

シンポジウム

「大型ヘリカル装置LHDプロジェクトが切り開いたプラズマ物理の地平」

原子分子データベース

東北大院工 大石鉄太郎

資料作成協力：核融合研 村上泉，加藤太治，鈴木千尋

本講演での「原子分子データ」

- 原子・分子・イオンの衝突輻射過程を記述する基礎データ
- エネルギー準位／波長・遷移確率／励起・電離・再結合／分光スペクトル

謝辞： JSPS科研費(JP24K00607, JP23H00127)及び核融合科学研究所一般共同研究(NIFS23KIPP031)の支援を受けた。

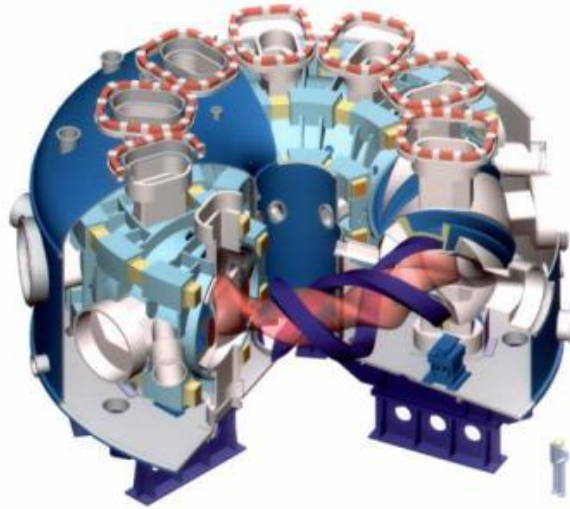
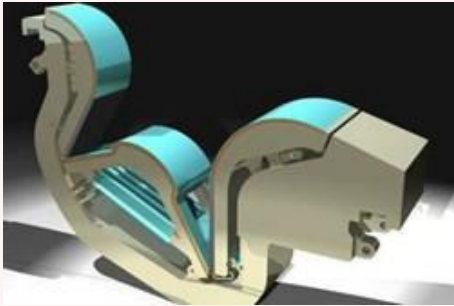


LHDにおける原子分子データベース研究と関連分野

LHD原子分子データベース研究を「研究目的」ごとに整理する

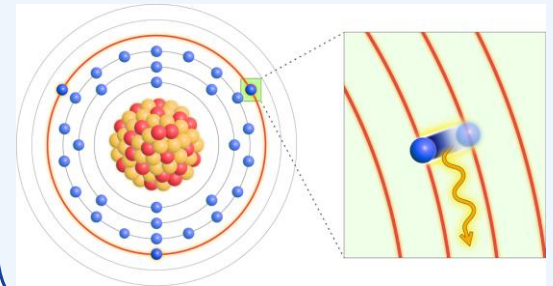
核融合プラズマ

診断・輸送・壁相互作用



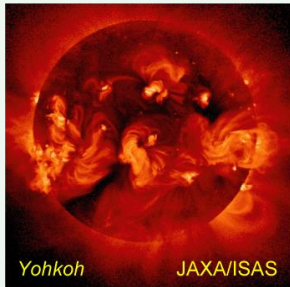
多価イオン原子物理

準位構造・遷移・価数同定



天体プラズマ

太陽・超新星残骸・
キロノバ



原子分子データ研究に適した
幅広いパラメータ領域

- 電子密度: $10^{18} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 電子温度: $< 5 \text{ keV}$
- 放電時間: 秒～分
- 導入元素: 水素～重元素,
中性粒子～高価数
- 分光計測: X線～可視

産業応用

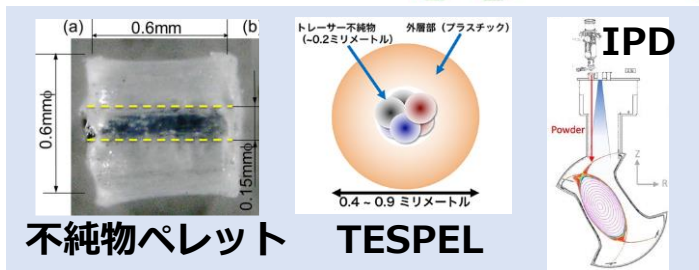
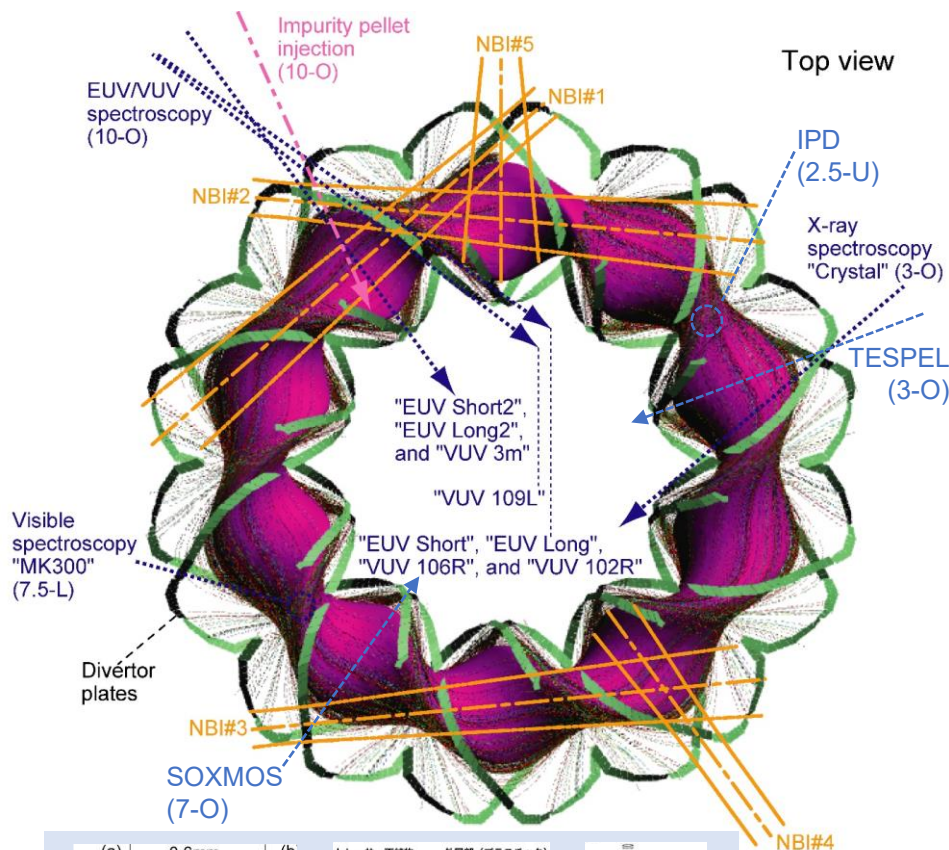
EUV光源・計測・材料



原子分子データが核融合・天体・原子物理・産業応用を横断的につなぐ

分光計測・不純物導入技術

水素からランタノイドまで，X線から可視光まで



Name	Type	[Crystal or] Grating (g/mm)	λ Range (Å)	$d\lambda/dx$ (Å/mm)
X-ray Crystal	Johann	[Quartz 2020/2023/3140/2243]	3.7 – 4.0 (for Quartz 2020)	1.6×10^{-3} – 1.1×10^{-3} (for Quartz 2020)
EUV Short/Short2*	Grazing incidence	2400 holographic	10 – 130	1.2 – 4.3
EUV Long/Long2*		1200 holographic	50 – 500	4.0 – 11.0
SOXMOS	Grazing incidence	133.6/600	10 – 1500	1.2 (600 g/mm)
3 m VUV*	Normal incidence	1200 ruled	300 – 3200	2.8
20 cm VUV 109L	Normal incidence	1200 holographic	300 – 1050	32.7
20 cm VUV 106R			970 – 1870	33.8
20 cm VUV 102R			1510 – 2400	33.8
Visible MK300*	Czerny–Turner	120/300/1200 holographic	2000 – 9000	25.8 (1200 g/mm)
50 cm Visible*	Czerny–Turner	100/1800 holographic	3000 – 8000	200 (100 g/mm)
1.33 m Visible*	Czerny–Turner	1800 holographic	1850 – 8600	4.1

