

TES型X線マイクロカロリメータで挑む電荷交換反応機構の解明

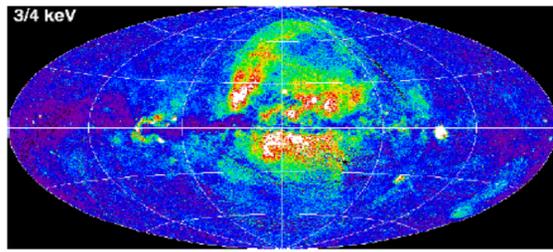
○赤松弘規¹, 阿部祐輝¹, 横田渉¹, 辺見香理¹, 石崎欣尚¹, 江副祐一郎¹, 大橋隆哉¹, 大橋隼人¹, 神田拓真¹, 前野修平¹, 石田卓也¹, 田沼肇¹, 篠崎慶亮², 満田和久³ 1: 首都大, 2: ISAS/JAXA 3: JAXA

X線天文学においては短期間で変動する軟X線放射の存在が、長年の謎になっていた。近年の研究より、この放射は太陽風と星間物質間で発生している電荷交換反応が起源である事が示唆されている。しかし、現存するX線天文衛星では検出器の分光性能の問題より、輝線スペクトルが電荷交換反応起源か同定出来なかった。我々の研究グループでは、宇宙で発生している電荷交換過程の反応機構解明を目指し、高性能分光装置であるTES型X線マイクロカロリメータ(TESカロリメータ)と14.25 GHz ECR多価イオン源と気体標的衝突実験装置を組み合わせた地上実験を計画している。研究の概要とTESカロリメータについて説明し、進捗状況を報告する。

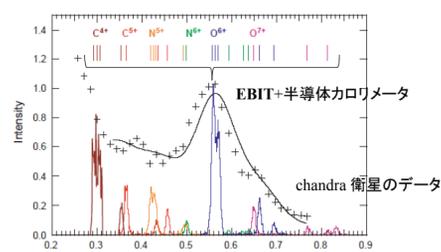
● 研究目標～宇宙で発生している軟X線領域での電荷交換反応機構解明～

宇宙で起きていると考えられる7価の酸素イオンO⁷⁺と水素原子Hの電荷交換による輝線放射を、高分光性能X線検出器TESカロリメータで分光観測し、輝線の微細構造を明らかにすることを旨とする

● 研究背景 ～宇宙に広がる軟X線放射～

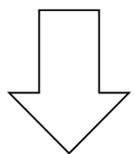


「ROSAT」衛星による軟X線全天マップ[1]



「Chandra」衛星が観測した彗星のX線スペクトル[2] X線を放射する機構は、電荷交換反応だと考えられている

1990年代に明らかになった軟X線放射の謎の時間変動



- 太陽風フラックスとの相関
- 彗星からのX線放射の発見 (電荷交換反応)
- 地球近傍での電荷交換反応の発見[3]

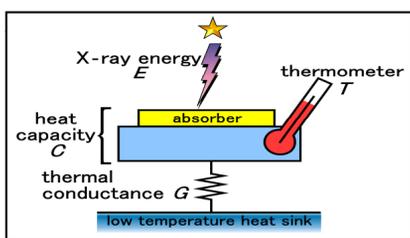
太陽風と星間物質による電荷交換反応起源の可能性

X線天文衛星搭載検出器では、電荷交換反応からの輝線の同定困難

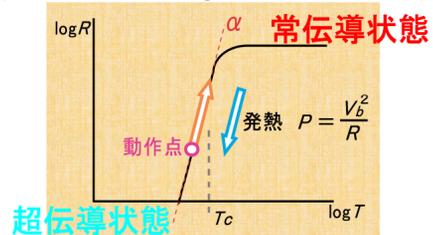
宇宙空間における電荷交換反応からの輝線を同定する為には、より高分光性能を持つX線検出器による観測が必須

● 研究手段 ～TES型X線マイクロカロリメータ～

X線マイクロカロリメータ



超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor: TES)



超伝導状態

エネルギー分解能

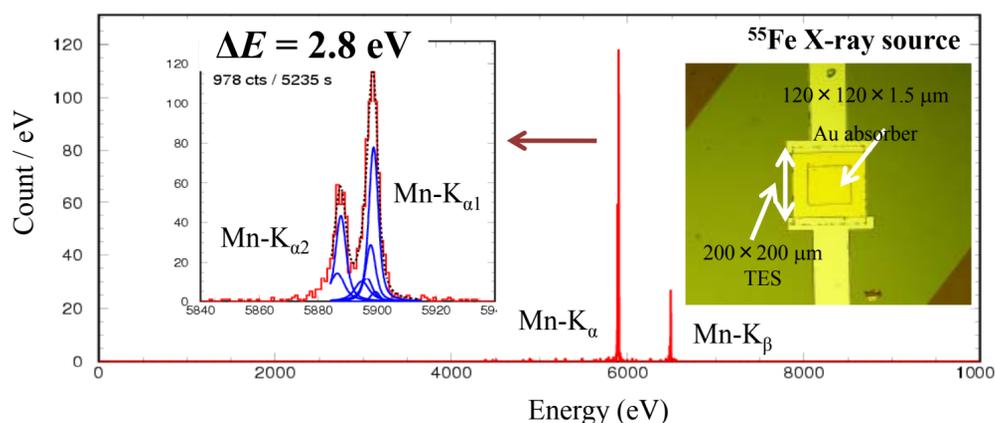
$$\Delta E_{FWHM} = 2\sqrt{2\ln 2} \cdot \sqrt{kT^2 C / \alpha_{eff}}$$

