

『天文・核融合連携準備研究会(第1回)』

令和3年3月31日

核融合・天体プラズマ分光モデルの 多価イオン原子過程の研究

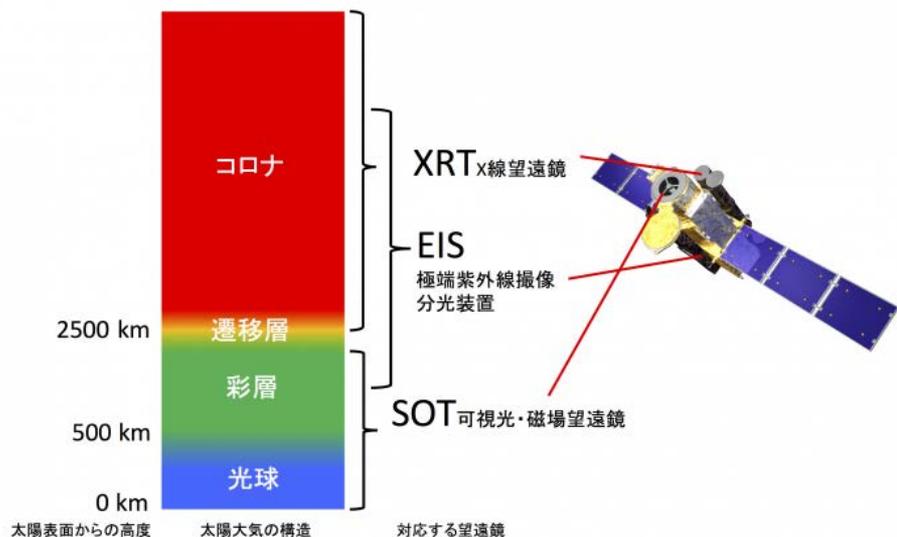
加藤太治、加藤隆子*、村上 泉、坂上裕之、川手朋子 (核融合研)

渡邊鉄哉*、原 弘久 (国立天文台)

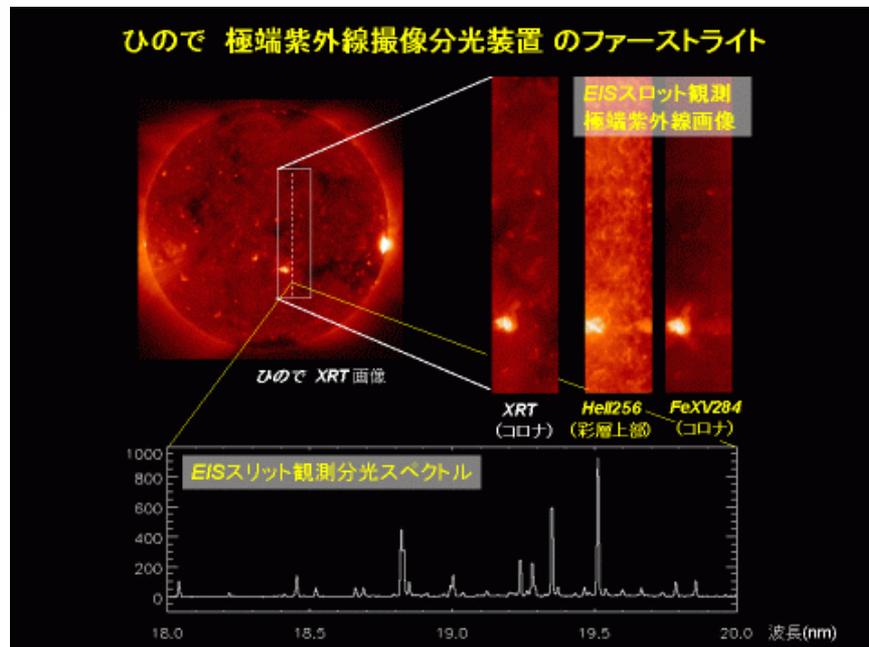
中村信行 (電気通信大)、山本則正 (中部大)、今田晋亮 (名大)