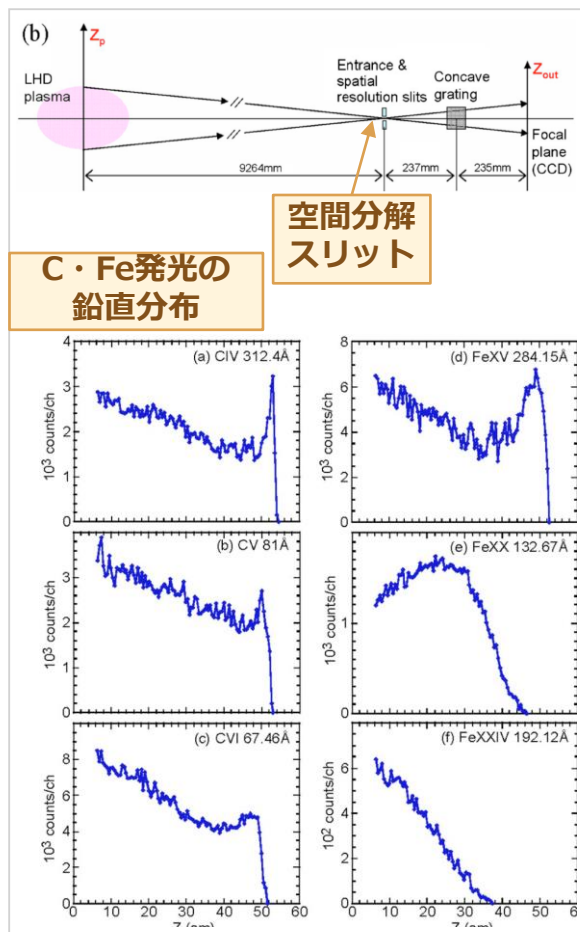
*空間分解分光：発光強度の径方向分布を計測可能

多様な元素の発光スペクトルを，広範な波長領域にわたって観測可能

LHD実験を通じた先進分光計測の発展

空間分解能・高波長分解能・偏光分離により、測れる物理量が拡張された

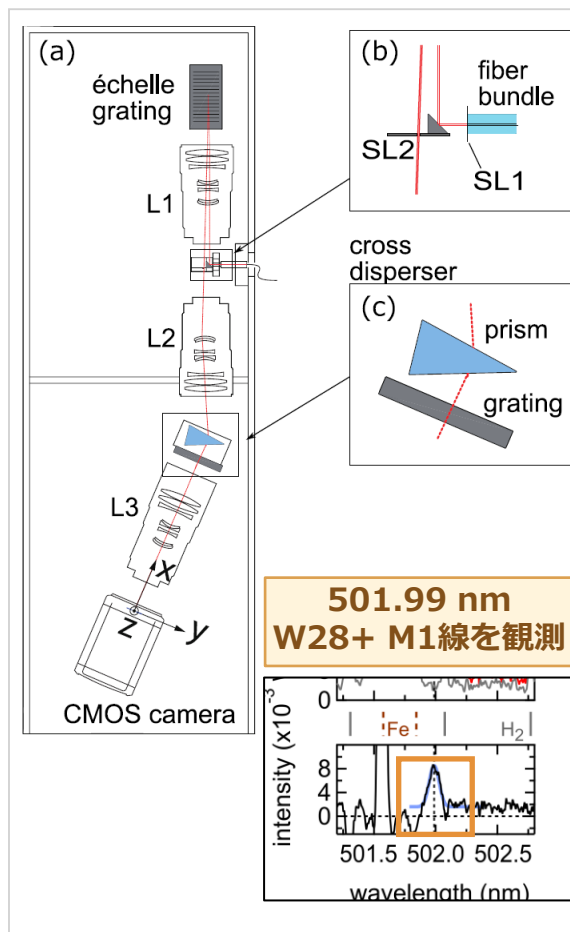
空間分解EUV分光



不純物空間分布をEUVで計測

Dong et al., Rev. Sci. Instrum. 81, 033107 (2010), Figs. 3 and 16

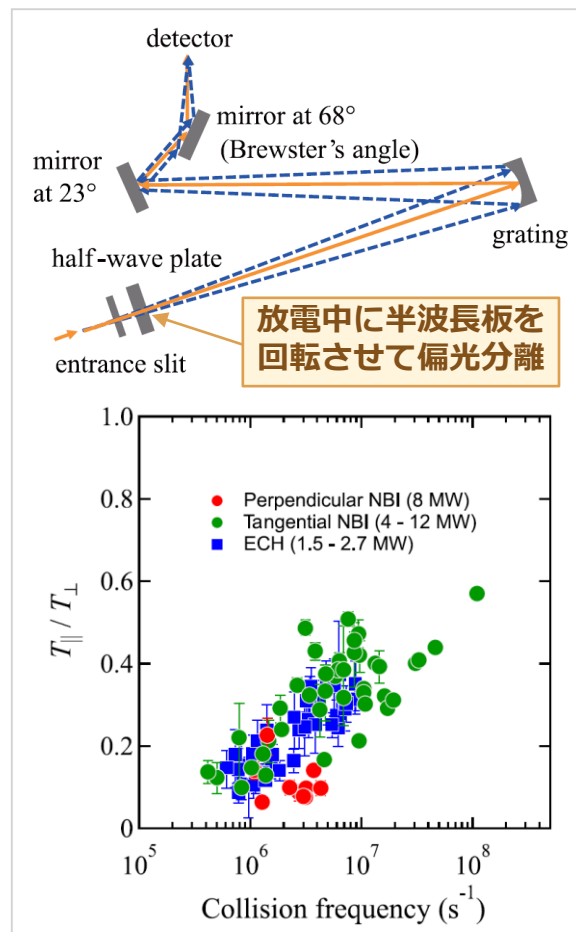
可視エシェル分光



W発光線を高波長分解能で検出

Shinohara et al., Phys. Scr. 90, 125402 (2015), Figs. 6 and 4

VUV偏光分光



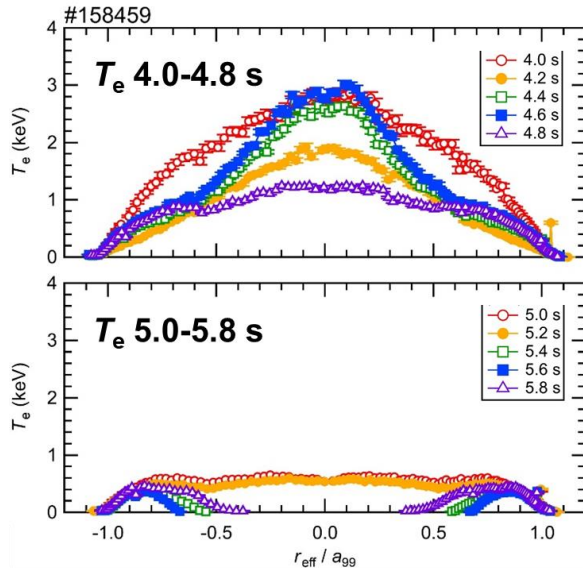
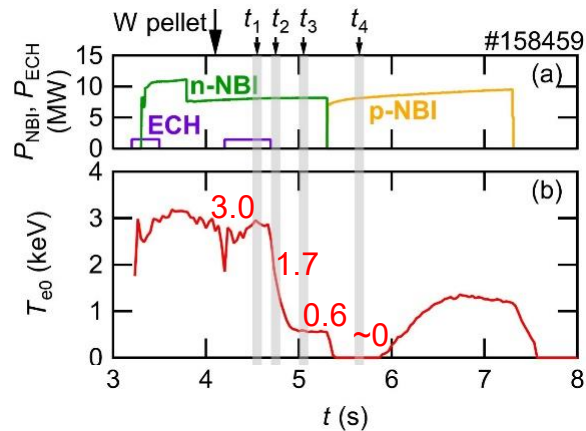
Lyman- α 偏光から温度非等方性へ

Goto et al., Plasma Fusion Res. 16, 2402029 (2021), Figs. 5 and 8

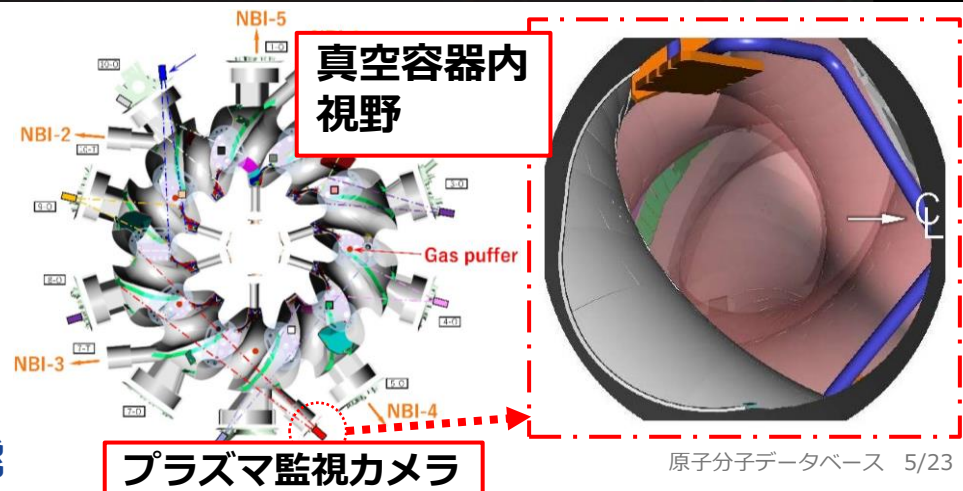
LHDは、分光器開発とプラズマ物理解釈を同時に進める実証場として機能してきた

LHDは広い価数範囲を生み出す分光プラットフォーム

電子密度 $10^{18} - 10^{20} \text{ m}^{-3}$, 電子温度はゼロ近傍から数keVまで



- 放電中の加熱切替で「温度ホール」形成
 - 一つの放電で広い温度領域
- = 入射元素の広い価数範囲を取得可能

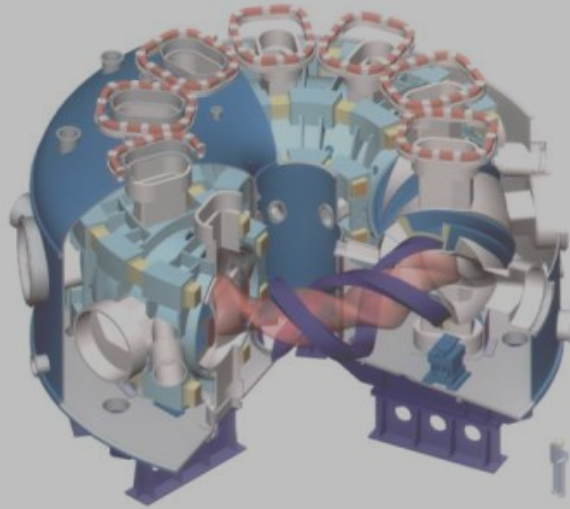
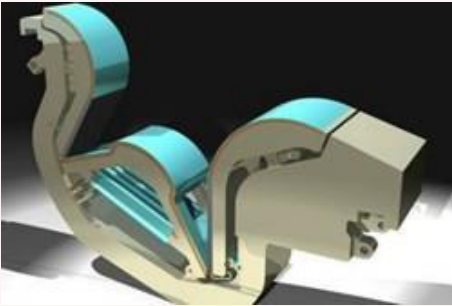


LHDにおける原子分子データベース研究と関連分野

LHD原子分子データベース研究を「研究目的」ごとに整理する

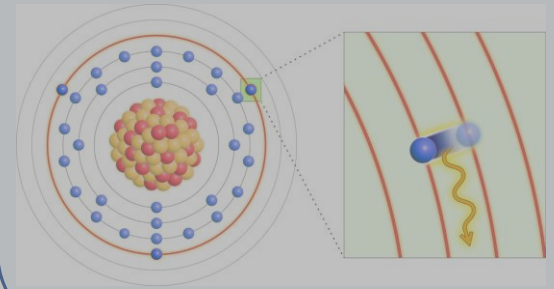
核融合プラズマ

診断・輸送・壁相互作用



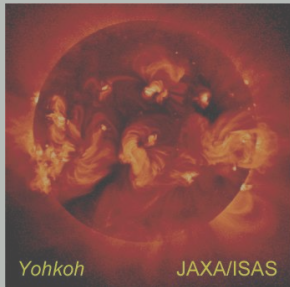
多価イオン原子物理

準位構造・遷移・価数同定



天体プラズマ

太陽・超新星残骸・
キロノバ

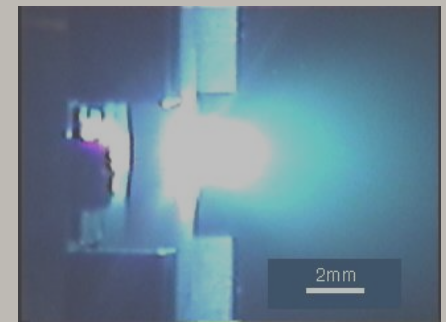


原子分子データ研究に適した
幅広いパラメータ領域

- 電子密度: $10^{18} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 電子温度: $< 5 \text{ keV}$
- 放電時間: 秒～分
- 導入元素: 水素～重元素,
中性粒子～高価数
- 分光計測: X線～可視

産業応用

EUV光源・計測・材料

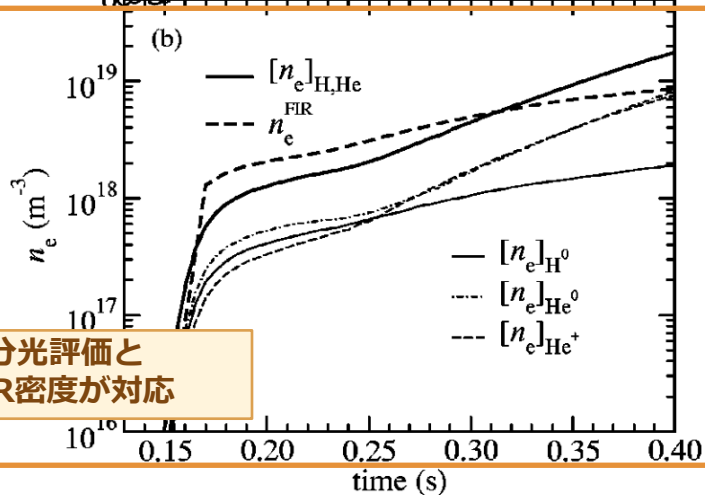
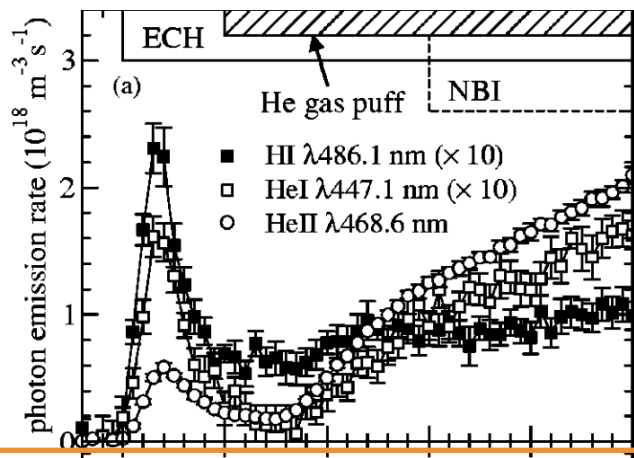


