

A Study of Soft X-ray Diffuse Background with Suzaku:
from the Geocorona to the Galactic Halo

すざく衛星による軟X線背景放射の研究：
ジオコロナから銀河系ハローまで

東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
満田研究室

吉野友崇

本発表の構成

- 研究の背景
 - ▶ 軟X線背景放射のこれまでの理解
- 目的と手法
- 解析と結果
 - ▶ 酸素輝線強度の方向分布
- 議論

軟X線背景放射

宇宙は電波からガンマ線に至る様々な波長でほぼ一様に輝いている。

- 2 keVから約100 keV

宇宙X線背景放射(Cosmic X-ray Background : CXB)

- ▶多数の系外天体(活動銀河核など)の重ね合わせ。
- ▶2-10 keVはphoton index 1.4のべき関数。

- 0.1 - 2 keV

軟X線背景放射 (Soft X-ray Diffuse Background : SXDB)

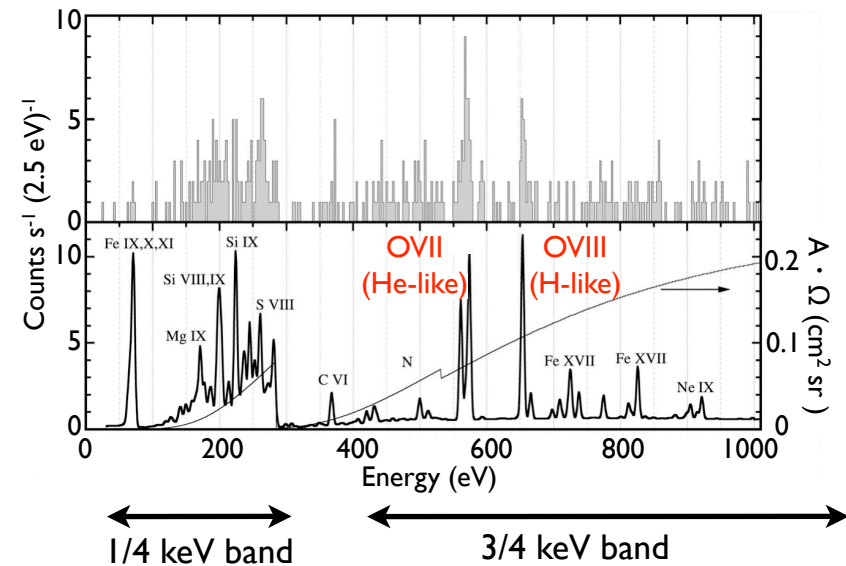
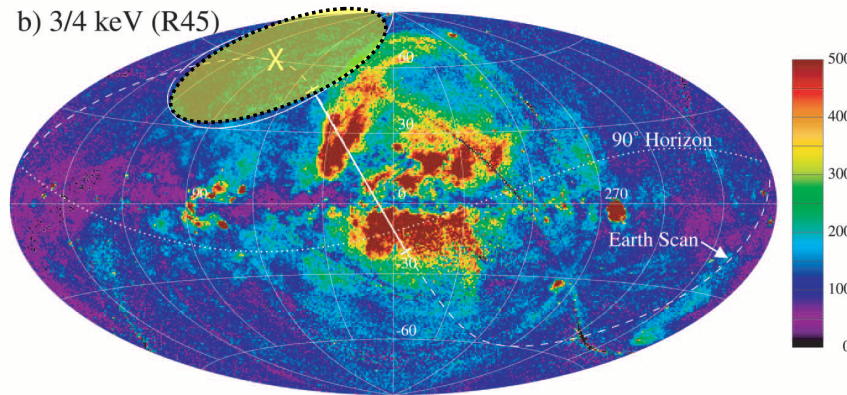
- ▶CXBだけでは説明できない。
- ▶1970年代から知られていたが、放射源は未だ理解されていない。

軟X線背景放射のCXB以外の成分

◎CXBで説明できない成分は輝線放射の集まり。

▶X線マイクロカロリメータで高銀緯方向をFWHM=10 eVで観測(McCammon et al. 2002)

- 0.5 - 1 keV での全X線強度に対するCXBの寄与 ~ 40 %
- OVII輝線強度 = 4.8 ± 0.8 LU (LU = Line Unit : photons/sec/cm²/str)



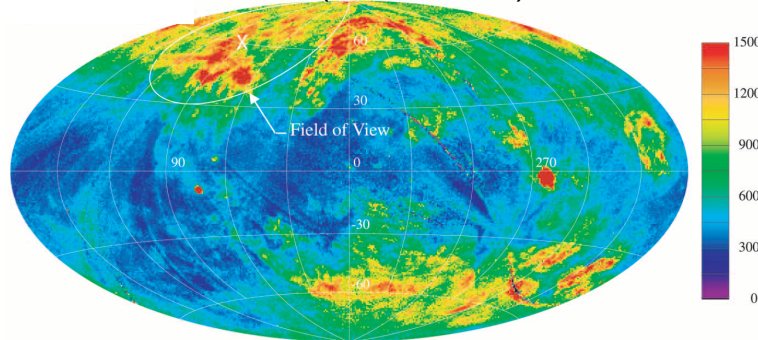
輝線放射の起源は ~ 数100万度の高温ガス

軟X線で見渡す距離

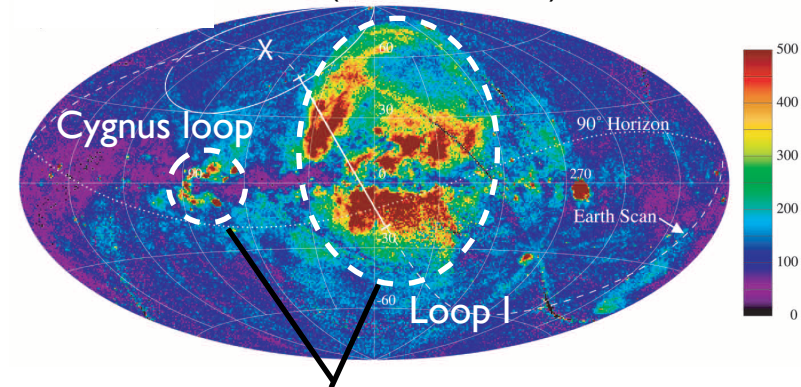
◎ 軟X線で見渡せる距離は、中性星間物質による吸収のためエネルギーによって異なる。

ROSAT All Sky Surveyによる全天マップ (Snowden et. al., 1994)

1/4 keV (0.1-0.3 keV)