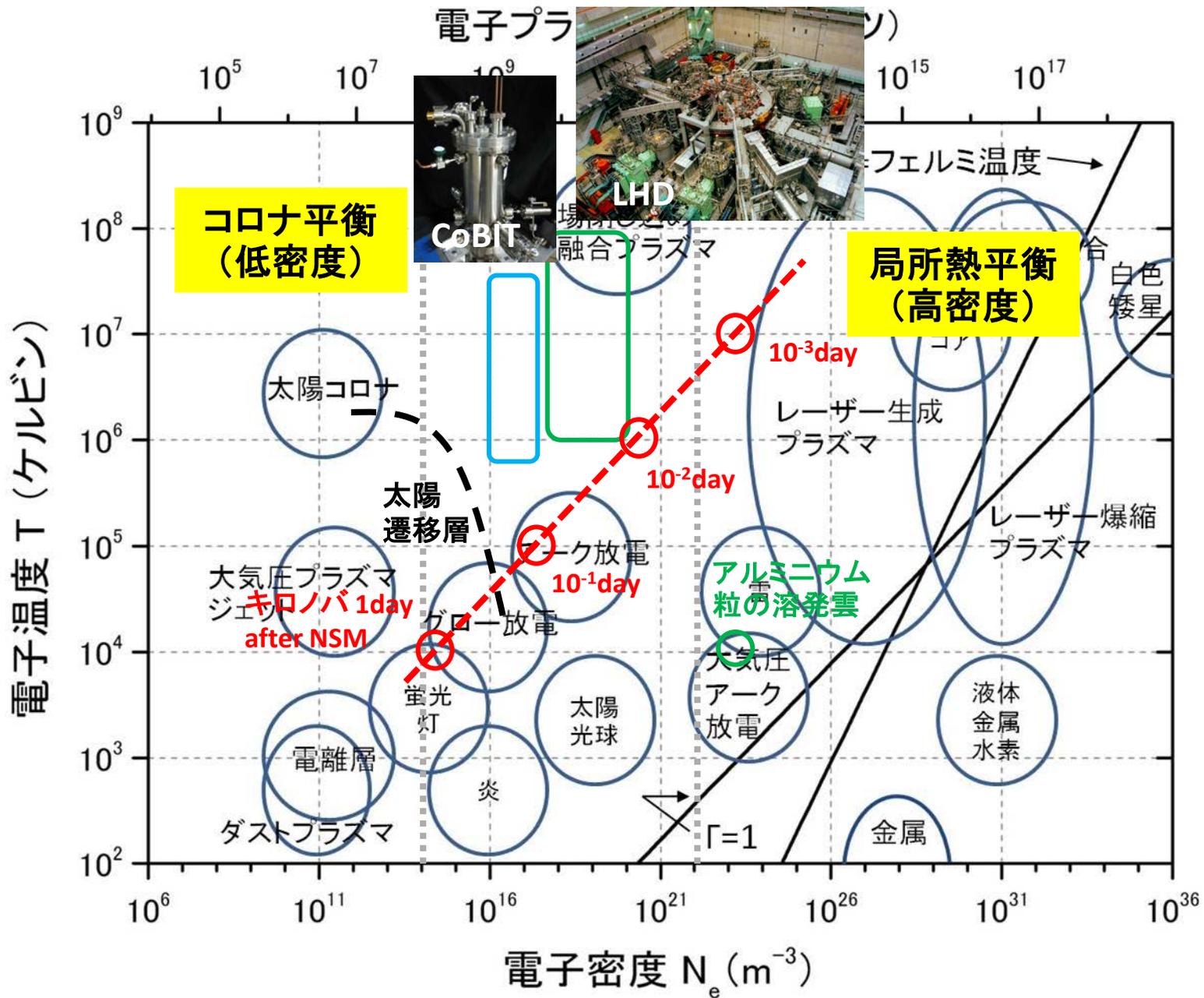
ひので太陽観測衛星

2006年9月23日打ち上げ



ひので太陽観測衛星には、可視光・磁場望遠鏡 (SOT), X線望遠鏡 (XRT), **極端紫外線撮像分光装置 (EIS)** が搭載され、太陽コロナの加熱機構とダイナミクスを解き明かすために太陽磁場構造や高温領域を観測しています。



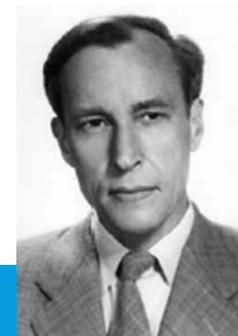


非平衡プラズマ分光モデルの研究

- 局所熱平衡が成り立たない
→プラズマ粒子の励起状態や速度分布がボルツマン分布で表せない
- コロナ平衡が成り立たない
→励起状態間の複雑な遷移ネットワークを取り扱わなければならない
- さらに、温度・密度の時間変動や強い流れがあると、イオン密度比の電離(サハ)平衡も成り立たない
- このような高温プラズマの物理状態を、その中の多価イオンの発光線スペクトルから読み解くには、多価イオンの非平衡プラズマ分光モデルの構築が必要！

多価イオンとは？ HIGHLY CHARGED IONS

Bengt Edlen



実験室で存在が認識されたのは1930年代（真空スパーク放電の軟X線分光スペクトル、Edlen@Siegbahn研究所 ウプサラ）

プラズマの例 太陽コロナ



多価イオン原子過程自体おもしろい 研究対象！

- 大きな電子捕獲断面積(静電的ブラックホール)
→ *e.g.* 太陽風による百武彗星からのX線放射(1996)
- 高 Z 多価イオンのエネルギー準位の逆転と擬交差(Nakamura et al., PRA 2000)
- Breit相互作用による2電子性再結合での偏光特性の変化(Hu, Nakamura et al., PRL 2012, Nakamura et al., PRL 2008)
- Fe XVIIの2p-3d振動子強度異常(Bernitt et al., Nature 2012)
- W XXVIIIでの高次禁制線の観測(Sakaue et al., PRA 2019)
- 多価イオン冷却、禁制遷移の超高精度分光
→ 統一場理論: 微細構造定数 α の経時変化(Berengut et al., PRL 2010, Kozlov et al., Rev. Mod. Phys. 2018)