原子分子データが核融合・天体・原子物理・産業応用を横断的につなぐ

核融合プラズマ診断を支える原子・分子データ

水素・ヘリウム発光を用いたバルク粒子・中性粒子輸送診断

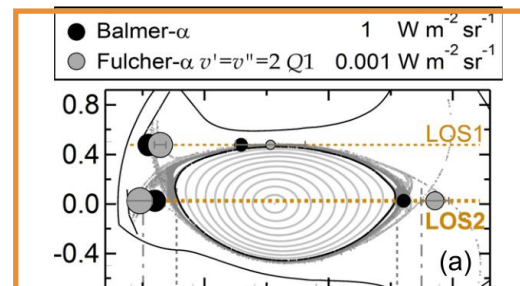
H I /
He I /
He II
発光強度



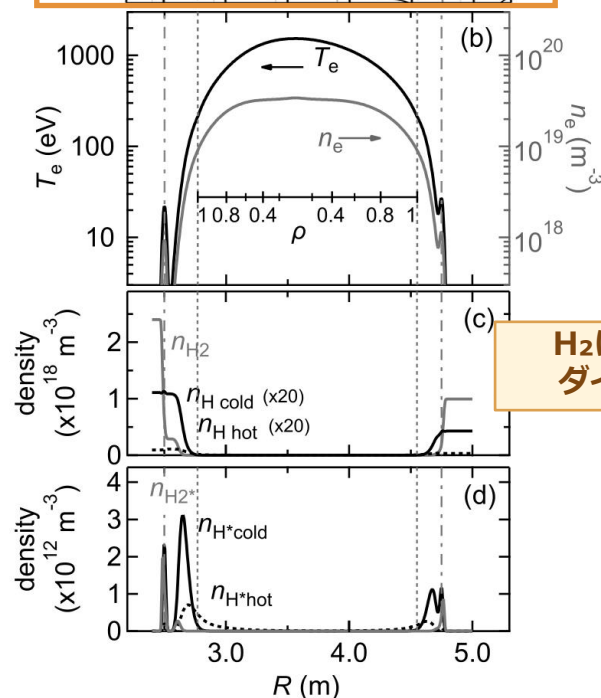
分光評価と
FIR密度が対応

H・He発光線から電離フラックスと密度寄与を評価

Goto et al., Phys. Plasmas 10, 1402-1410 (2003), Fig. 2



黒丸=H,
灰丸=H₂
発光位置
を分離



H₂はより外側
ダイバータ側

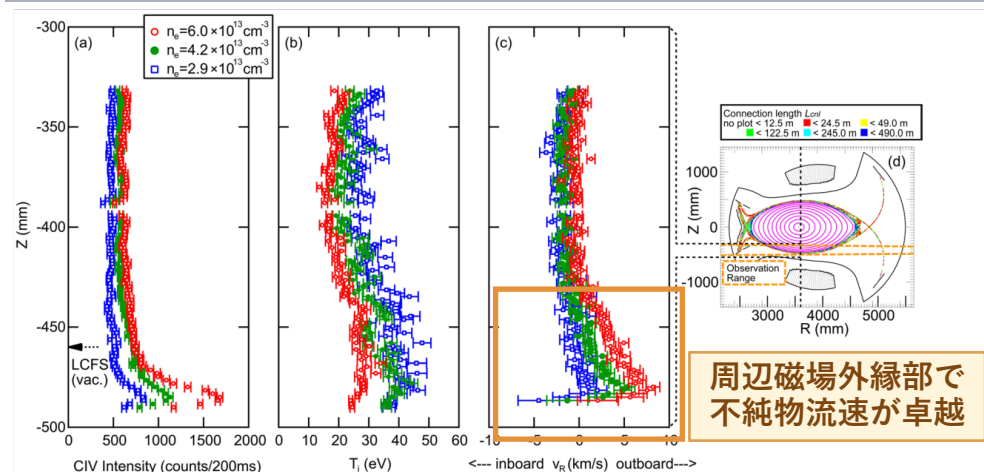
Balmer線・Fulcher-α帯からH/H₂発光位置を分離

Fujii et al., Phys. Plasmas 20, 012514 (2013), Fig. 9

原子・分子発光分光により，バルク粒子の密度・電離・輸送が診断できる

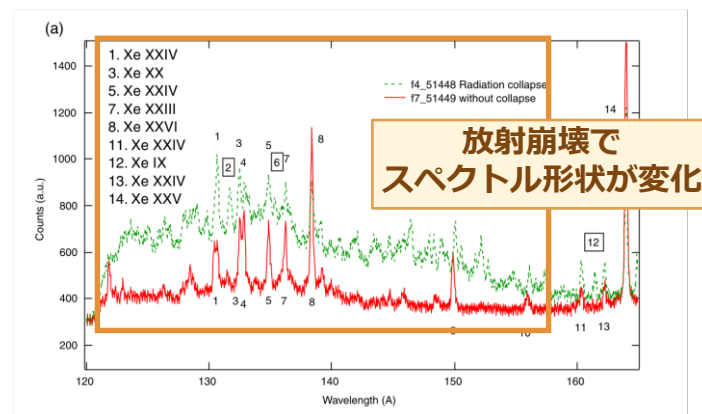
高温プラズマ実験の不純物診断を支える原子・分子データ

C不純物流・BH分子・Xe放射損失の例



C IV VUV分光：不純物流・温度・強度分布

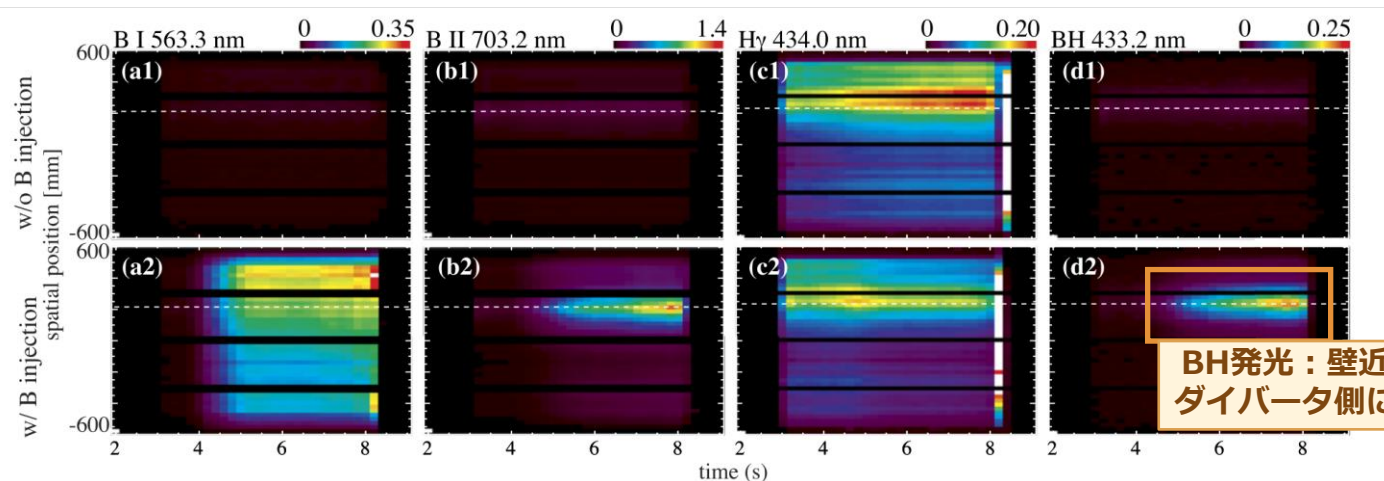
Oishi et al., Nucl. Fusion 58, 016040 (2018), Fig. 8



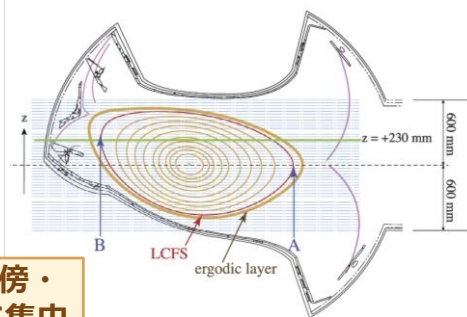
放射崩壊で
スペクトル形状が変化

Xe EUV分光：放射崩壊で価数分布変化

Kato et al., J. Phys. B 41, 035703 (2008), Fig. 3(a)



BH発光：壁近傍・
ダイバータ側に集中



BH分子 可視分光：B輸送と壁堆積を可視化

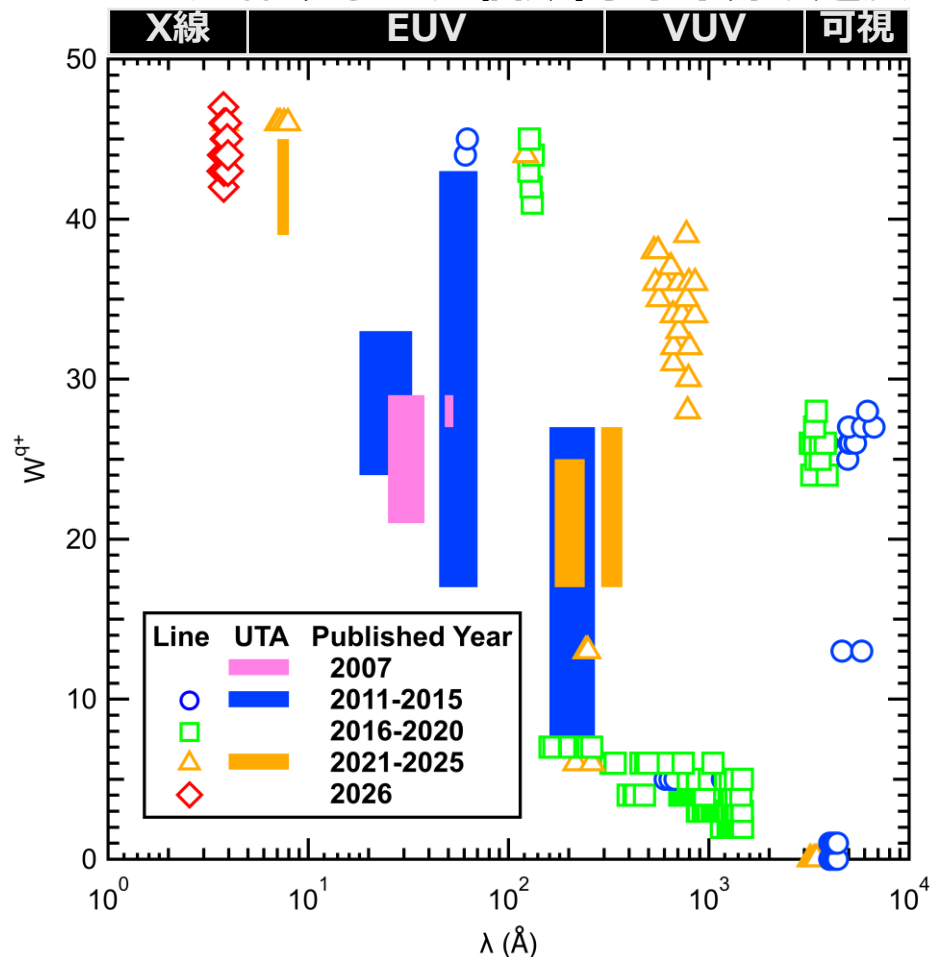
Kawate et al., Nucl. Fusion 62, 126052 (2022), Fig. 4

不純物分光計測により、輸送・壁相互作用・放射損失を多角的に診断できる

タングステン：LHDで観測された W^0 から W^{47+} まで

核融合炉材料由来の最重要高Z不純物

LHDにおけるW多価数同時計測の進展



LHDで観測されてきたW発光線の価数 ($\sim W^{47+}$) と波長

観測開始は20価台UTA (EUV)