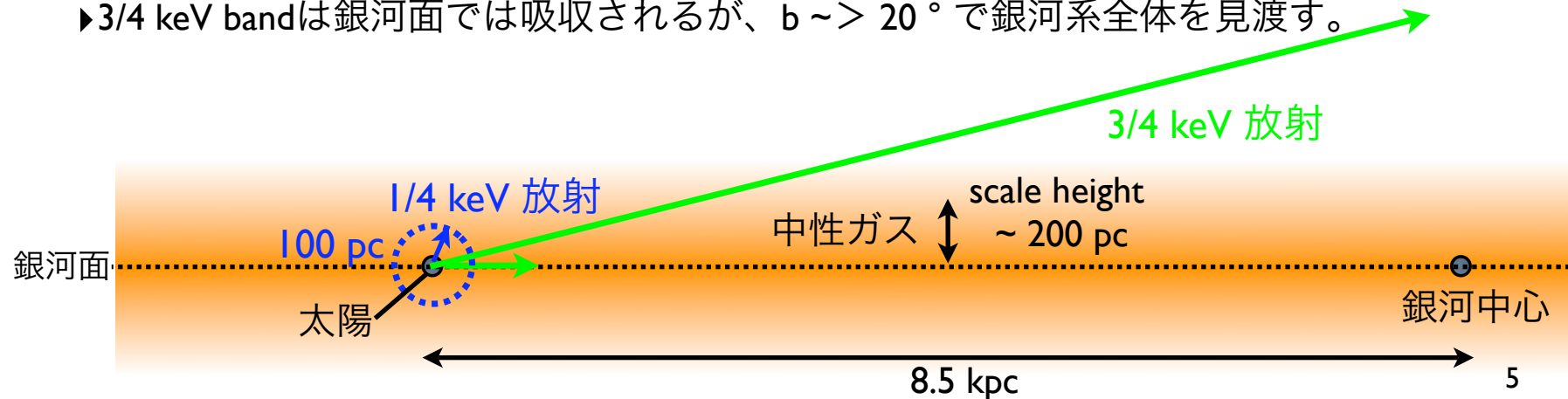
3/4 keV (0.4 - 1.2 keV)



銀河系内のローカルな放射源

銀河内の中性ガスの平均分布を仮定すると、

- ▶ 1/4 keV bandのmean free path は高銀緯方向でも ~ 100 pc。→ 100pc 以内の放射である。
- ▶ 3/4 keV bandは銀河面では吸収されるが、 $b \sim > 20^\circ$ で銀河系全体を見渡す。

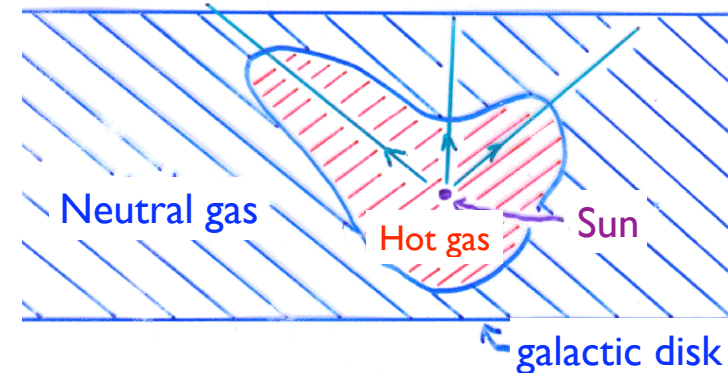


近傍の放射(I)

Local Hot Bubble (LHB)

▶1970-2000年

▶軟X線やUVの観測から、太陽系を~100 pcのスケールで囲む~100 万 Kの高温ガスがあると考えられた (Local Hot Bubble, LHB)。



▶2000年 ~

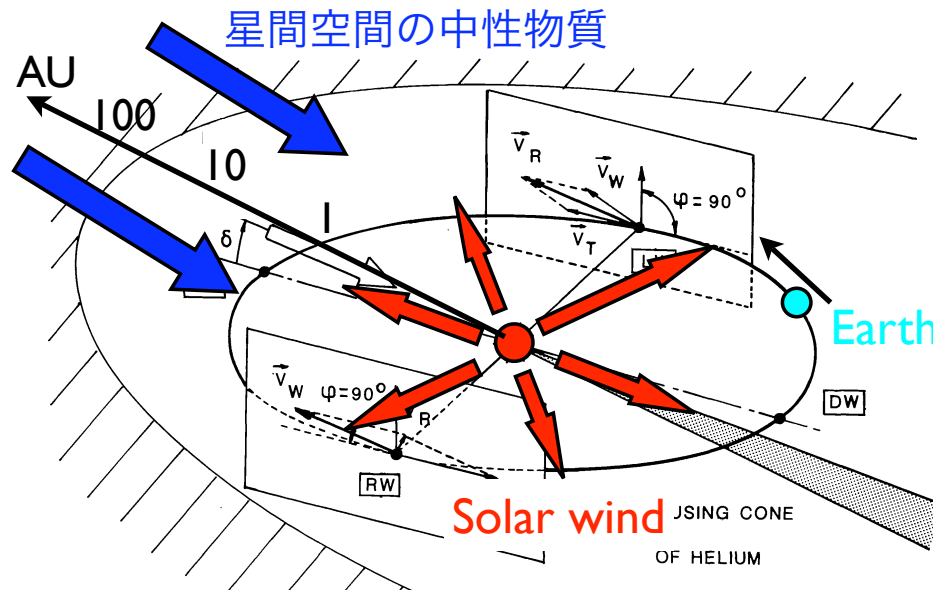
▶EUVの観測によってLHBの放射強度のupper limitが求まった(Hurwitz et. al., 2005)。
▶100 pc 以内の1/4 keV, 3/4keV bandの放射強度がEUVから予想される強度より遥かに大きいことが判明(Smith et. al., 2007)。

➡ 1/4 keV, 3/4 keVバンドの放射へのLHBの寄与は~20 %, ~10 % 程度

近傍の放射(2)

Heliospheric Solar Wind Charge eXchange (SWCX)

