TOHOKU UNIVERSITY

アルファ粒子計測のための ヘリウム基底状態中性粒子ビーム開発

岡本敦、西村秀俊、ほか

東北大学大学院工学研究科

Advanced Diagnostics for Burning Plasmas

I. はじめに
II. 基底状態中性粒子ビーム生成
III. 準安定状態の計測法開発
   i. ビーム減衰による計測
   ii. レーザーを用いた計測
IV. まとめ

α粒子計測のためのHe^{0}ビーム

$He^{2+} + X^0 \rightarrow He^0 + X^{2+}$

- 核燃焼プラズマ中心部におけるアルファ粒子の局所計測
  - 二重荷電交換　He^0, Li^0, Be^0, Li^+, Be^+, Be^{2+} ･･･
  - ビーム入射→中性粒子ビーム　He^0, Li^0, Be^0 ･･･
  - 高速ビーム（相対速度が効く）　He^0
    - He^0 ビーム 1.7 MeV, 10 mA (0.1 mA/cm^2) for ITER

- He^{0}ビーム入射
  - プラズマ中心部における局所計測
    - ビーム減衰の正確な評価
    - 貫通深さの確保
  - 準安定状態He* (1s2s $^3S_1$) の存在

⬇

  - 準安定粒子の生成を極力抑える中性粒子ビーム生成

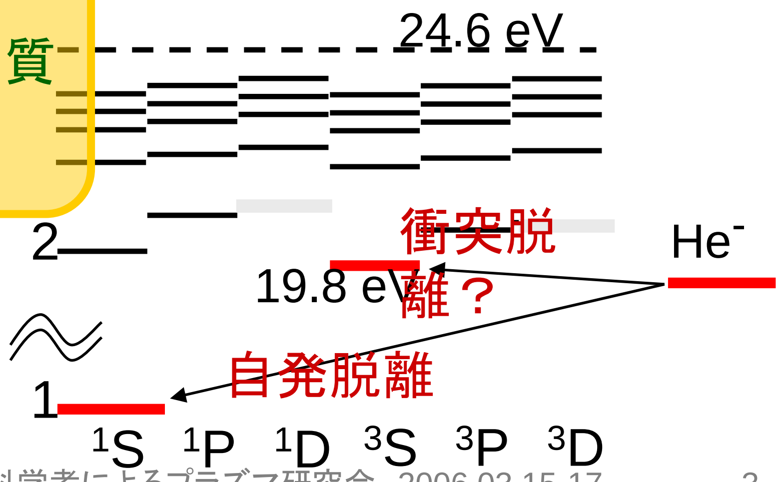
基底状態He^{0}ビーム生成法

He$^+$ (~25keV)+ Na, Li → He$^+$, He^0, He$^-$

He$^-$ (~1.7MeV)→ He^0

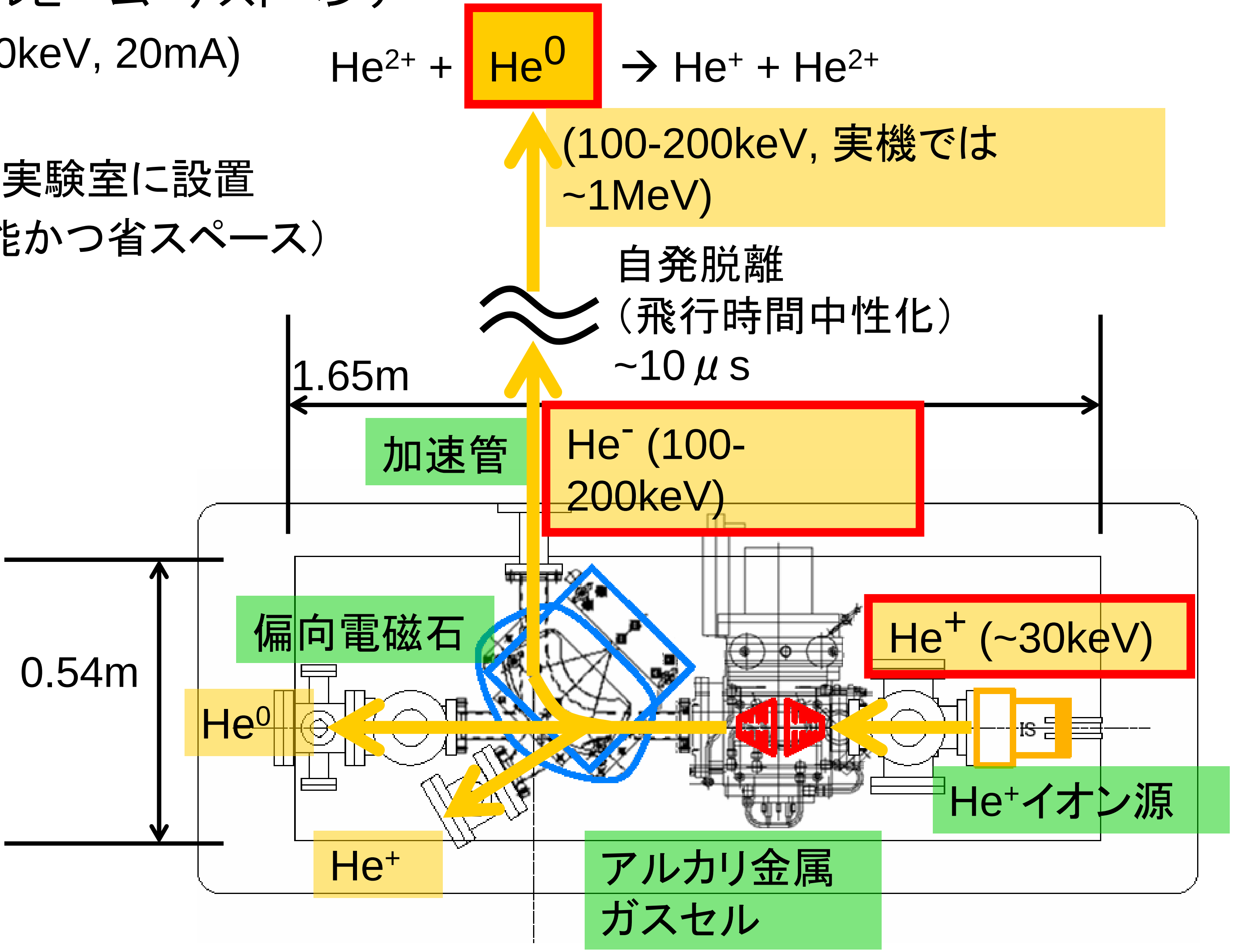
- 負イオンの自発脱離を利用した高速中性粒子ビーム生成(飛行時間中性化法)

- 開発課題
  - He^{0}ビーム生成の原理検証
    - テストベンチ (ペンシルビームHe$^+$ 30keV, 20mA)
    - 負イオンHe$^-$ への変換効率、ビーム品質
    - 自発脱離による中性化効率
    - 準安定状態/基底状態占有密度比
  - 高収束型大電流(~3A)イオン源