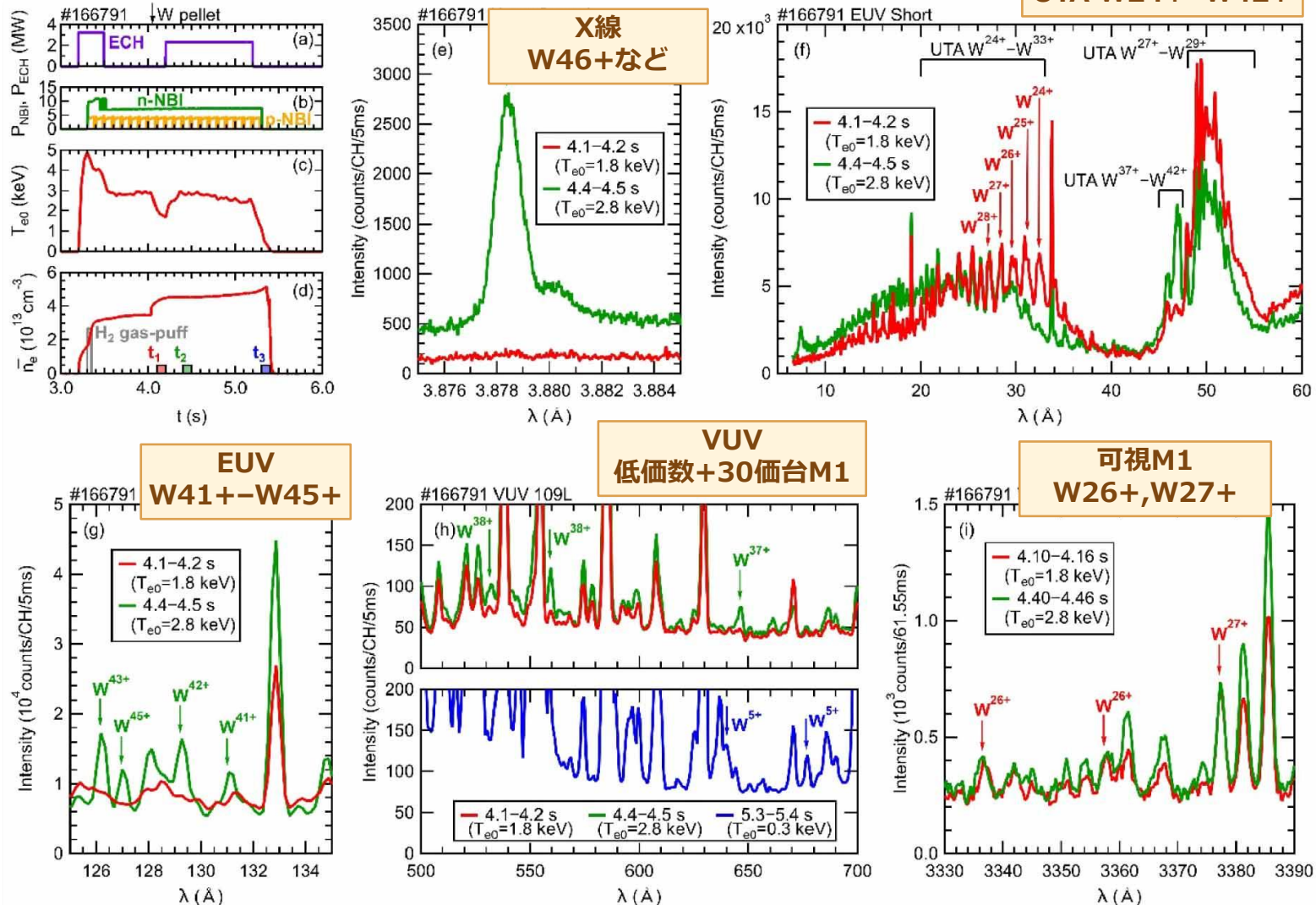
→ W^0 (可視) – W^{47+} (X線) まで価数領域を拡大した

研究内容	波長・価数	論文
Wスペクトル計測開始	EUV・21-29価	M. B. Chowdhuri <i>et al.</i> , PFR 2 , S1060 (2007)
UTA価数同定	EUV・7-43価	C. Suzuki <i>et al.</i> , JPB 44 , 175004 (2011) S. Morita <i>et al.</i> , AIP Conf. Proc. 1545 , 143-152 (2013) Y. Liu <i>et al.</i> , JAP 122 , 233301 (2017)
CR計算によるUTA構造再現	EUV・17-27価	I. Murakami <i>et al.</i> , NME 26 , 100923 (2021) R. Nishimura <i>et al.</i> , NME 41 , 101740 (2024)
UTAを用いたW密度評価	EUV・17-27価	Y. Liu <i>et al.</i> , JJAP 57 , 106101 (2018) R. Nishimura <i>et al.</i> , NF 66 , 096034 (2026)
M1禁制線探索	可視・23-28価 VUV・28-39価	D. Kato <i>et al.</i> , Phys. Scr. T156 , 014081 (2013) K. Fujii <i>et al.</i> , JPB 50 , 055004 (2017) T. Oishi <i>et al.</i> , NME 26 , 100932 (2021)
M1禁制線を用いたW密度評価	可視・26-27価	D. Kato <i>et al.</i> , NF 61 , 116008 (2021)
発光線探索	VUV・2-7価 X線・42-47価	T. Oishi <i>et al.</i> , Phys. Scr. 91 , 025602 (2016) T. Oishi <i>et al.</i> , NF 66 , 076010 (2026)

タングステンの広波長域・多価数同時計測

X線・EUV・VUV・可視を組み合わせ、広い価数範囲を一望

EUV
UTA W24+–W42+

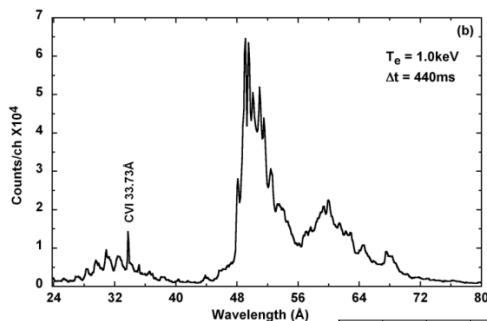


X線から可視までのタングステン分光スペクトル

タングステン研究の進展：観測から診断へ

スペクトル観測 → 価数・遷移同定 → 局所W密度診断

1 観測

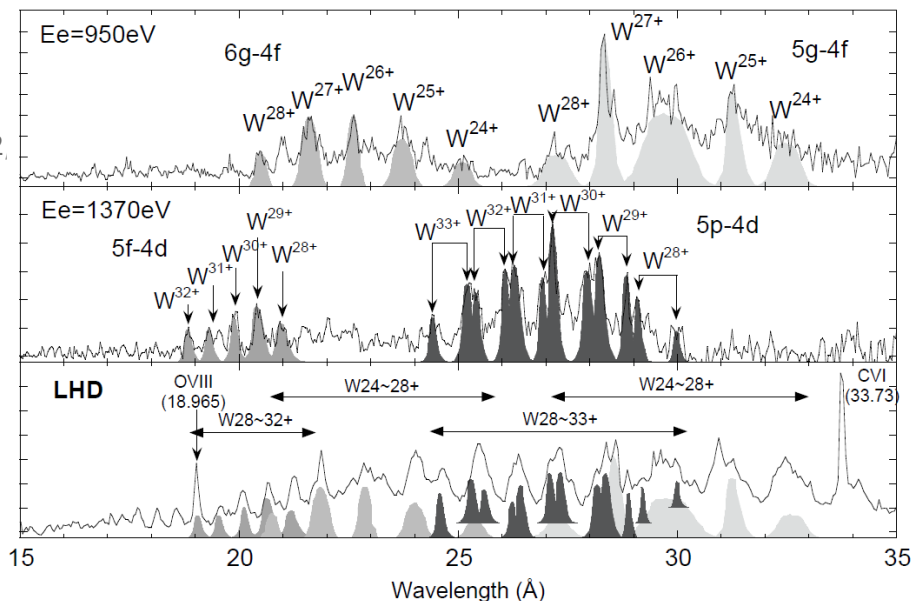


まず
W発光を観測

価数分離された
基礎実験・数値
計算との比較

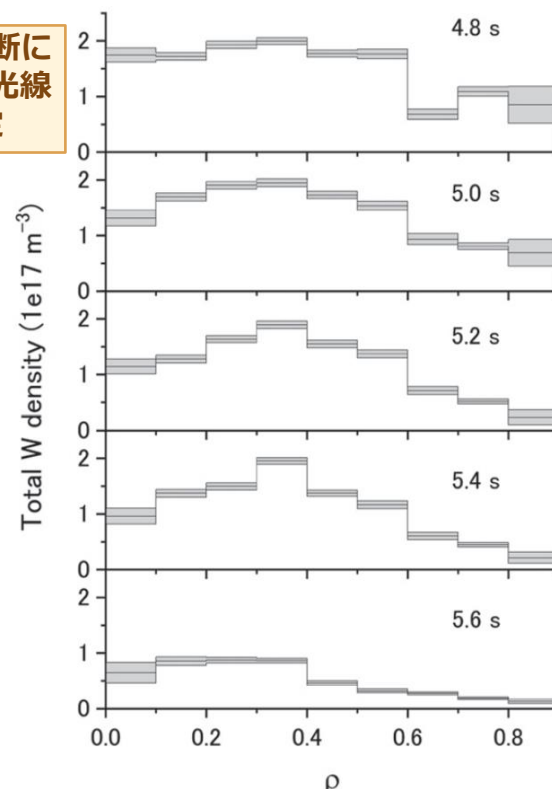
W密度診断に
有用な発光線
の選定

2 価数・遷移同定



LHD-CoBIT-HULLAC比較：スペクトル形状が説明できる
Morita et al., AIP Conf. Proc. 1545, 143-152 (2013), Fig. 4

3 密度診断



可視M1線：全W密度分布へ

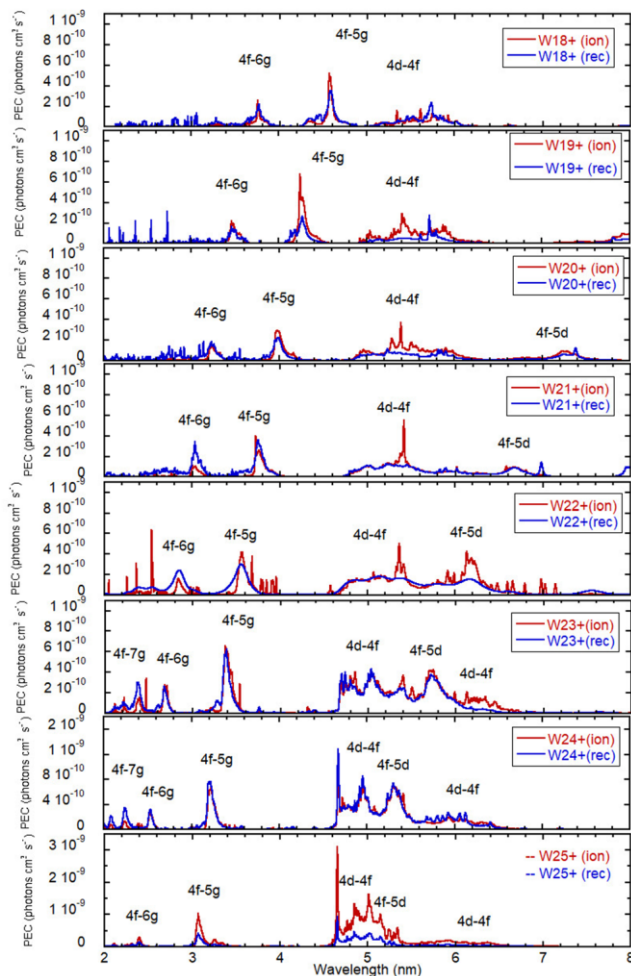
Kato et al., Nucl. Fusion 61, 116008 (2021), Fig. 13

