残骸
Cas A, Tycho, Kepler, SN1006, RCW86, G1.9+0.3
非熱的放射優勢超新星残骸
RXJ1713-3946, Vela Jr., HESSJ1731-347
効率のよい加速天体候補
N132D, 30 Dor C (LMC)



参考文献
Bamba, A. et al. 2003, ApJ, 589, 827
Bamba, A. et al. 2005, ApJ, 621, 793
Bell, A. R. 1978, MNRAS, 182, 147
Fermi Collaboration, 2015, arXiv:1509.06903
Hess, V. F. 1912, Phys. Zeits., 13, 1084
HESS collaboration, 2015, Science, 347, 406
Koyama, K. et al. 1995, Nature, 378, 255
Nakamura, R. et al. 2012, ApJ, 746, 134
Uchiyama, Y. et al. 2007, Nature, 449, 576
Uchiyama, Y. et al. 2008, ApJL, 677, L105
Yamazaki, R. et al. 2014, RAA, 14, 165

**FORCEについての詳細は
二日目夕方の講演
森 et al. S5-011
「軟X線から硬X線の広帯域を高感
度で撮像分光する小型衛星計画
FORCE」で!**

10keV以上での撮像で衝撃波詳細構造を知ることが
磁場構造決定・宇宙線加速機構決定に必須!

-> FORCE!