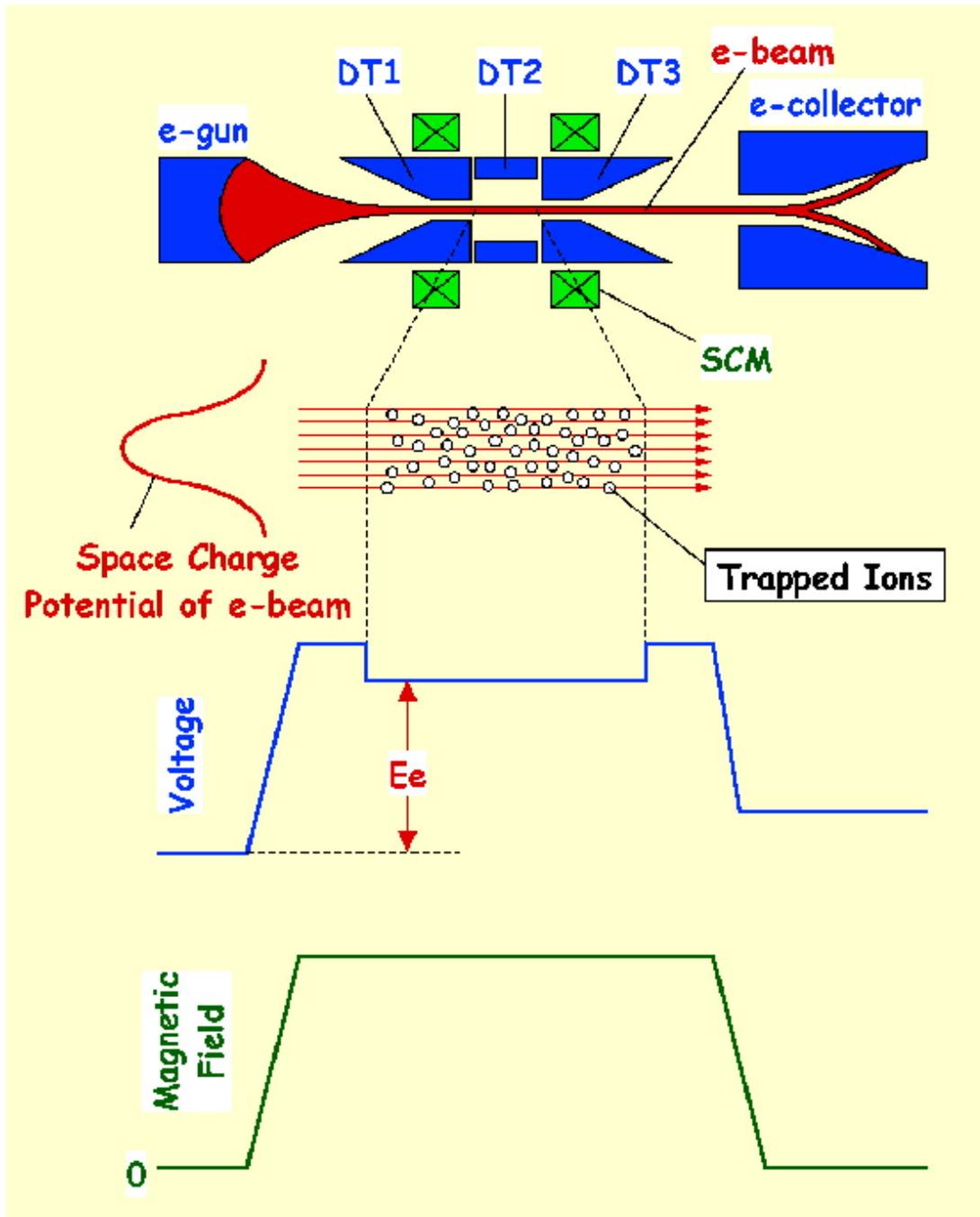
電子ビーム イオントラップ (EBIT)