スペクトルを「見る」段階から、構造を「決める」、密度を「測る」段階へ

タングステン診断：孤立線からUTA解析へ

CRモデルにより，線スペクトルとUTAをとともにプラズマ診断へ利用

W18+

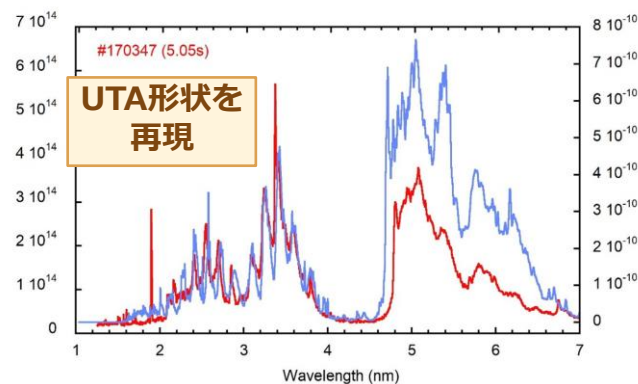


価数ごとの
合成スペクトル

W25+

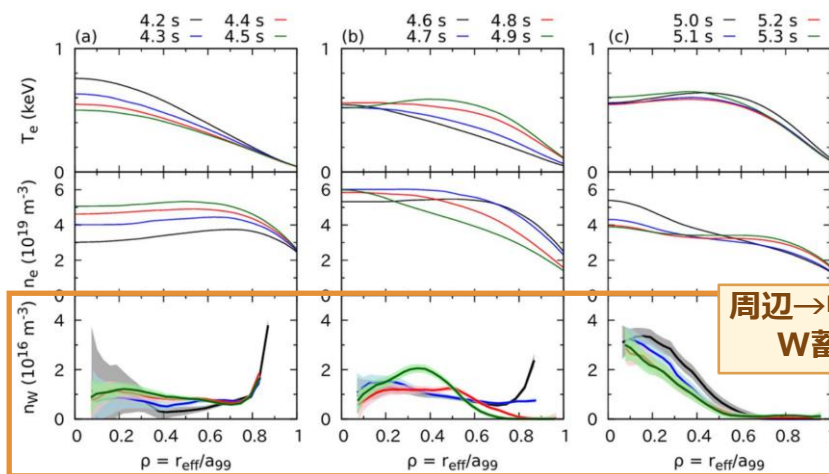
HULLAC + CRで価数ごとにスペクトルを計算

Murakami et al., J. Fusion Energy 45, 36 (2026), Fig. 2



CR計算からUTAを含むスペクトルを合成

Murakami et al., J. Fusion Energy 45, 36 (2026), Fig. 8



191.7 Å UTAから時空間W密度分布を評価

Nishimura et al., Nucl. Fusion 66, 096034 (2026), Fig. 10

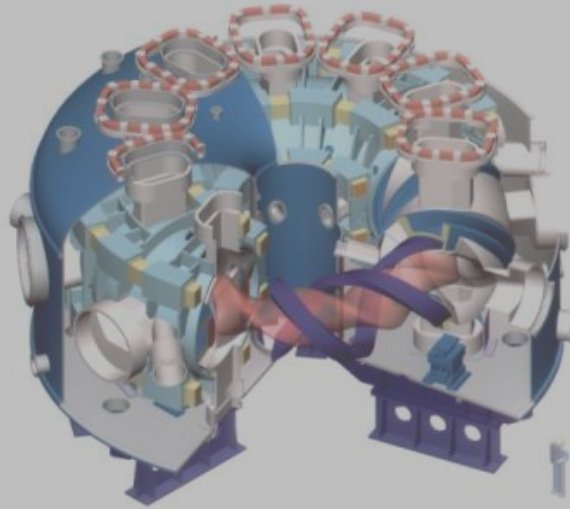
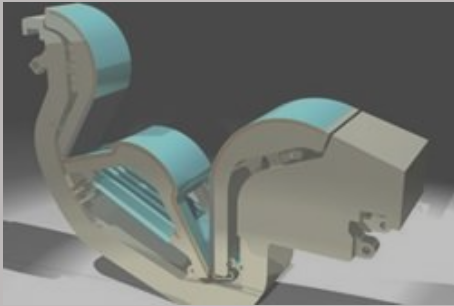
孤立線だけでなく，複雑なUTAも定量的なタングステン診断へ利用できる

LHDにおける原子分子データベース研究と関連分野

LHD原子分子データベース研究を「研究目的」ごとに整理する

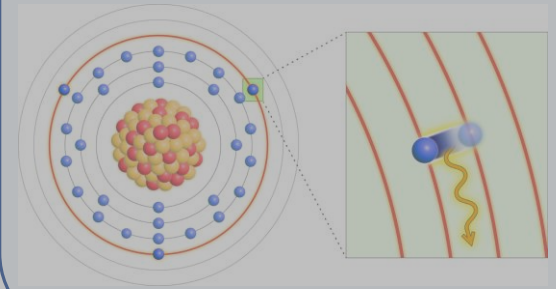
核融合プラズマ

診断・輸送・壁相互作用



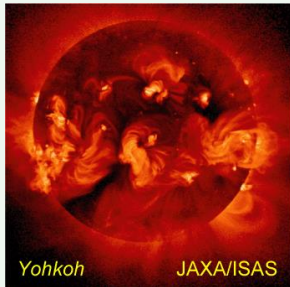
多価イオン原子物理

準位構造・遷移・価数同定



天体プラズマ

太陽・超新星残骸・
キロノバ

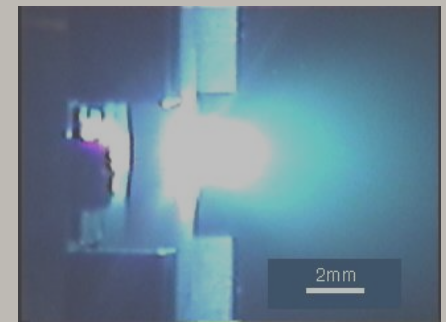


原子分子データ研究に適した
幅広いパラメータ領域

- 電子密度: $10^{18} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 電子温度: $< 5 \text{ keV}$
- 放電時間: 秒～分
- 導入元素: 水素～重元素,
中性粒子～高価数
- 分光計測: X線～可視

産業応用

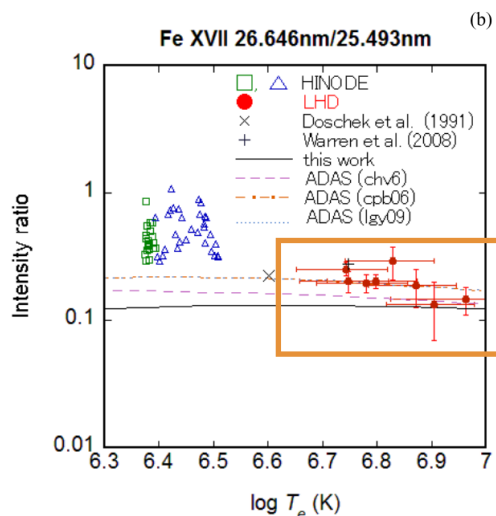
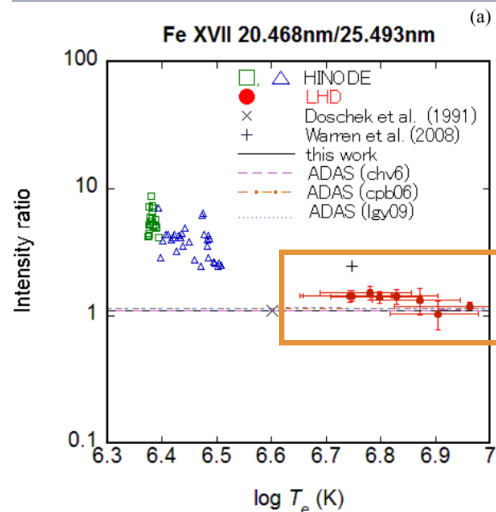
EUV光源・計測・材料



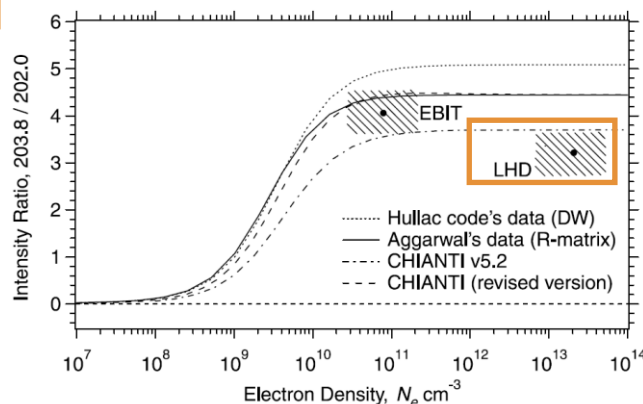
原子分子データが核融合・天体・原子物理・産業応用を横断的につなぐ

天体プラズマ：原子データの実験室検証

Fe 線強度比とNi/Mn L殻スペクトルをLHDで検証

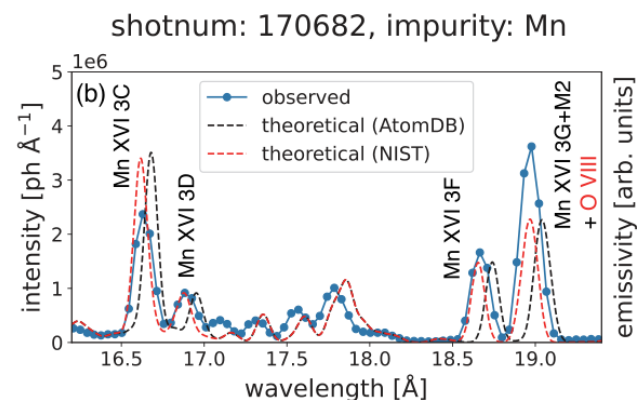
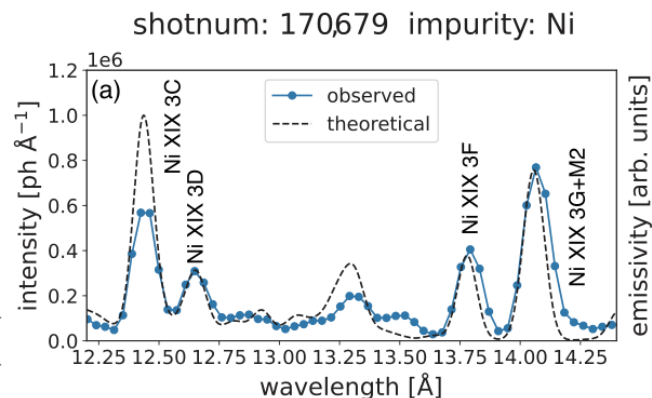