▶ Heliosphereの中性物質と太陽風イオンとの荷電交換反応によるX線放射



A: 中性物質, B: 太陽風イオン

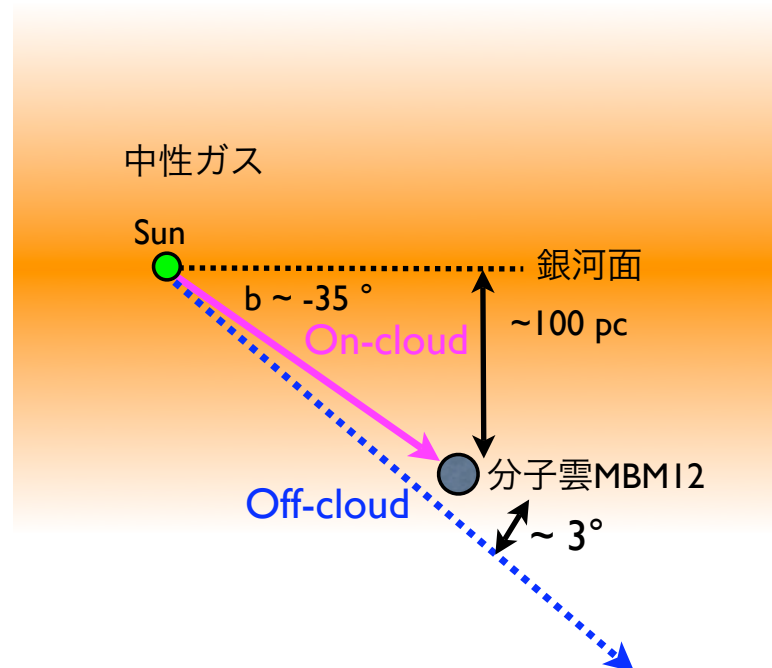
- ▶ 中性物質の密度を仮定すると OVII 輝線 $\sim 4 \text{ LU}$ と無視できない強度。
- ▶ 寄与は解っていない。

銀河系遠方からの放射

◎SXDBには銀河系遠方からの放射が存在する。

❖すざく衛星による分子雲MBM12 ($D \sim 100$ pc)を用いたshadowing観測

- ▶On-cloud方向の放射(SWCX+LHB)は ~ 0.1 keVのthin thermal plasma model で表現できる。
- ▶Off-cloud 方向のOVII 輝線強度は(on-cloud 方向+ ~ 2 LU)



中性ガスの吸収を受けている遠方成分を本論文ではTransAbsorption Emission:TAE (Kuntz & Snowden, 2000) と呼び、TAEは全て中性ガスの外にあるとする。

SXDB のこれまでの理解

(1) 太陽圏 < ~10 AU での太陽風荷電交換反応(SWCX)

- ▶ OVII 輝線強度 ~ 数 LU
- ▶ 時間変動、空間分布については未知。

(2) Local Hot Bubble (LHB) < 100pc

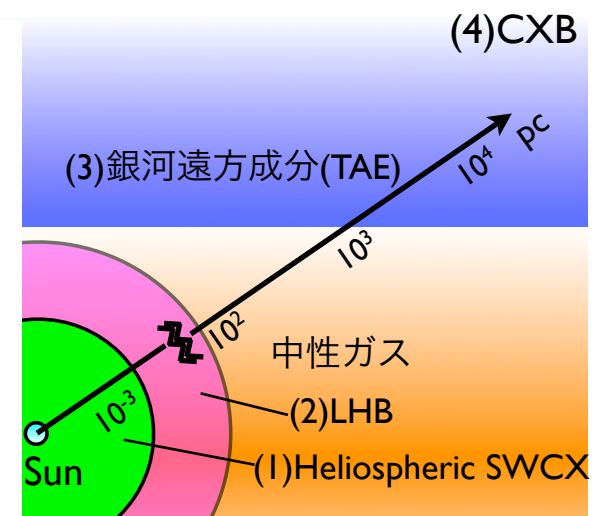
- ▶ OVII輝線強度 < 1 LU、OVIII輝線強度 ~ 0 LU
- ▶ 0.4 keV 以上の放射にはほとんど寄与していない。

(3) 銀河系の遠方成分(TAE) > 100pc

- ▶ 温度、分布、起源は未知。

(4) 宇宙X線背景放射(CXB, 銀河系外)

- ▶ 2 keV 以上は既知
- ▶ 連続成分でありline への寄与は無い。



SWCXとTAEの寄与が大きな謎となっている。
TAEの物理状態は解っていない。

本博士論文の目的

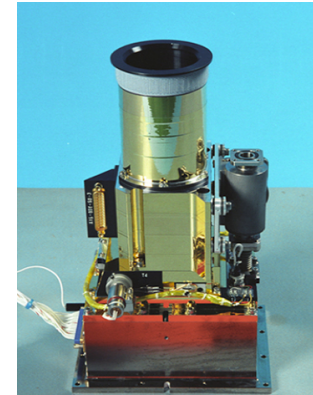
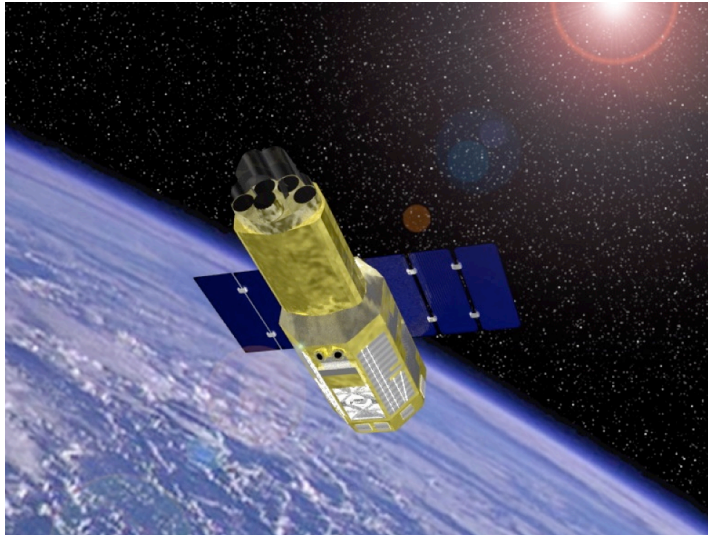
- ▶ 軟X線背景放射の近傍の放射(SWCX+LHB)と遠方成分(TAE)を切り分け、それぞれの寄与を明らかにする。
- ▶ 遠方成分の物理状態に制限を与え、起源に迫る。

手法

- ◎ 高い分光性能で様々な方向を観測し、酸素輝線(OVII,OVIII)をprobeとして軟X線背景放射の起源に迫る。
 - ▶すざく衛星で、localな放射源とは離れた明るいX線源を含まない様々な銀緯方向を観測。
 - ▶高い分光性能と低バックグラウンドのすざく衛星XISを用いる。
 - ▶かつてない高精度でOVII, OVIII輝線強度を決定する。
 - ▶世界で初めて、多方向のSXDBを系統的に解析し、酸素輝線強度の方向依存性を求める。