ペニング型イオントラップ+ 高エネルギー電子ビーム

DT電極に印加した軸方向の井戸型
電位と電子ビームの空間電荷によ
りイオンをトラップ

超伝導磁石の高磁場により圧縮さ
れた電子ビームによる逐次電離で
多価イオンを生成

多価イオンからの放射をイオント
ラップ側面に設けた観測窓から発
光分光計測することが可能



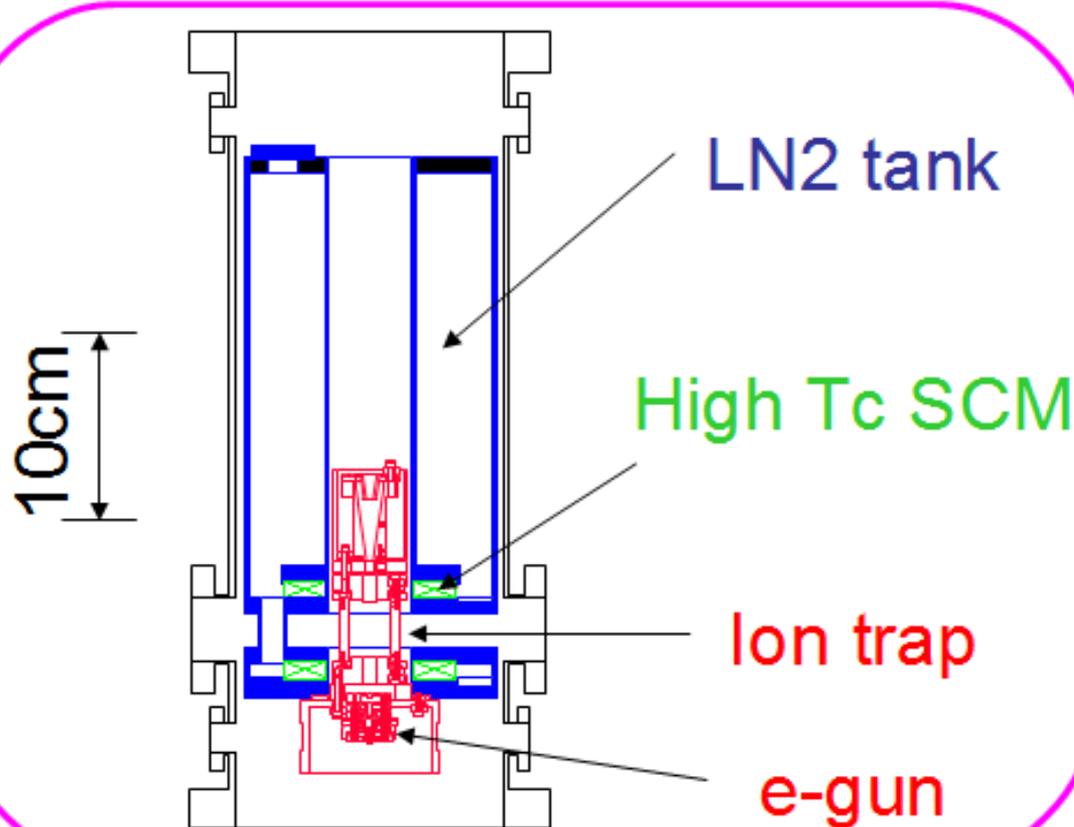
EBITによる分光計測

- 指向性の良い単色電子ビームによる励起・電離
 - プラズマ分光計測との違い -
 - 狭い価数分布
 - 過去に観測例の無い発光線の探索、同定
 - 電子エネルギー依存性や共鳴過程の観測が可能
 - 非等方性、偏光計測
 - 電子エネルギー、電流、密度を任意に設定可能
 - 良く定義されたプラズマ
 - プラズマ分光モデルに対して良質なベンチマークを提供
 - 線状光源 → スリットレス分光器の使用による高効率測定

CoBIT (compact EBIT)開発の経緯

天文台・核融合研・電通大共同研究

- 2006年7月20日 天文台での打ち合わせ
 - EIS観測に関連する鉄多価イオン分光計測のための
低エネルギーEBITとそれに特化した**EUV分光器**の必要性



特性

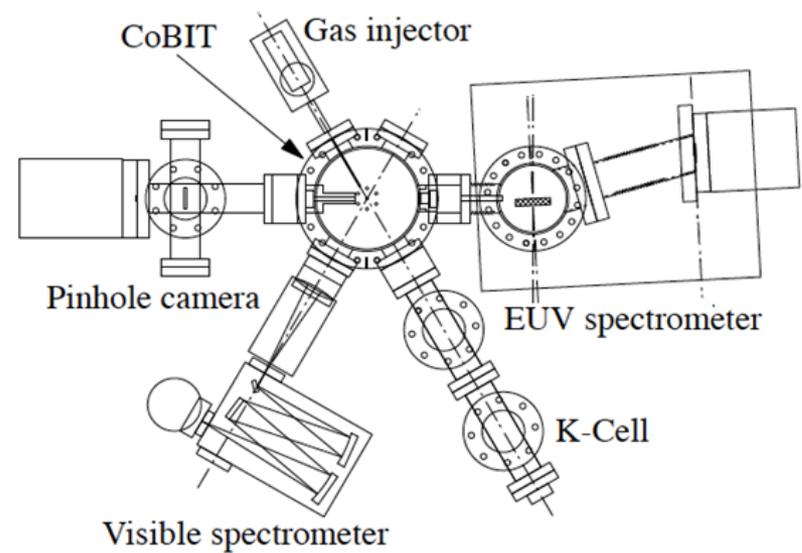
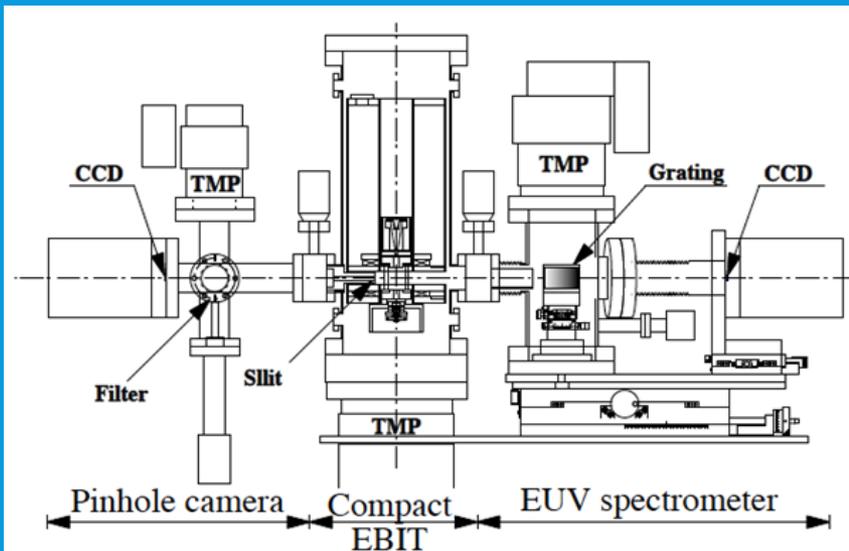
	CoBIT	Tokyo-EBIT
Ee (keV)	0.1-2	10-200
Ie (mA)	0-20	0-300
B (T)	0-0.2	0-4.5
Coolant	LN2	LHe

設計: 中村信行 (電通大)

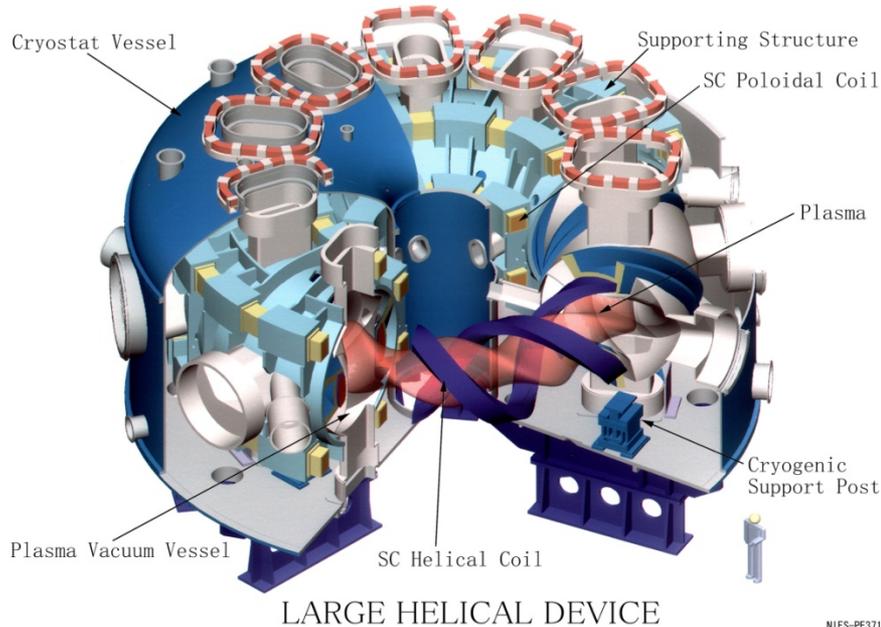


国立大学法人
電気通信大学
Unique & Exciting Campus

CoBIT (compact EBIT)