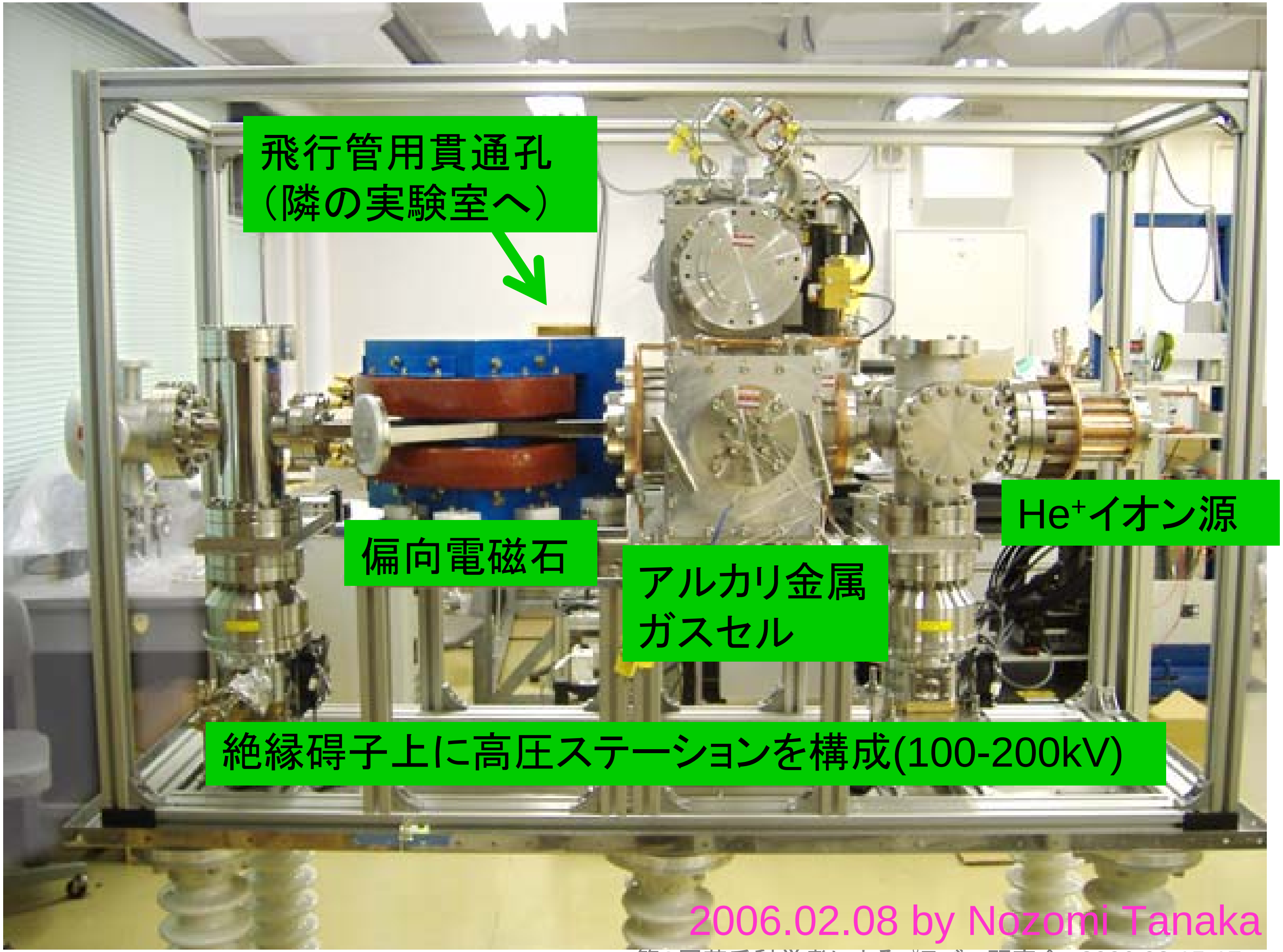


He⁰ビーム生成原理検証実験

- ペンシルビーム　テストベンチ
  (He^+ 30keV, 20mA)
- 大学の実験室に設置
  （多機能かつ省スペース）

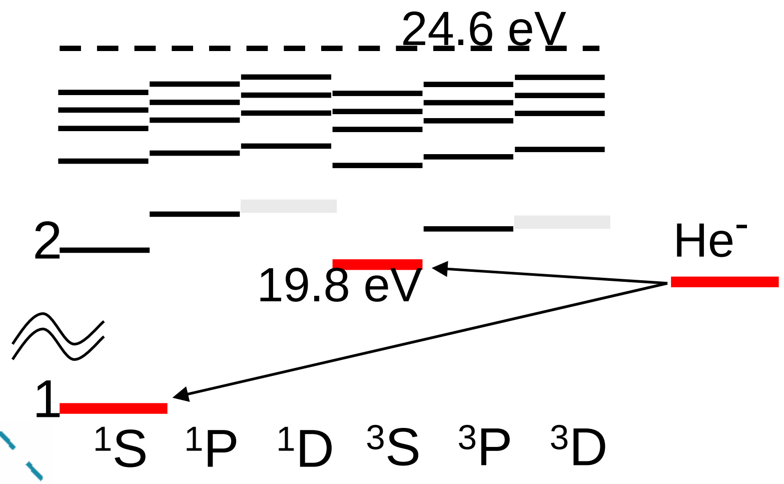


原理検証実験テストベンチ



He*/He^{0}計測法

- ビーム構成粒子の内部エネルギー状態
  - He* (1s2s $^3S_1$) / He^0 (1s^2 $^1S_0$)