TESの感度

$$\alpha = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln T} \quad \beta = \frac{\partial \ln R}{\partial \ln I} \quad \alpha_{eff} = \alpha / (1 + \beta)$$

- 極低温 (~ 50 mK) で動作し、X線光子を微小な温度変化として検知
- 温度変化をTESで読み出すことで、CCDの100倍近い性能を実現
- グループ内で量子効率 80% @ 6keV, $\Delta E = 2.8$ eV @ 5.9 keV を達成[4]

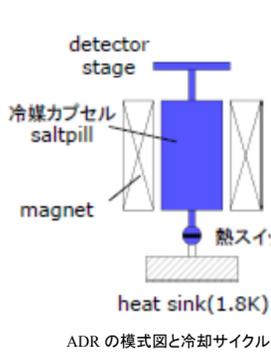
TESカロリメータであれば電荷交換反応からの輝線の同定が可能



● 研究計画 + 進捗状況

本計画では、可動式冷却装置を開発し、研究室環境外でもTESカロリメータの性能を発揮できる冷却システムを構築する。同時に、半導体検出器(SSD)を用いて、予備実験を行い、実際の電荷交換反応からの輝線強度の確認を行う。分光システムの完成後、TESカロリメータを重イオン衝突装置に組み込み、7価の酸素イオンO⁷⁺と水素原子Hの電荷交換による輝線放射をTESカロリメータで分光観測する。各開発項目の進捗状況について述べる。

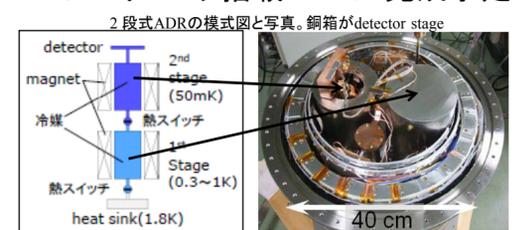
□ 断熱消磁冷凍機(Adiabatic Demagnetization Refrigerator)の開発



磁気冷凍 - 磁場で電子のスピンを制御し冷却
2段式にする事で、極低温での保持時間延長[5]
⇒ TESカロリメータの駆動時間延長
2009年度中にTESカロリメータ搭載ADRが完成予定

冷却サイクル

- ① B = 0, T_{pill} < T_{sink}
- ② マグネット で磁場印加
- ③ 熱スイッチ OFF
- ④ 極低温到達後、磁場を少しずつ下げて温度制御

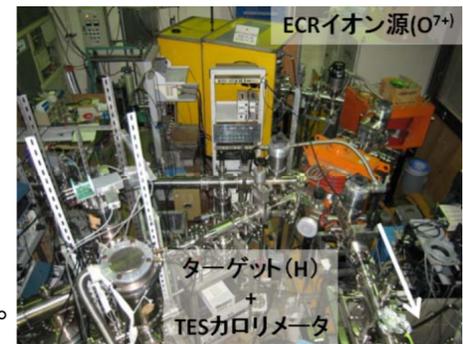


□ 多価イオン衝突実験装置と半導体検出器による予備実験

14.25 GHz ECR多価イオン源と気体標的衝突装置を用いて、電荷交換反応を実現する [6,7]。

電荷交換反応からの放射強度を確認する為に、半導体検出器を用いて予備実験を行う。得た結果をもとに、冷凍機の入射窓の設計、輝線分岐を議論するのに必要なデータの精度を見積もる。

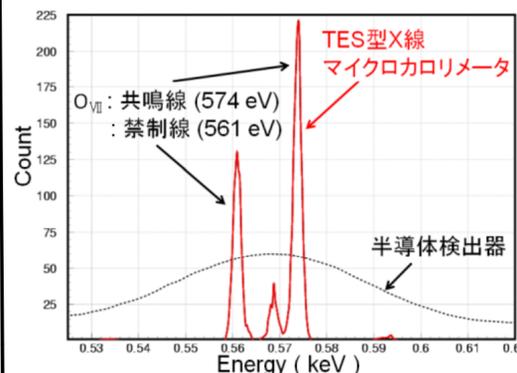
現在、電荷交換反応のターゲットとなる水素ビーム標的、軟X線領域 (< 1 keV) を観測可能な半導体検出器の導入準備を進めている。どちらも2009年度中に導入完了予定。



14.25 GHz ECR ECR多価イオン源全景。この装置にTESカロリメータを組み込む。

□ ECR多価イオン源と気体標的衝突装置とTESカロリメータによる測定

衝突実験装置にTESカロリメータを組み込み、宇宙空間で起きていると考えられる7価の酸素イオンO⁷⁺と水素原子Hの電荷交換による輝線放射を分光観測する。



7価の酸素イオンO⁷⁺と水素原子Hの電荷交換による輝線放射をTESカロリメータとCCDで観測した際に、予想されるエネルギースペクトル。TESカロリメータでは、輝線の微細構造をはっきりと分離出来ている事が分かる。実際の測定では、禁制線は観測されない。(TES 2 eV, CCD 60 eV を仮定した。)

2010年度夏測定予定

● 参考文献

- [1] Snowden et al., 1998, Apj, 610, 1182
- [2] P. Beiersdorfer et al., 2003, Science 300, 1558
- [3] R. Fujimoto et al., 2007, PASJ, 59, S133
- [4] Akamatsu et al., 2009, JLTP, in press
- [5] Shinozaki et al., 2009, SPIE, in press
- [6] 大橋 修士論文 2007, 首都大学東京
- [7] 須田 修士論文 2009, 首都大学東京