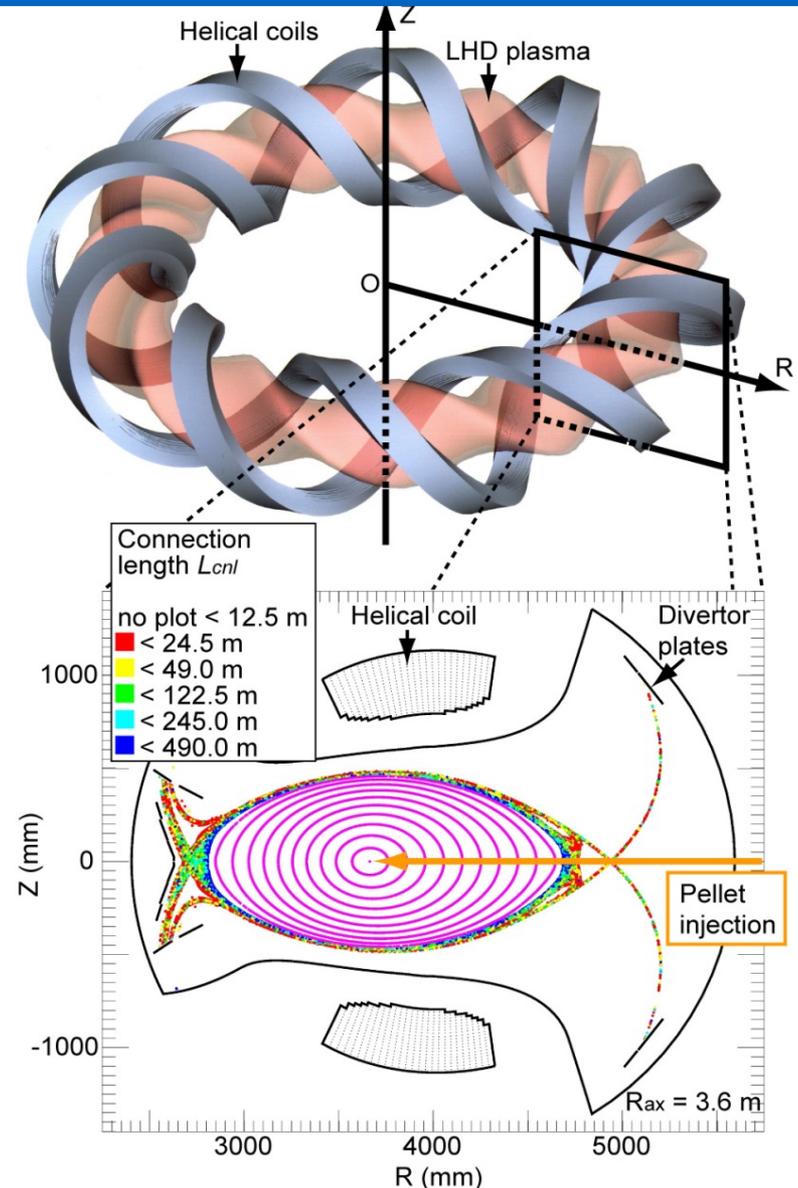


LHDを用いた原子データと原子分光モデルの評価



NIFS-PE371

- LHDは、不純物をペレットで入射してもプラズマを安定に保つことができる。
- 電子温度と電子密度は独立に計測することができる。
- 太陽遷移層と同じ電子温度のプラズマを作って計測することができる。



鉄イオンの非平衡プラズマ分光モデル

< 衝突輻射モデル >

- 非平衡プラズマ中の多価イオンの励起状態ポピュレーション密度の速度論モデル
- 励起状態のポピュレーション密度 $n(p)$ は準定常近似を仮定してレート方程式を解いて求める。(再結合過程はここでは無視する)

$$\frac{dn(p)}{dt} = \Gamma_{in} - \Gamma_{out} = 0$$

$$\Gamma_{in} = \sum_{q < p} \{C(q, p)n_e n(q) + C^P(q, p)n_p n(q)\} + \sum_{q > p} \{F(q, p)n_e + F^P(q, p)n_p + A(q, p)\}n(q)$$