すざく衛星搭載X線CCDカメラ

すざくにはXIS-FI 3台とXIS-BIのX線CCDが搭載



XIS-BI
背面照射型X線CCD

- ▶ 3/4keVバンドにおける高い感度、低バックグラウンド
- ▶ 広がった放射に対する1 keV以下での優れた分光性能
- ▶ 18分角の視野、2分角の空間分解能

軟X線背景放射の輝線を明確に分離し、高精度に輝線強度を決定できる。

解析の流れ

▶ 軟X線背景放射スペクトルへのコンタミ源の除去

- 太陽X線の地球大気による散乱、X線点源、 **Geocoronal SWCX**



▶ 酸素輝線強度の決定



▶ **OVII vs OVIII** 輝線強度の相関

- 近傍の放射と遠方成分の切り分け
- 遠方成分の温度

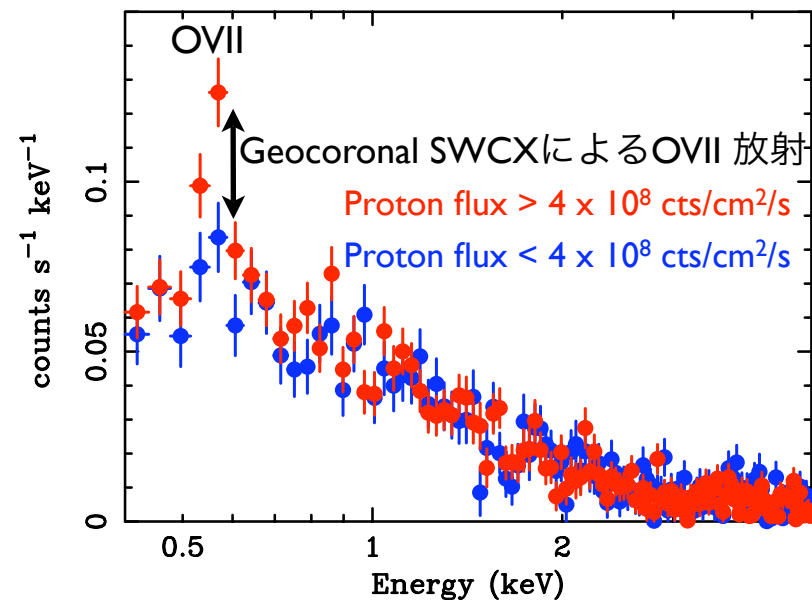
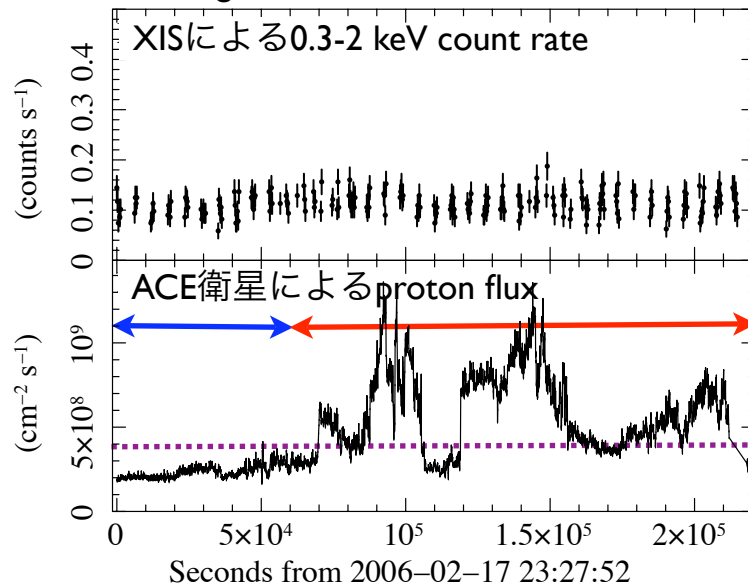
Geocoronal SWCXによるX線放射