LHDが高温・高密度側に
データ点を供給



Fe XIII : LHD・EBIT・
複数の数値モデルの
線強度比密度依存性比較

Yamamoto et al., Astrophys. J. 689,
646-652 (2008), Fig. 6



Ni/Mn : 実測L殻スペクトルと
AtomDB合成スペクトル

Ohshiro et al., Plasma Fusion Res. 18,
2401041 (2023), Fig. 4

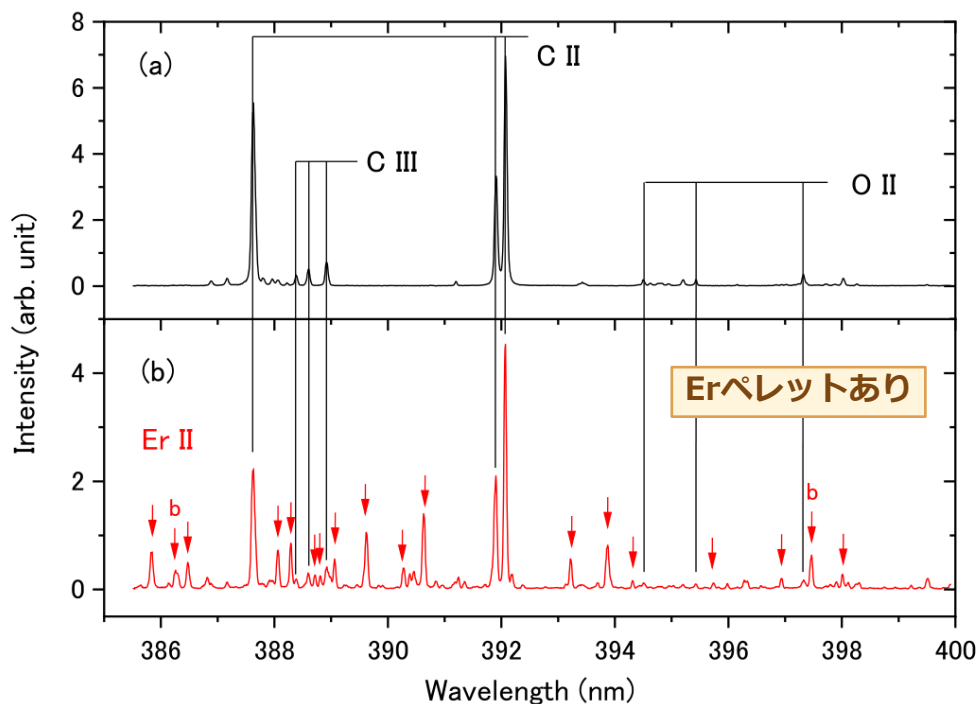
Fe XVII : LHD・Hinode・CRモデルの
線強度比温度依存性比較

Murakami et al., Plasma Fusion Res. 9, 1401056 (2014), Fig. 6

LHDは、天体分光で使う原子データの妥当性を実験室で検証する場にもなる

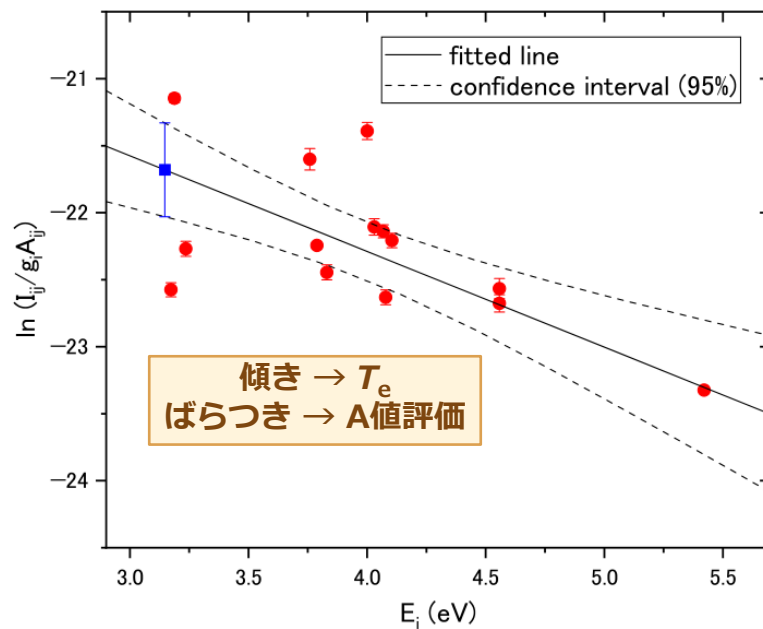
キロノバと重元素原子データ

LHDのEr含有ペレット発光からランタノイド原子データを評価



Er II光スペクトル：ペレット溶発雲中の多数の発光線

Priti et al., J. Fusion Energy 44, 65 (2025), Fig. 3



Boltzmann plot : T_e と遷移確率を評価

Priti et al., J. Fusion Energy 44, 65 (2025), Fig. 6

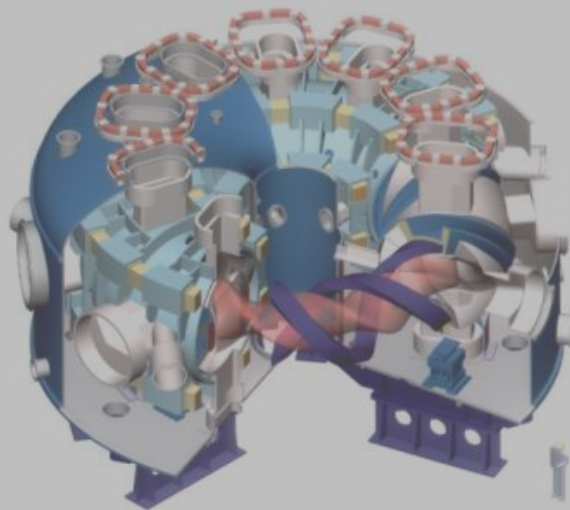
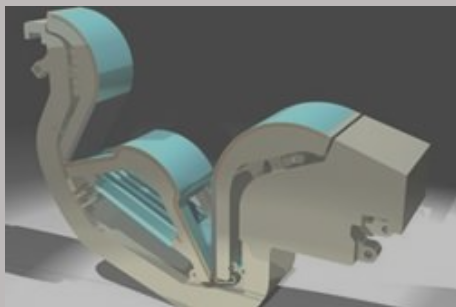
LHDで得たランタノイド発光は、キロノバ opacity 計算の検証データになる

LHDにおける原子分子データベース研究と関連分野

LHD原子分子データベース研究を「研究目的」ごとに整理する

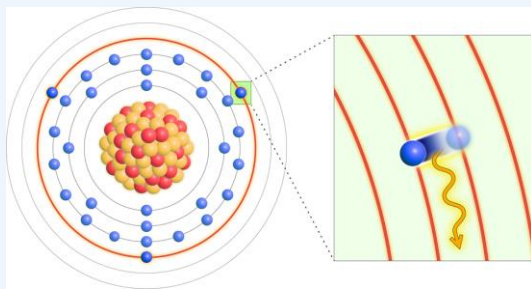
核融合プラズマ

診断・輸送・壁相互作用



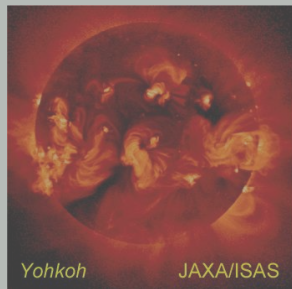
多価イオン原子物理

準位構造・遷移・価数同定



天体プラズマ

太陽・超新星残骸・
キロノバ

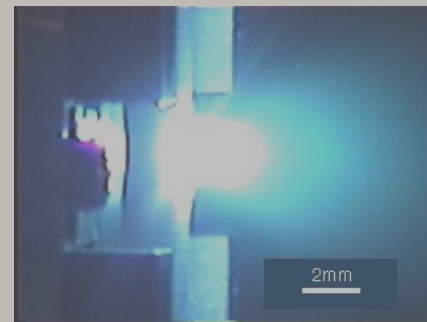


原子分子データ研究に適した
幅広いパラメータ領域

- 電子密度: $10^{18} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 電子温度: $< 5 \text{ keV}$
- 放電時間: 秒～分
- 導入元素: 水素～重元素,
中性粒子～高価数
- 分光計測: X線～可視