電子衝突励起

陽子衝突励起

脱励起

放射遷移

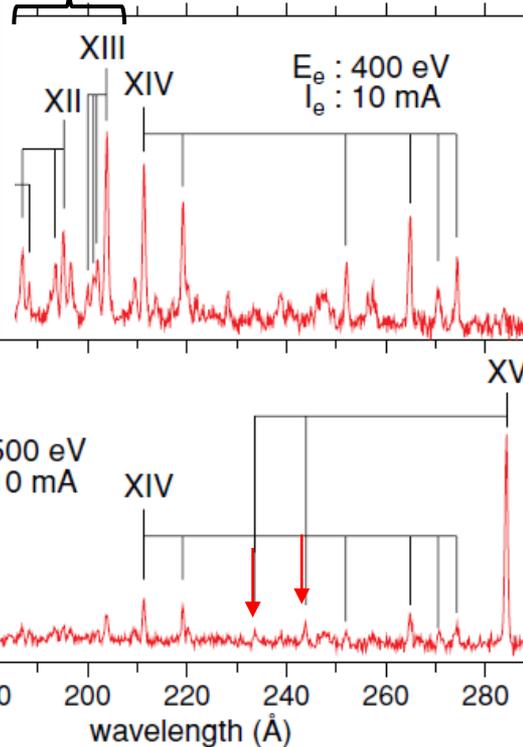
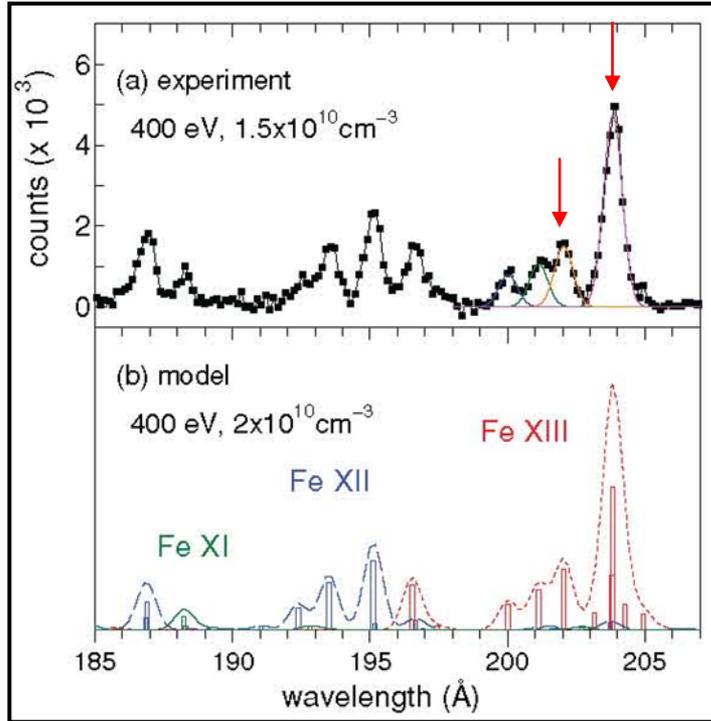
$$\Gamma_{out} = [S(p)n_e + \sum_{q > p} \{C(p, q)n_e + C^P(p, q)n_p\} + \sum_{q < p} \{F(p, q)n_e + F^P(p, q)n_p\} + A(p, q)]n(p)$$

電子衝突電離

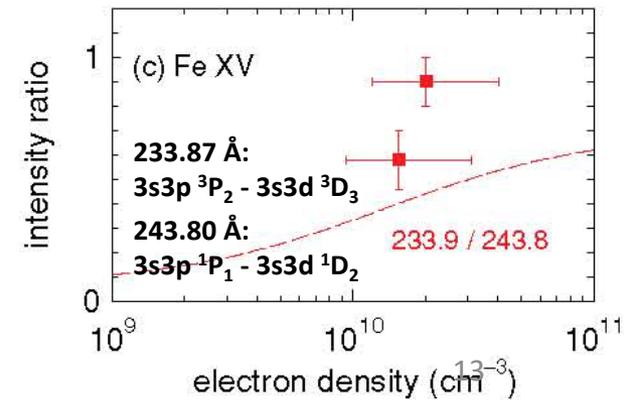
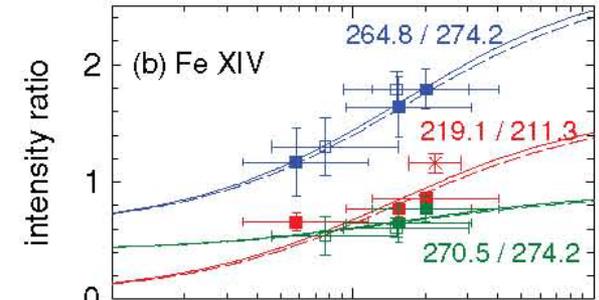
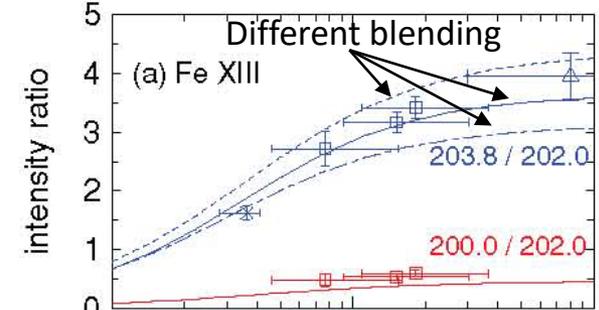
CoBITを使ったFe XIII – XV の分光モデルの評価

N. Nakamura et al. ApJ 739, 17 (2011)

E. Shimizu et al. J. Phys. Conf. Ser. 635, 052061 (2015)



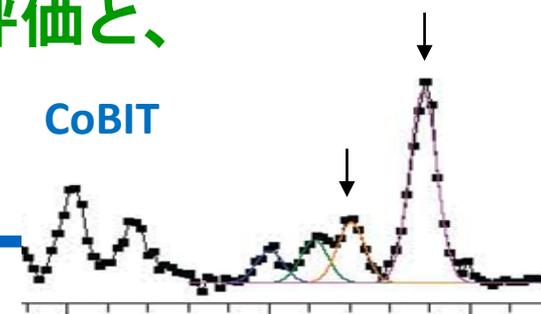
400 eV: open (exp) / solid line (model)
500 eV: filled (exp) / long dashed line (model)