◎地球磁気圏(ジオコロナ)の中性物質と太陽風イオンとの電荷交換反応によるX線放射

▶太陽風フラックスと相関。

▶視線方向における太陽風の侵入高度にも依存。～ 10 min の時間変動。

例：High latitude B 観測



▶“太陽風flux” or “観測視線上の太陽風の侵入高度の地球中心からの距離”に相関したスペクトルの変化をCheckし、X線強度が増加した観測時間帯を除去。

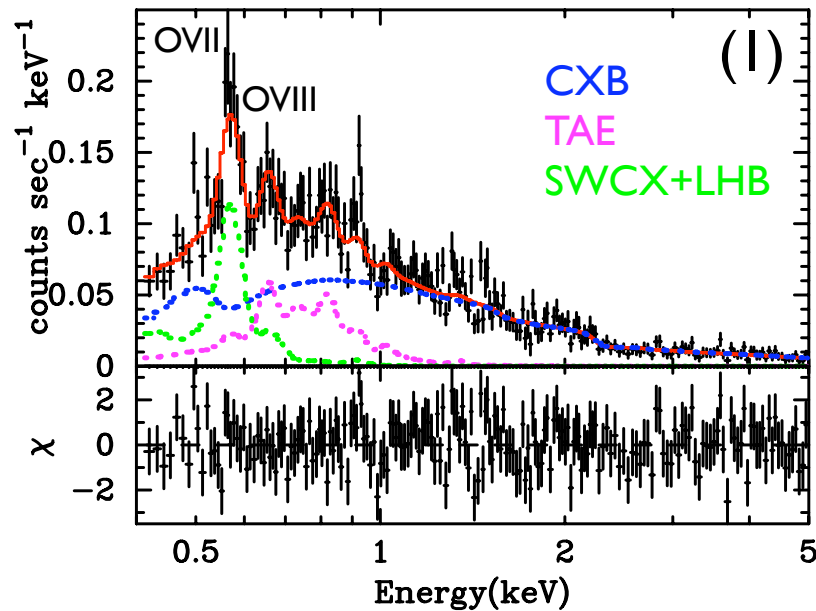
酸素輝線強度の決定

(1)、CXB+TAE+(SWCX+LHB)の3成分モデルでfit。

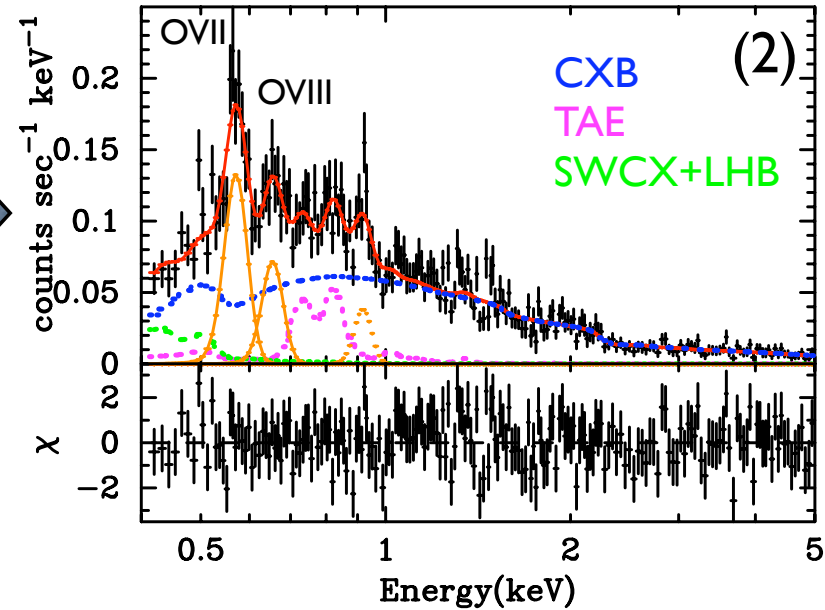
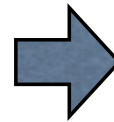
- ▶CXBはべき関数、SWCX+LHBとTAEはthin thermal plasma model。
- ▶TAEとCXBは全中性ガスの吸収を受けている。

(2)、(1)のBest-fit値を用いてTAEとSWCX+LHBから放射される酸素輝線強度を決定。

例: LMC X-3 vicinity



reduced $\chi^2 = 0.95-1.39$ for 59-196 d.o.f
SWCX+LHB : $kT = 0.09-0.14$ keV
TAE : $kT = 0.22-0.48$ keV

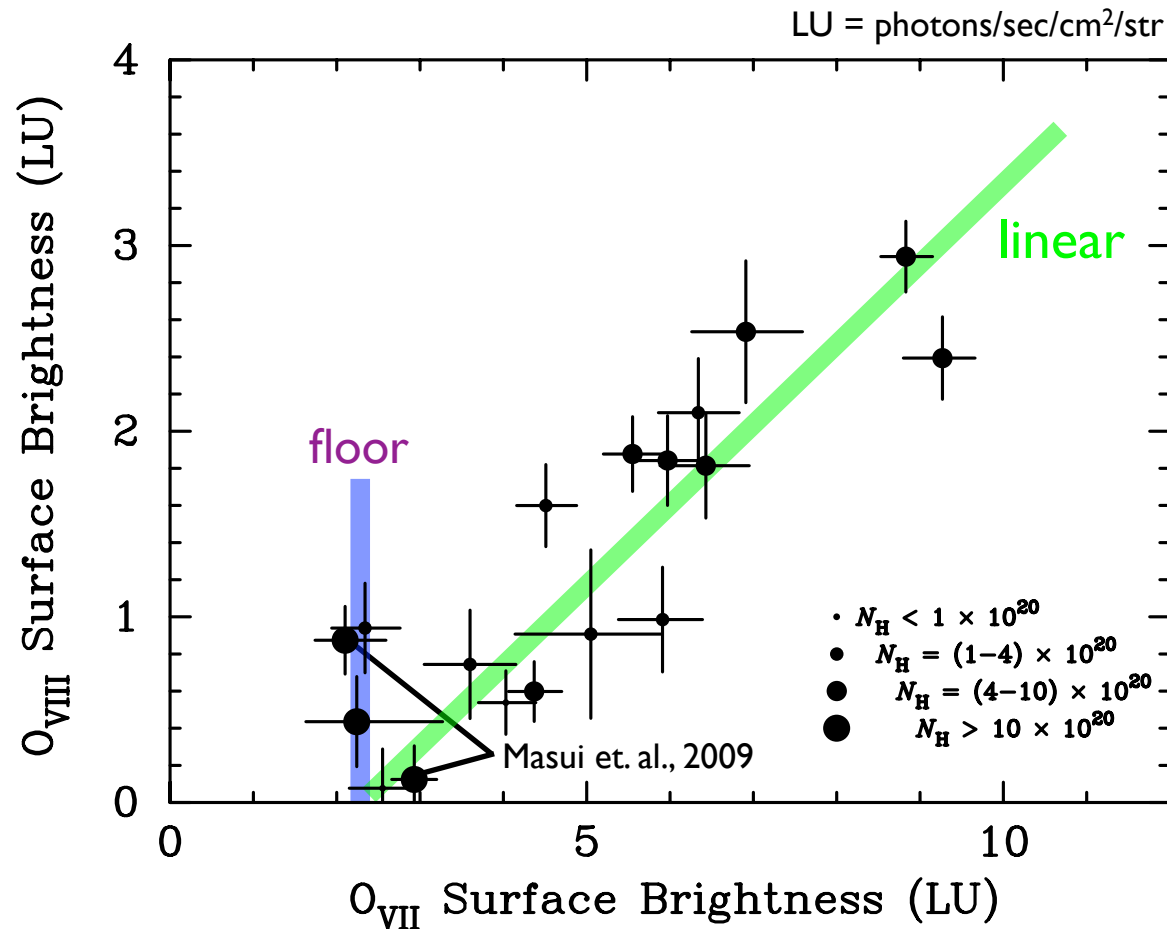


- ▶TAEとSWCX+LHB の温度をbest-fit 値にfix
- ▶TAEとSWCX+LHBの酸素アバundanceを0
- ▶OVII, OVIII 輝線としてgaussian を入れる。