産業応用

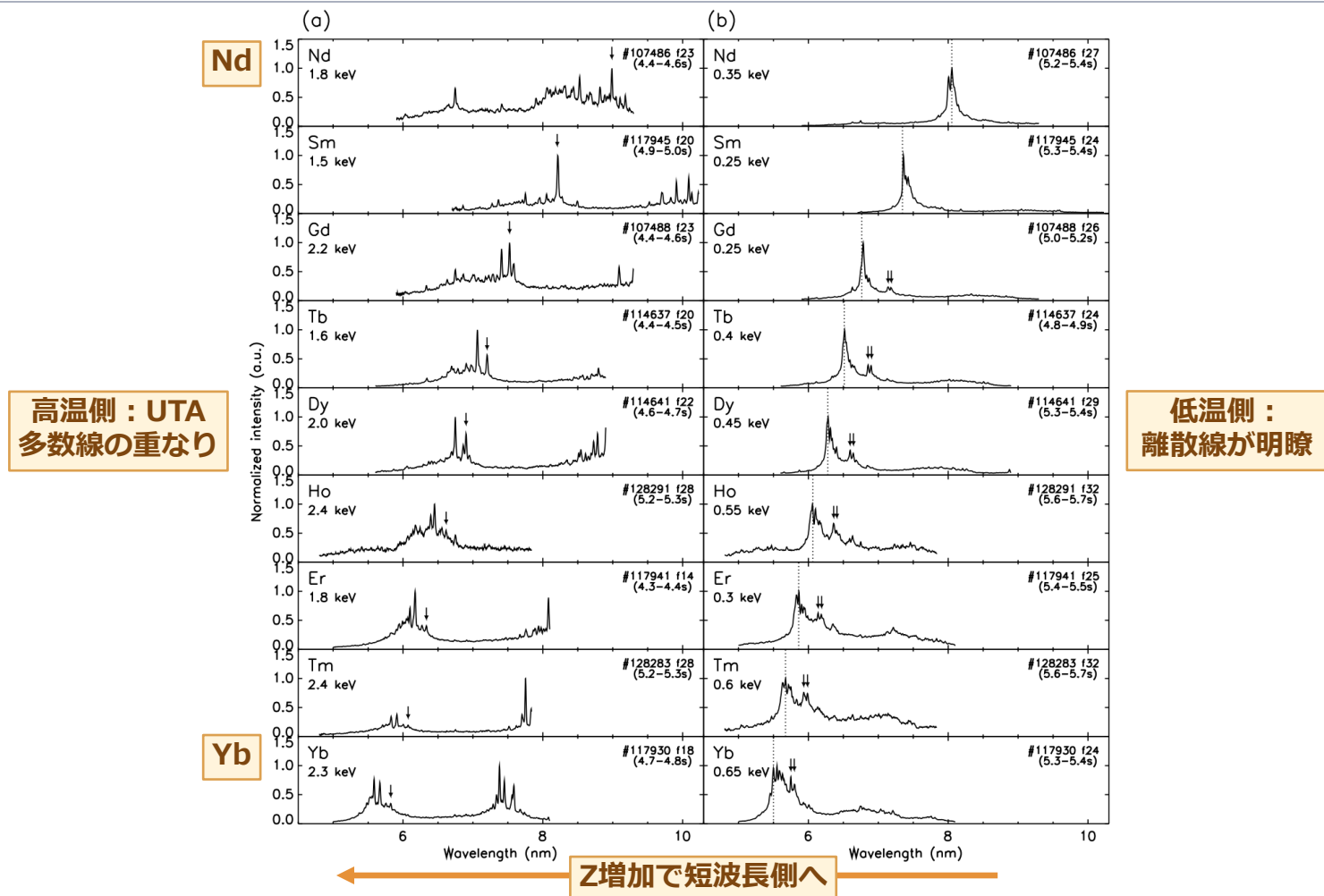
EUV光源・計測・材料



原子分子データが核融合・天体・原子物理・産業応用を横断的につなぐ

高価数イオン原子物理：元素を横断してスペクトルを測る

ランタノイド元素のEUVスペクトルを同一波長軸で比較



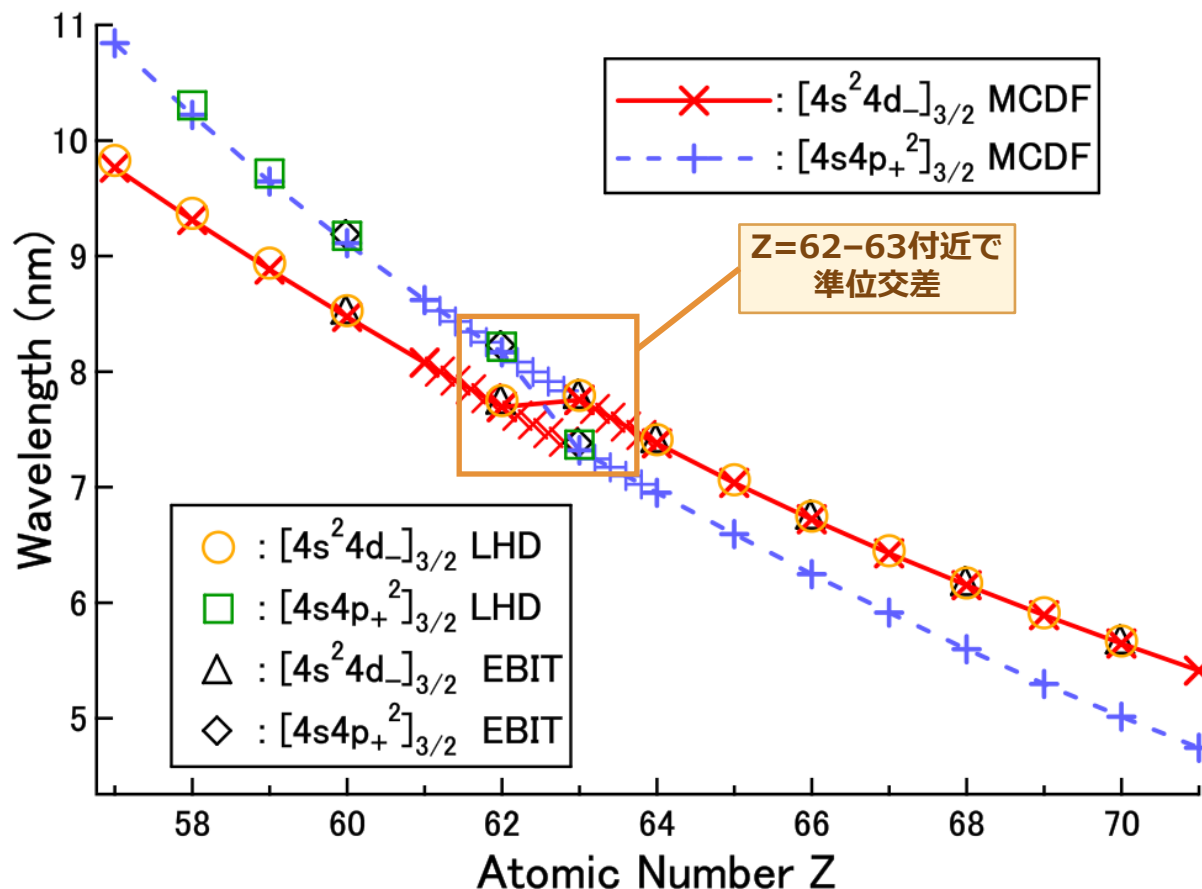
Nd~Ybの高温／低温EUVスペクトル：離散線とUTAがZとともに短波長側へ移動

Suzuki et al., Atoms 6, 24 (2018), Fig. 1

LHDでは、多元素を横断した系統的スペクトル測定により原子構造のZ依存性を検証できる

Ga様ランタノイドにおける準位交差

Z依存性から、 $4s^2 4d$ 状態と $4s 4p^2$ 状態の交差・混合を読み解く



Ga様ランタノイドの波長系列：LHD・EBIT実験とMCDF計算が交差領域を示す

Koike et al., Phys. Rev. A 105, 032802 (2022), Fig. 5

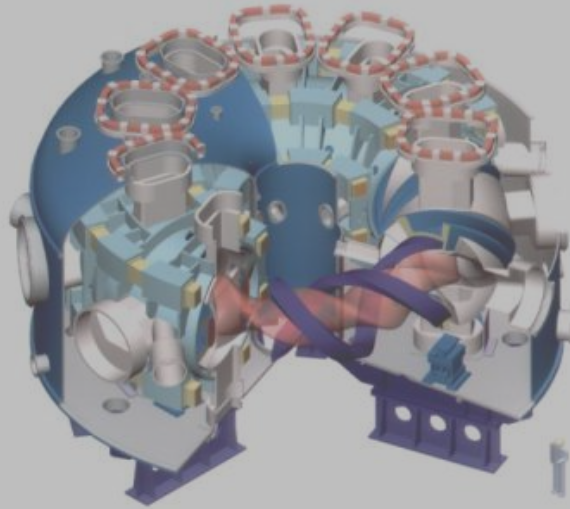
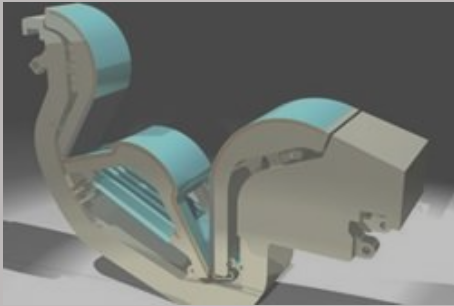
LHDの系統的スペクトル測定は、相対論効果と配置混合を含む原子構造計算の検証にもつながる

LHDにおける原子分子データベース研究と関連分野

LHD原子分子データベース研究を「研究目的」ごとに整理する

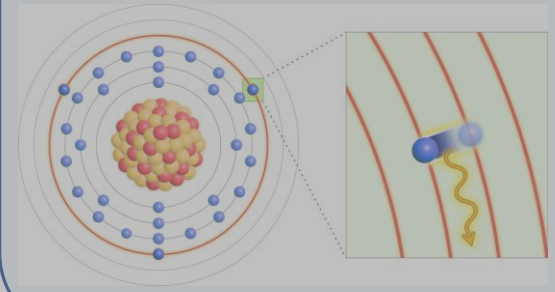
核融合プラズマ

診断・輸送・壁相互作用



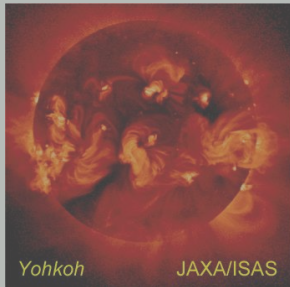
多価イオン原子物理

準位構造・遷移・価数同定



天体プラズマ

太陽・超新星残骸・
キロノバ



原子分子データ研究に適した
幅広いパラメータ領域

- 電子密度: $10^{18} \sim 10^{21} \text{ m}^{-3}$
- 電子温度: $< 5 \text{ keV}$
- 放電時間: 秒～分
- 導入元素: 水素～重元素,
中性粒子～高価数
- 分光計測: X線～可視

産業応用

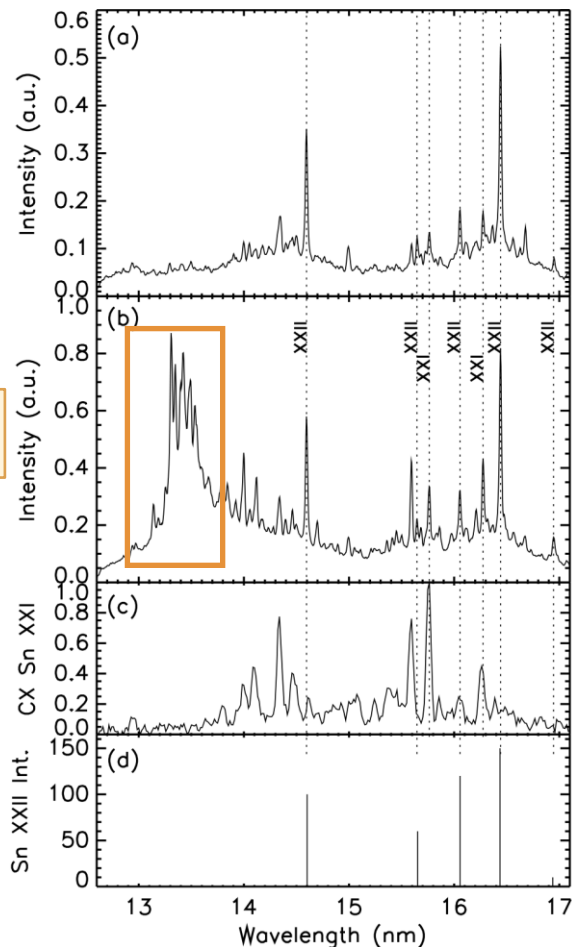
EUV光源・計測・材料



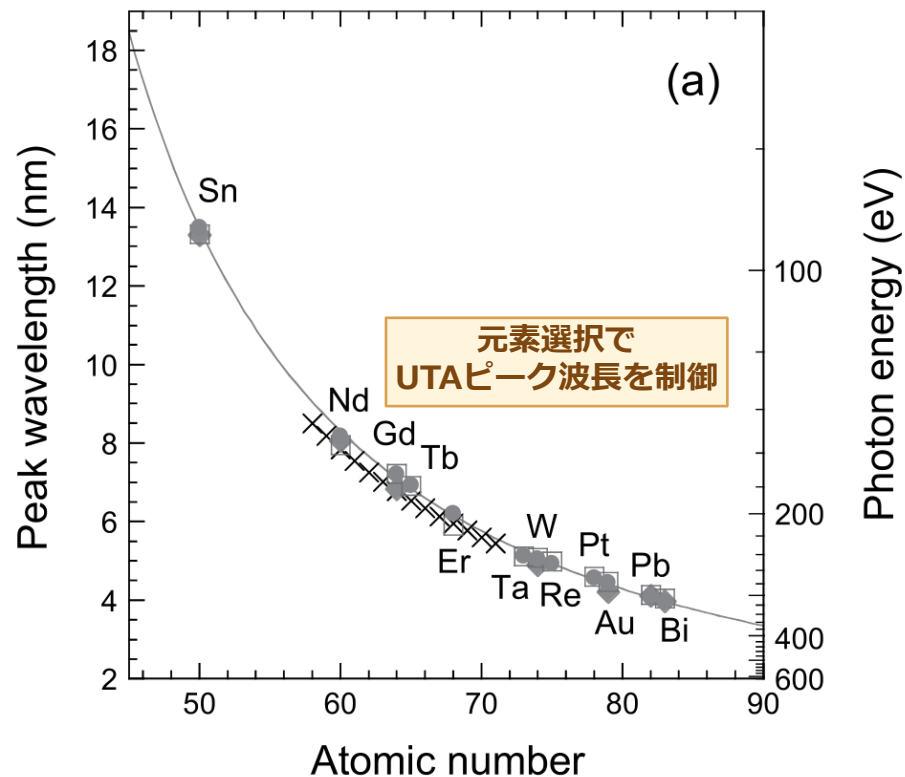
原子分子データが核融合・天体・原子物理・産業応用を横断的につなぐ

産業応用：EUV・短波長光源への展開

Sn 13.5 nm EUVリソグラフィと、重元素UTAの波長スケーリング



13.5 nm
EUV光源



Sn EUVスペクトル：13.5 nm付近のUTAと離散線

n=4-4 UTAピーク波長：元素選択の指針

Suzuki et al., J. Fusion Energy 44, 37 (2025), Fig. 11

Suzuki et al., J. Fusion Energy 44, 37 (2025), Fig. 10

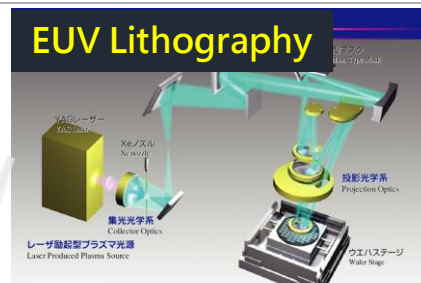
LHDの高Z分光データは、EUVリソグラフィや短波長光源材料の検討にも展開できる。