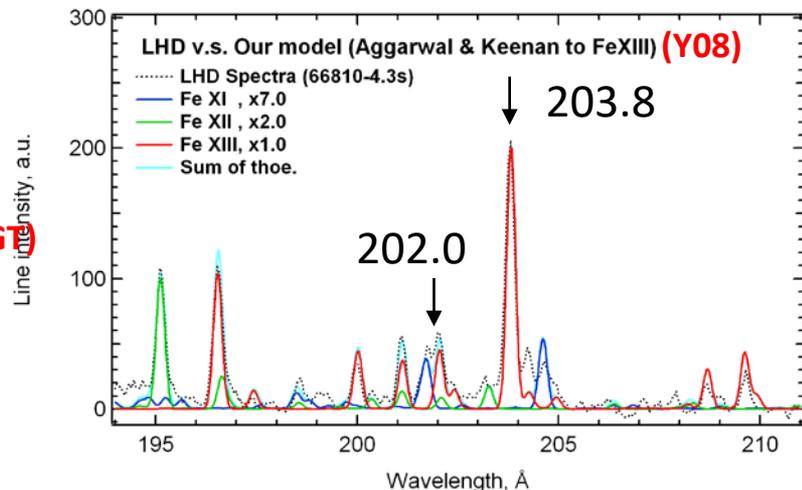
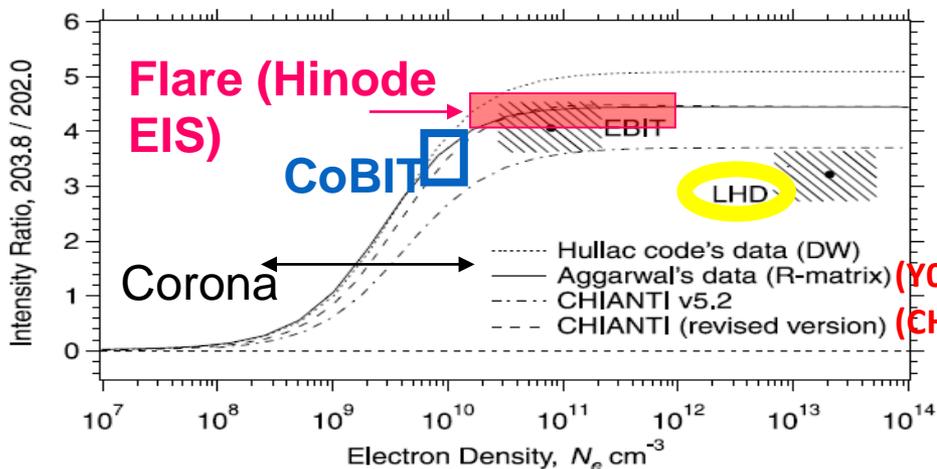
LHDとCoBITを使った原子分光モデルの評価と、EISスペクトル解析への応用

N. Yamamoto et al. Ap. J. 689, 646 (2008),

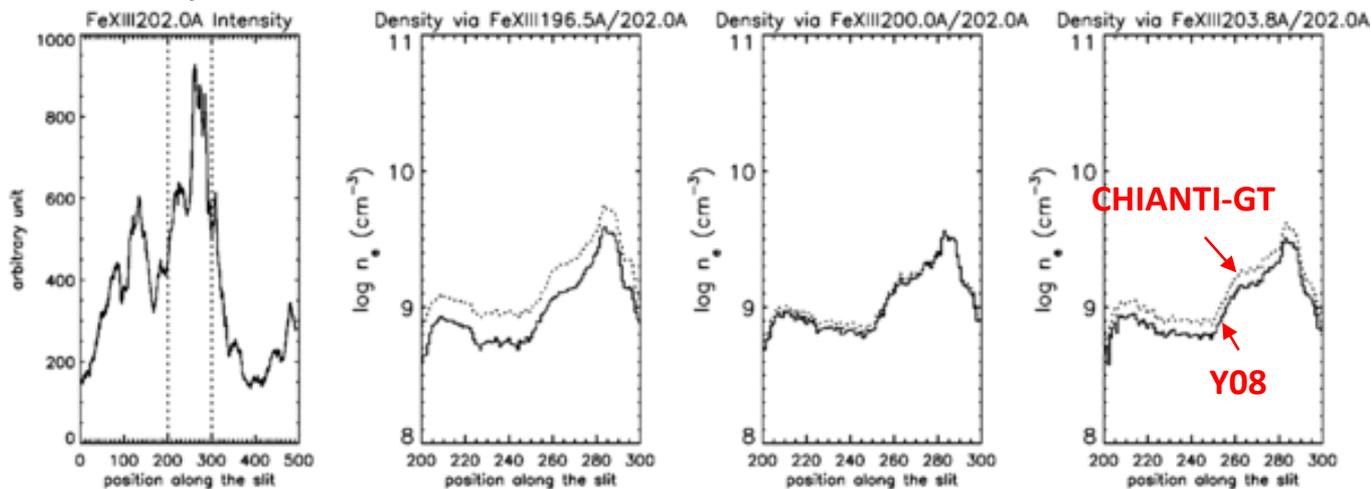
T. Watanabe et al. Ap. J. 692, 1294 (2009)