gaussian のnormalizationから表面輝度を決定

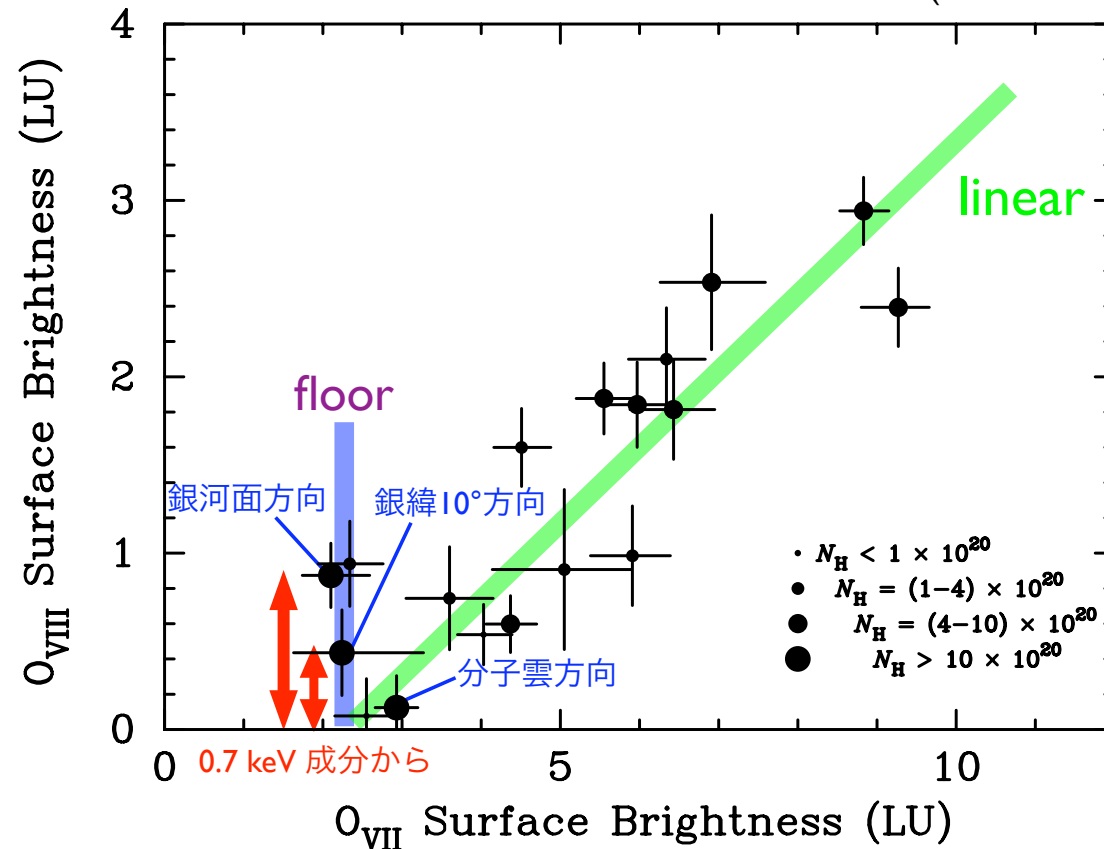
OVII、OVIII輝線強度の相関の発見

1. OVII 輝線強度が ~ 2 LU に下限値 (“floor”) を持つ
2. floor値以上のOVII 輝線強度とOVIII輝線強度が強く相関 (“linear”)
▶OVIII 強度 = $0.5 * (\text{OVII 強度} - 2 \text{ LU})$



近傍成分のOVII, OVIIIの寄与の決定

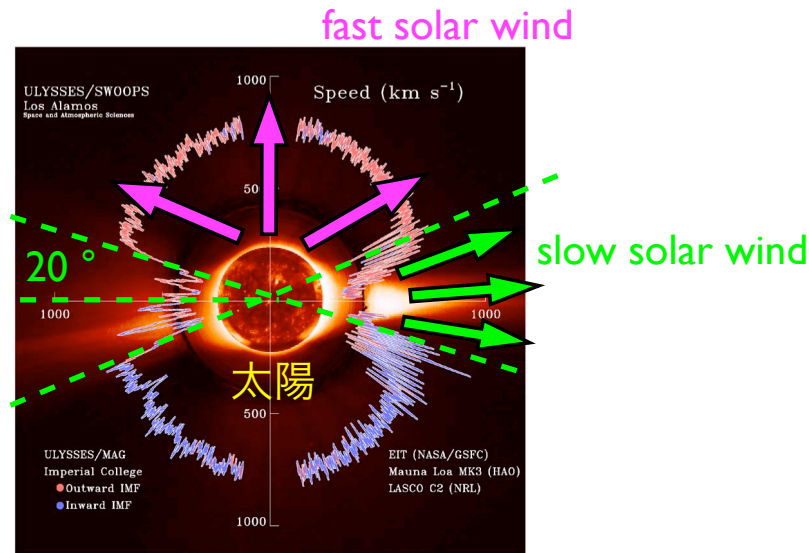
- ▶ Mean free path ~ 数100 pcの方向のOVII輝線強度は~ 2 LU (Floor値)
 - Floorは近傍からの放射であることを示唆
- ▶ 近傍成分のOVIII強度は~ 0と考えられる。
 - ▶ 銀河面方向のスペクトルはCXB + (SWCX+LHB) + ($kT \sim 0.7$ keVの熱的放射)で表現され、OVIII輝線は0.7 keV成分から放射されている(Masui et. al., 2009)。



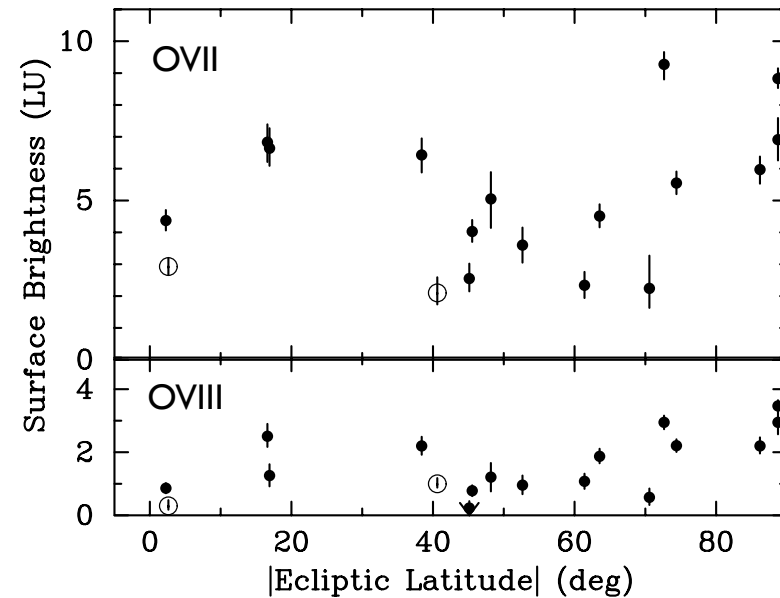
近傍の放射(SWCXの時間／場所依存性)のlinear成分への寄与は要検討。 17

linear 成分の起源はSWCXか？

Solar minimum では 黄緯 $< |20^\circ|$ 方向に
 O^{+7} を多く含むslow solar wind が吹き出る。



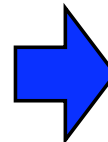
<http://solarscience.msfc.nasa.gov/suess/SolarProbe/Page3.htm>