LHD実験スペクトルデータベース

多元素導入と系統的EUV/軟X線分光により、実験スペクトルを蓄積・共有する



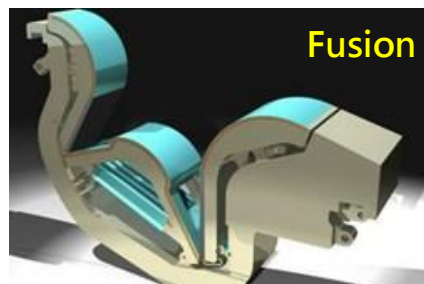
Astrophysics



EUV Lithography

19 ⁴ K ² _{S_{1/2}} Potassium 39.0983 [Ar]4s	20 ² Ca ¹ _{S₀} Calcium 40.078 [Ar]4s	21 ² Sc ² _{D_{3/2}} Scandium 44.955910 [Ar]3d ¹ 4s	22 ² Ti ² _{F₂} Titanium 47.88 [Ar]3d ² 4s	23 ² V ² _{F_{3/2}} Vanadium 50.9415 [Ar]3d ³ 4s	24 ⁵ Cr ³ _{S₃} Chromium 51.9961 [Ar]3d ⁵ 4s	25 ⁶ Mn ⁵ _{S₂} Manganese 54.938040 [Ar]3d ⁵ 4s	26 ⁴ Fe ³ _{D₄} Iron 55.845 [Ar]3d ⁶ 4s	27 ⁴ Co ³ _{F_{7/2}} Cobalt 58.933200 [Ar]3d ⁷ 4s	28 ⁴ Ni ³ _{F₄} Nickel 58.6934 [Ar]3d ⁸ 4s	29 ² Cu ¹ _{S₀} Copper 63.546 [Ar]3d ¹⁰ 4s	30 ¹ Zn ¹ _{S₀} Zinc 65.409 [Ar]3d ¹⁰ 4s	31 ² Ga ² _{P_{1/2}} Gallium 69.723 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p	32 ³ Ge ³ _{P₀} Germanium 72.64 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ²	33 ³ As ³ _{S₂} Arsenic 74.92160 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ³	34 ³ Se ³ _{P₂} Selenium 78.96 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁴	35 ³ Br ³ _{P_{3/2}} Bromine 79.904 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁵	36 ¹ Kr ¹ _{S₀} Krypton 83.798 [Ar]3d ¹⁰ 4s ² 4p ⁶
37 ² Rb ² _{S_{1/2}} Rubidium 85.4678 [Kr]5s	38 ² Sr ¹ _{S₀} Strontium 87.62 [Kr]5s	39 ² Y ² _{D_{3/2}} Yttrium 88.90585 [Kr]4d ¹ 5s	40 ² Zr ² _{F₂} Zirconium 91.224 [Kr]4d ² 5s	41 ² Nb ² _{F_{3/2}} Niobium 92.90638 [Kr]4d ⁴ 5s	42 ⁵ Mo ³ _{S₃} Molybdenum 95.94 [Kr]4d ⁵ 5s	43 ⁶ Tc ⁵ _{S₂} Technetium (98) [Kr]4d ⁵ 5s	44 ⁴ Ru ³ _{F₅} Ruthenium 101.07 [Kr]4d ⁷ 5s	45 ⁴ Rh ³ _{F_{7/2}} Rhodium 102.90550 [Kr]4d ⁸ 5s	46 ² Pd ¹ _{S₀} Palladium 106.42 [Kr]4d ¹⁰ 5s	47 ² Ag ¹ _{S₀} Silver 107.8682 [Kr]4d ¹⁰ 5s	48 ¹ Cd ¹ _{S₀} Cadmium 112.411 [Kr]4d ¹⁰ 5s	49 ² In ² _{P_{1/2}} Indium 114.818 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p	50 ³ Sn ³ _{P₀} Tin 118.710 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ²	51 ³ Sb ³ _{S₂} Antimony 121.760 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ³	52 ³ Te ³ _{P₂} Tellurium 127.60 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁴	53 ³ I ³ _{P_{3/2}} Iodine 126.90447 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁵	54 ¹ Xe ¹ _{S₀} Xenon 131.293 [Kr]4d ¹⁰ 5s ² 5p ⁶
55 ² Cs ² _{S_{1/2}} Cesium 132.90545 [Xe]6s	56 ¹ Ba ¹ _{S₀} Barium 137.327 [Xe]6s		72 ² Hf ² _{F₂} Hafnium 178.49 [Xe]4f ¹⁴ 5d ² 6s	73 ⁴ Ta ² _{F_{3/2}} Tantalum 180.9479 [Xe]4f ¹⁴ 5d ³ 6s	74 ² W ² _{D₀} Tungsten 183.84 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁴ 6s	75 ⁵ Re ⁵ _{S₂} Rhenium 186.207 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁵ 6s	76 ⁴ Os ³ _{D₄} Osmium 190.23 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁶ 6s	77 ⁴ Ir ³ _{F_{7/2}} Iridium 192.217 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁷ 6s	78 ² Pt ³ _{D₃} Platinum 195.078 [Xe]4f ¹⁴ 5d ⁹ 6s	79 ² Au ² _{S_{1/2}} Gold 196.96655 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s	80 ¹ Hg ¹ _{S₀} Mercury 200.59 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s	81 ² Tl ² _{P_{1/2}} Thallium 204.3833 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p	82 ³ Pb ³ _{P₀} Lead 207.2 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ²	83 ³ Bi ³ _{S₂} Bismuth 208.98038 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ³	84 ³ Po ³ _{P₂} Polonium (209) [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁴	85 ³ At ³ _{P_{3/2}} Astatine (210) [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁵	86 ¹ Rn ¹ _{S₀} Radon (222) [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹⁰ 6s ² 6p ⁶
87 ² Fr ² _{S_{1/2}} Francium (223) [Rn]7s	88 ¹ Ra ¹ _{S₀} Radium (226) [Rn]7s		104 ² Rf ² _{F₂} Rutherfordium (261) [Xe]5f ¹⁴ 6d ² 7s	105 ² Db ² _{F_{3/2}} Dubnium (262) [Xe]5f ¹⁴ 6d ³ 7s	106 ² Sg ² _{D₀} Seaborgium (266) [Xe]5f ¹⁴ 6d ⁴ 7s	107 ² Bh ² _{F_{3/2}} Bohrium (264) [Xe]5f ¹⁴ 6d ⁵ 7s	108 ² Hs ² _{F_{3/2}} Hassium (277) [Xe]5f ¹⁴ 6d ⁶ 7s	109 ² Mt ² _{F_{3/2}} Meitnerium (268) [Xe]5f ¹⁴ 6d ⁷ 7s	110 ² Uun ² _{F_{3/2}} Ununnilium (281) [Xe]5f ¹⁴ 6d ⁸ 7s	111 ² Uuu ² _{F_{3/2}} Unununium (272) [Xe]5f ¹⁴ 6d ⁹ 7s	112 ² Uub ² _{F_{3/2}} Unbibium (285) [Xe]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s	114 ² Uuq ² _{F_{3/2}} Ununquadium (289) [Xe]5f ¹⁴ 6d ¹⁰ 7s ² 8p					
			57 ² La ² _{D_{3/2}} Lanthanum 138.9055 [Xe]5d ¹ 6s	58 ¹ Ce ¹ _{G₄} Cerium 140.116 [Xe]4f ¹ 5d ¹ 6s	59 ⁴ Pr ⁴ _{F_{3/2}} Praseodymium 140.90765 [Xe]4f ³ 6s	60 ⁵ Nd ⁵ _{G₄} Neodymium 144.24 [Xe]4f ⁴ 6s	61 ⁶ Pm ⁶ _{G_{5/2}} Promethium (145) [Xe]4f ⁵ 6s	62 ² Sm ² _{F₀} Samarium 150.36 [Xe]4f ⁶ 6s	63 ⁵ Eu ⁵ _{G_{7/2}} Europium 151.964 [Xe]4f ⁷ 6s	64 ³ Gd ³ _{D₂} Gadolinium 157.25 [Xe]4f ⁷ 5d ¹ 6s	65 ⁴ Tb ⁴ _{F_{3/2}} Terbium 158.92534 [Xe]4f ⁹ 6s	66 ⁵ Dy ⁵ _{G_{5/2}} Dysprosium 162.500 [Xe]4f ¹⁰ 6s	67 ⁴ Ho ⁴ _{F_{3/2}} Holmium 164.93032 [Xe]4f ¹¹ 6s	68 ³ Er ³ _{H₆} Erbium 167.259 [Xe]4f ¹² 6s	69 ² Tm ² _{F_{7/2}} Thulium 168.93421 [Xe]4f ¹³ 6s	70 ¹ Yb ¹ _{S₀} Ytterbium 173.04 [Xe]4f ¹⁴ 6s	71 ² Lu ² _{D_{3/2}} Lutetium 174.967 [Xe]4f ¹⁴ 5d ¹ 6s

図作成：
鈴木千尋
(核融合研)

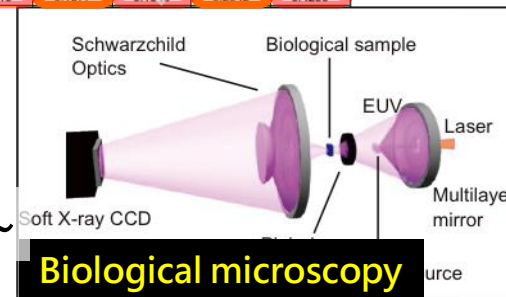


Fusion

www.nist.gov/pml/data/periodic.cfm

already injected

~ 2011 2012 2013 2014 2017 2020 ~



Biological microscopy

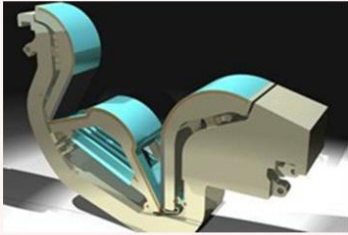
実験スペクトル・元素範囲・プラズマ条件が結べれば、原子データ検証と再利用の基盤となる

まとめ

LHDが切り拓いた分野横断的な原子分子データ研究

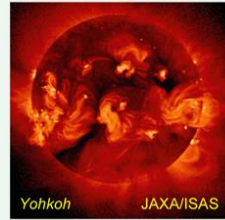
核融合プラズマ

診断・輸送・壁相互作用



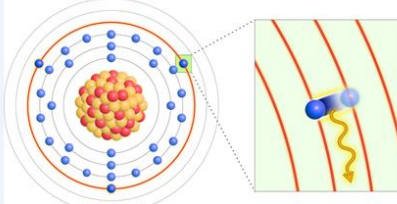
天体プラズマ

太陽・超新星残骸・
キロノバ



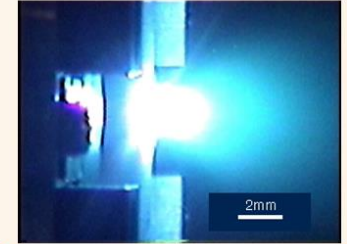
多価イオン原子物理

準位構造・遷移・価数同定



産業応用

EUV光源・計測・材料



- LHDは広波長域・多元素・多価数の実験スペクトルを蓄積した
- 原子分子データは核融合診断から天体・原子物理・産業応用へ展開した
- 今後は数値データと実験スペクトルを結ぶデータベース化が重要

**LHDは、原子分子データの利用・創出・検証・共有をつなぐ
学際的プラットフォームであった**

今後の展開と議論したい論点

LHDの原子分子データ研究を、次の装置・他分野・未解明課題へどうつなげるか

シンポジウム提案趣旨より抜粋：「本共催シンポジウムでは、これまでにLHDで得られてきた新しいプラズマ物理現象を紹介し、これらの事象と他装置での観測結果との比較、核融合以外のプラズマ研究への展開、また今後のプラズマ実験に残された謎などについて議論する」

① 他装置との比較

- LHDで分光によって観測された現象は、トカマクや他のヘリカル装置でも普遍か
- W・希ガス・H/Heの発光挙動は、磁場配位や周辺輸送でどう変わるか
- LHD実験スペクトルは、JT-60SAやITERなど次世代装置の解釈にどう生かせるか

② 核融合以外への展開

- 天体X線分光：Fe, Ni, Mnなどの原子データ検証
- キロノバ：ランタノイドの分光データとopacity計算
- 産業応用：EUV・短波長光源材料の探索
- どの分野で『LHD分光データでしかできない実験的ベンチマーク』が残っているか

③ 今後他装置の実験で挑戦できること

- 空間分解UTA解析の高度化：局所W密度・放射損失への展開
- 低価数Wの可視計測，M1禁制線の診断利用
- LHDアーカイブデータとCoBIT/EBIT・CR計算の統合解析
- CHD, JT-60SA, ITER関連計測への橋渡し

④ まだ残っている謎

- 未同定線や複雑なUTAの起源をどこまで説明できるか
- 原子過程と輸送過程をどう切り分けて議論するか
- 波長域ごとの診断結果を、どのように整合的に結び付けるか
- 『実験スペクトルDB』を予測・設計に使える形へ発展できるか

LHDで蓄積した実験スペクトルを「比較・検証・予測」へ展開することが、次の研究課題