EUV spectrum of LHD



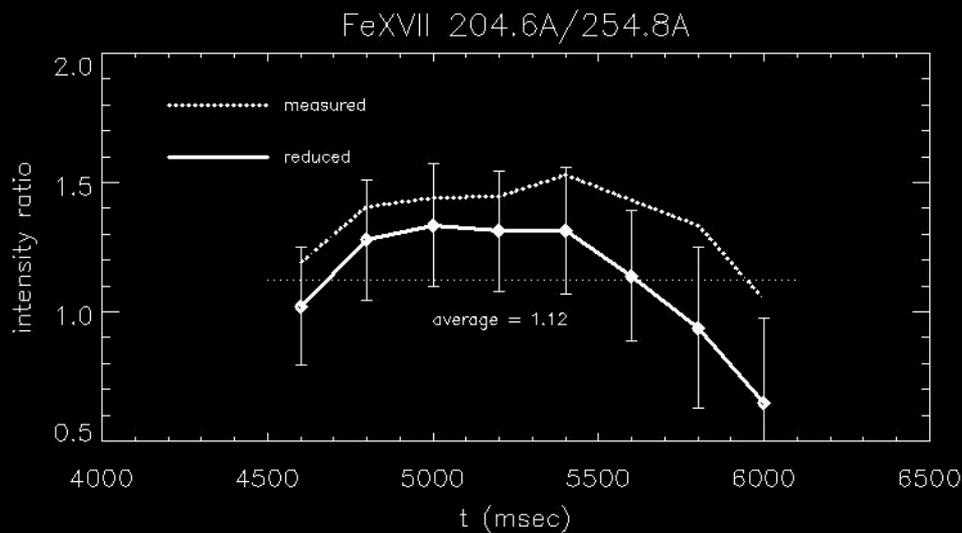
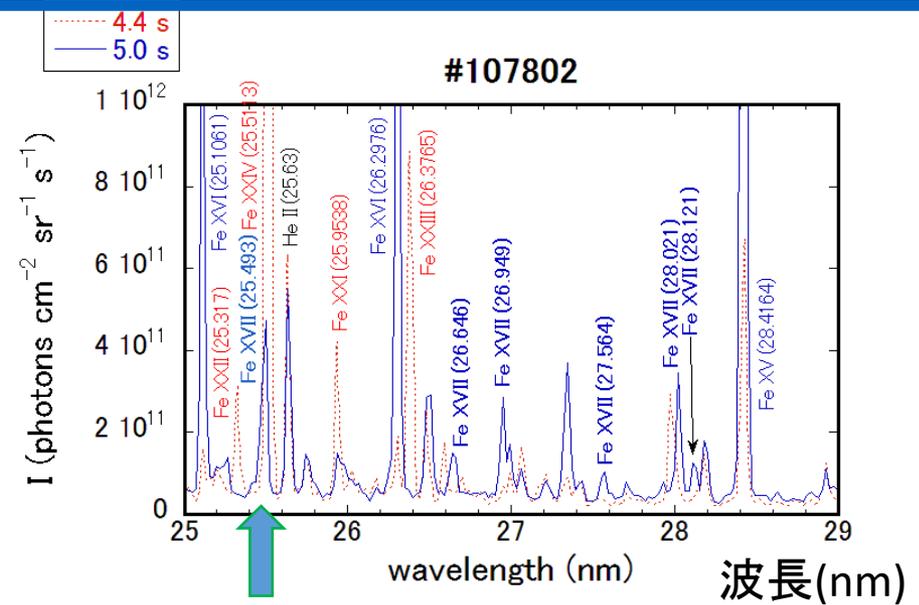
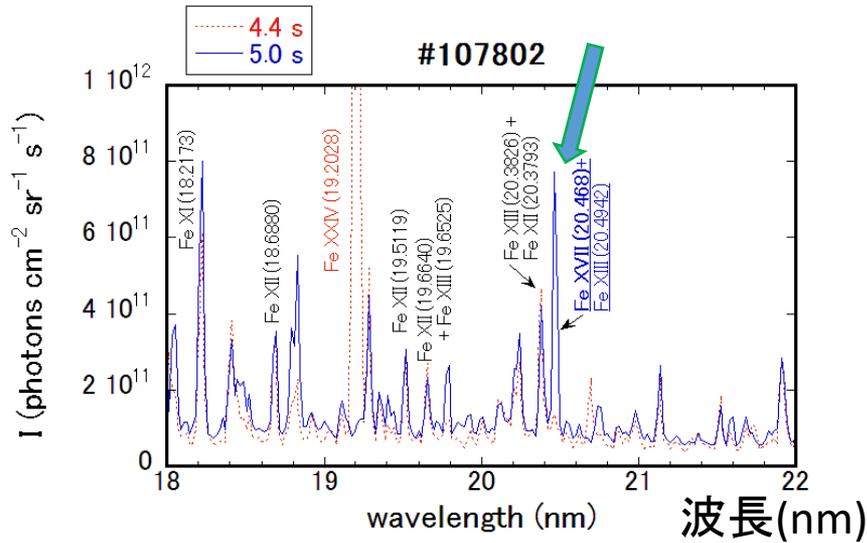
Electron density distribution of the sun



LHDでのFe XVII 204.68 Å / 254.93 Å 強度比の実験的検証

Murakami et al., Plasma Fusion Res. 9 (2014) 1401056.

Watanabe et al., ApJ 842 (2017) 12.



Fe XVII 204.68に対するFe XIIIの204.3と204.9のブレンドの寄与を差し引くと、Fe XVIIの204/254発光線強度比は1.12、理論予想値1.1とほぼ一致

まとめと今後の展望

- このプロジェクトは機構内分野間連携のさきがけとして始まり、太陽遷移層プラズマ診断のための鉄多価イオン分光モデルの構築とLHD実験による検証が行われた。
- 中～低価数イオンの多価イオン分光計測に特化した高温超電導磁石を用いたEBIT装置 (CoBIT) が世界に先駆けて製作され、その有用性も示された。
- **今後の展望**
 - **Solar-C EUVST計画との連携 (原@NAOJ)**
 - **中性子星合体によるキロノバ観測との連携 (田中@東北大)**
 - **X線分光撮像衛星XRISMとの連携 (山口@JAXA)**