▶Suzaku 観測期間はsolar minimum

◎SWCX によるOVII 輝線放射は 黄緯 $< |20^\circ|$
で enhanceされる(koutroumpa et. al., 2006)。

▶OVII輝線強度の黄緯依存性は無い。



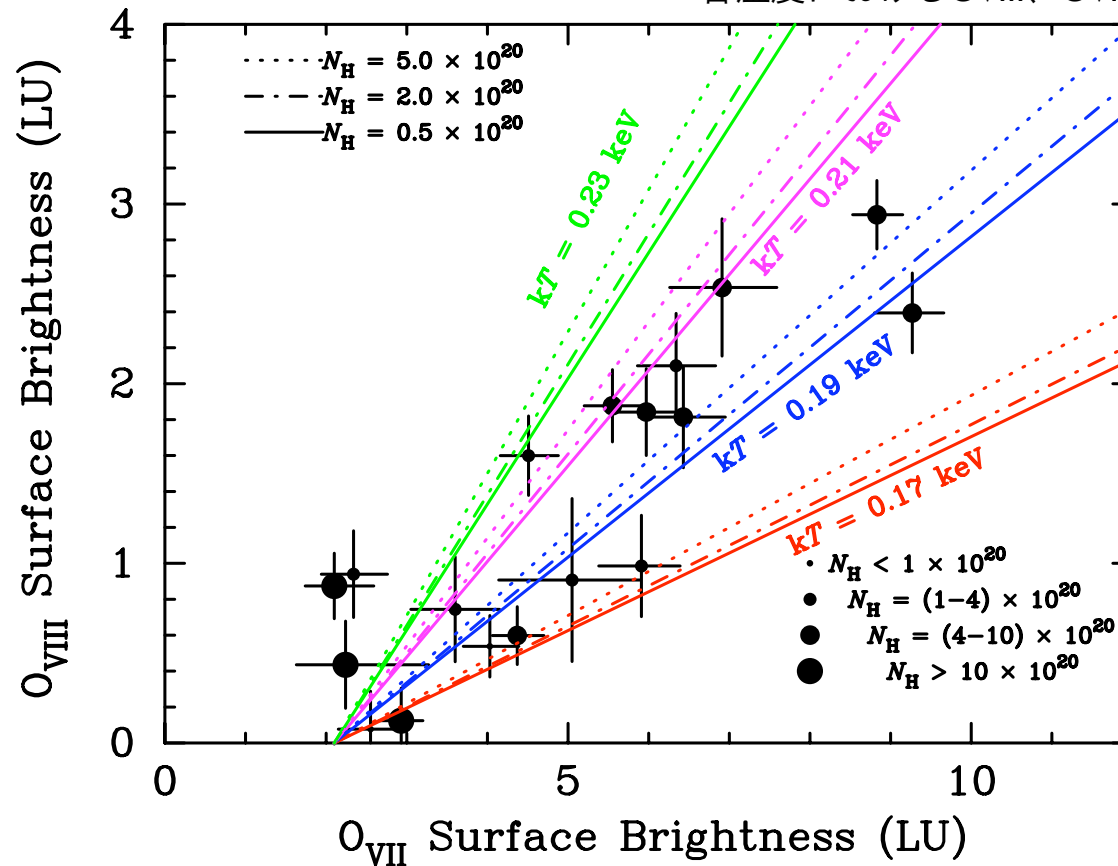
酸素輝線強度の方向依存性は、
SWCX起源ではない。→遠方を
起源とする。

銀河遠方成分の温度

linear 成分を高温ガスと仮定した場合の温度は

$\sim 0.19 \text{ keV} < kT < 0.23 \text{ keV}$ という非常に狭い範囲に分布。

理論直線：衝突電離平衡プラズマの
各温度におけるOVIII、OVII輝線強度



議論

▶ 遠方の高温ガスの起源

高温ガスの基礎物理量

仮定

- ▶ Plane parallel
- ▶ 円柱分布 ($R=10$ kpc, 密度のscale height = 2.8 kpc)
- ▶ 簡単のため温度は一様に0.2 keV

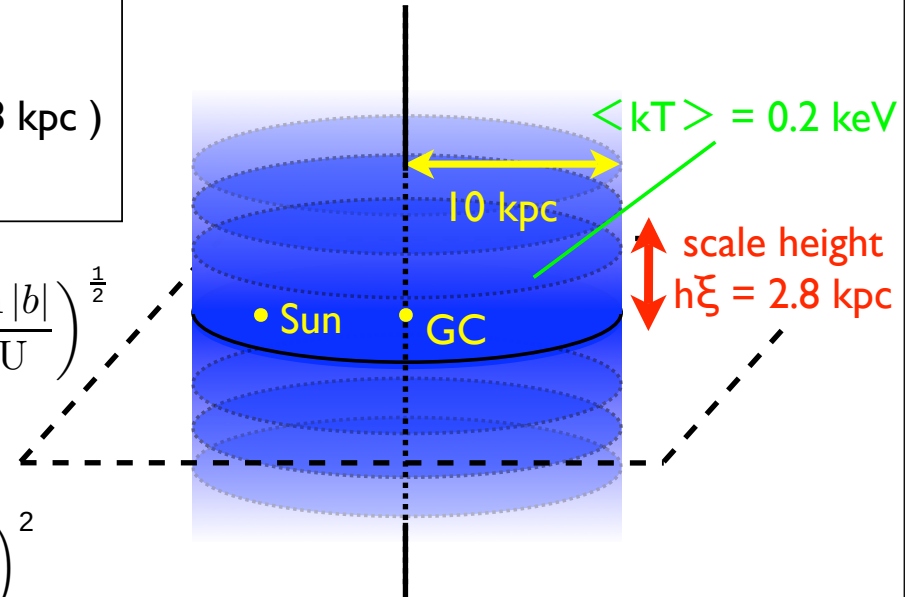
$$n_e = 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3} \left(\frac{h\xi}{1.4 \text{ kpc}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{I_{\text{ion}} \sin |b|}{2.3 \text{ LU}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$L_{\text{total}} = \int n_e n_t \Lambda_{\text{tot}}(T) dV$$

$$= 1 \times 10^{39} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{I_{\text{ion}} \sin |b|}{2.3 \text{ LU}} \right) \left(\frac{R}{10 \text{ kpc}} \right)^2$$

$$\tau_{\text{cool}} = \frac{3 (n_e + n_t) k_B T_e}{2 n_e n_i \Lambda(T)}$$

$$= 5 \times 10^8 \text{ yr} \left(\frac{I_{\text{ion}} \sin |b|}{2.3 \text{ LU}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{h\xi}{1.4 \text{ kpc}} \right)^{\frac{1}{2}}$$



$$\Lambda_{\text{tot}}(T) = 6.3 \times 10^{-23} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^3 \text{ at } kT = 0.2 \text{ keV}$$

n_t : total ion density

n_e : electron density

k_B : Boltzman constant

▶ low starburst activityの系外銀河ハローのluminosity ($10^{38-39} \text{ erg s}^{-1}$)とconsistent。

▶ Time scale ~ 0.5 Gyrでのエネルギー供給が必要

高温ガスの起源

▶ $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ のエネルギーをどう供給するか？

▶ 超新星爆発で期待される加熱率 < 高温ガスのtotal luminosity $10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ 。

→ 加熱源としてOK。

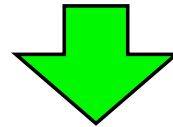
$$3 \times 10^{40} \text{ erg s}^{-1} \left(\frac{U_{\text{SN}}}{10^{51} \text{ erg}} \right) \left(\frac{\text{HE}}{0.1} \right) \left(\frac{\text{SN rate}}{1 \text{ century}^{-1}} \right) \quad \begin{array}{l} \text{HE : heating efficiency} \\ U_{\text{SN}} : \text{SN explosion energy} \end{array}$$

▶ 高温ガスの温度はどういう物理で決まるか？

▶ 系外銀河の $kT \sim 0.1\text{-}0.8 \text{ keV}$ に対して、 $kT \sim 0.2 \text{ keV}$

▶ 銀河系のビリアル温度だと考えられる

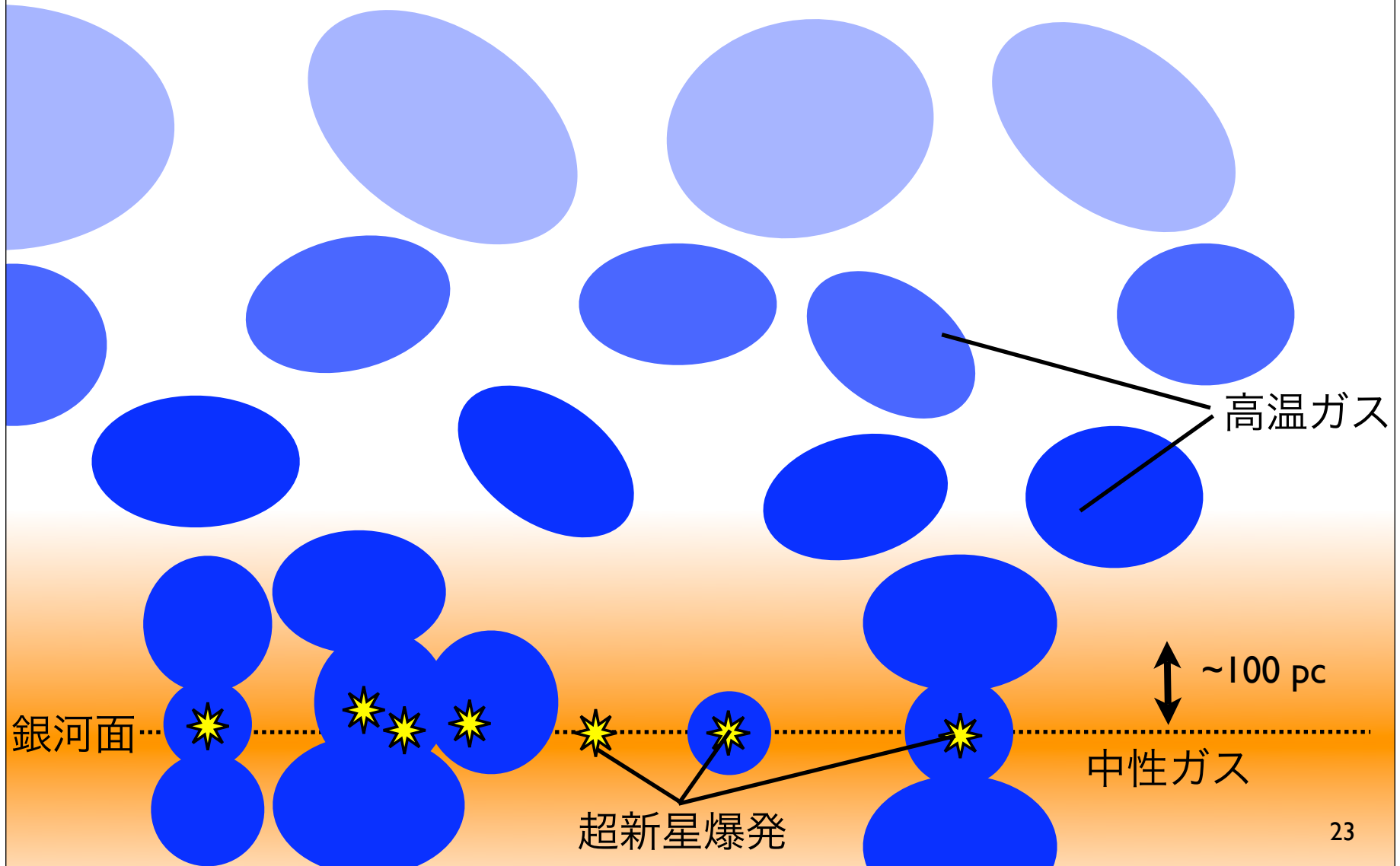
▶ 200 km/s ($\sim$ 銀河回転速度) のビリアル温度 $T_{\text{vir}} = \frac{\mu m_p v^2}{3k_B} = 0.195 \text{ keV}$



遠方成分の高温ガスは超新星爆発で加熱され、ビリアル温度以上のガスは銀河の重力ポテンシャルから逃げていくと考えられる。

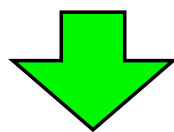
高温ガスの起源

超新星爆発により加熱されたガスが中性ガスを突き抜けハローに出て行く



本博士論文のまとめ

- ▶ 銀河系内のlocalな放射源とは離れた15方向の軟X線背景放射をすざく衛星で観測。
- ▶ Geocoronal SWCXによるOVII輝線放射をよく除去する等、systematic誤差を小さく抑え、OVII, OVIII輝線強度を高精度に決定。
- ▶ OVII、OVIII輝線強度について以下を明らかにした。
 - ▶ OVII 輝線強度にfloor (~ 2 LU)が存在する。
 - ▶ floor以上のOVII とOVIII輝線強度は方向依存性を持ち、強く相関している。
$$\text{OVIII} = 0.5 * (\text{OVII} - \text{floor})。$$



- ▶ 近傍成分からの放射の寄与はOVII ~ 2 LU, OVIII ~ 0 で方向に依らない。
- ▶ OVIIIとfloor以上のOVII輝線は銀河遠方成分(TAE)からの放射と考えられ、その温度は ~ 0.19 - 0.23 keV と非常に狭い範囲に分布している。
- ▶ 銀河遠方成分の加熱源としては、エネルギー的には超新星爆発で矛盾がない。