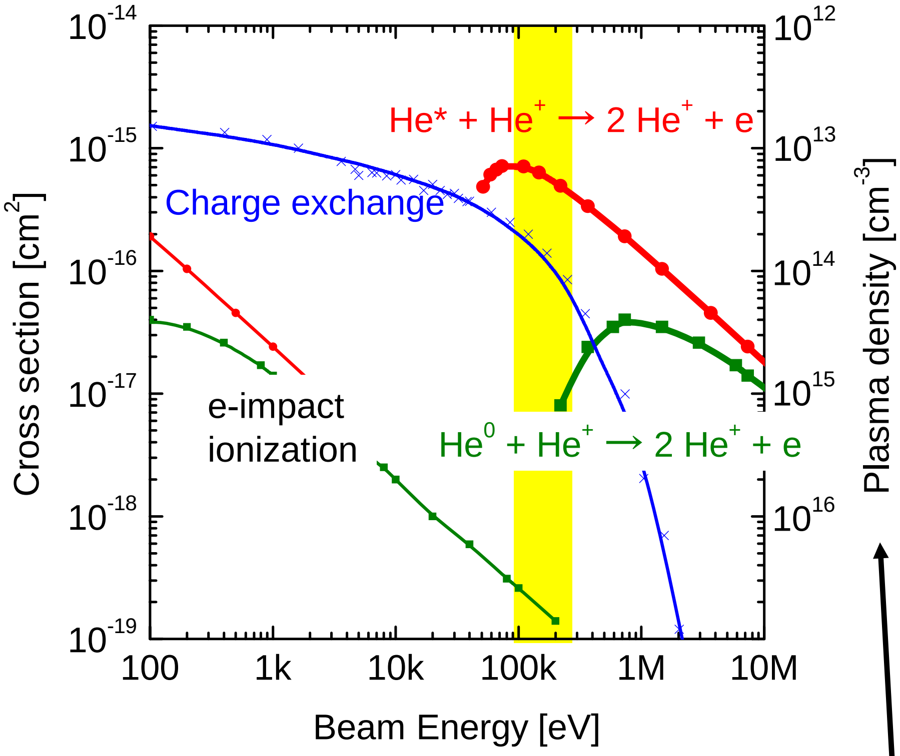


- ビーム減衰長から推定
  - 高密度ターゲットプラズマに入射

- レーザーを用いた占有密度の直接計測
  - 準安定状態からのレーザー励起
    - レーザー吸収分光
    - レーザー誘起蛍光
  - 基底状態？

プラズマ中のHe^0ビーム減衰過程

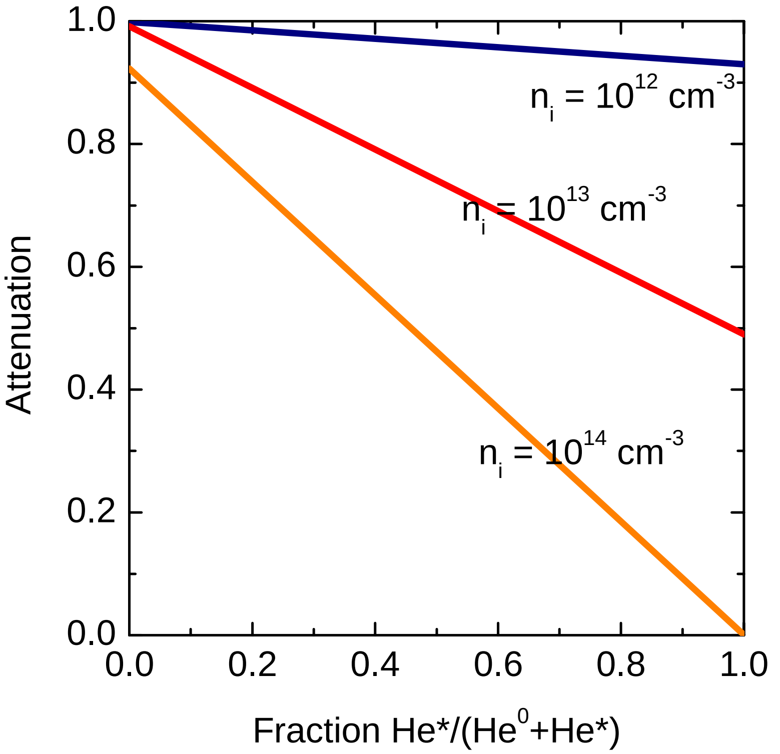
He^0ビームとHeプラズマの反応断面積



平均自由行程1mに対応するプラズマ密度

ビーム減衰率のHe* 割合依存性

エネルギー100keV、プラズマ長1m

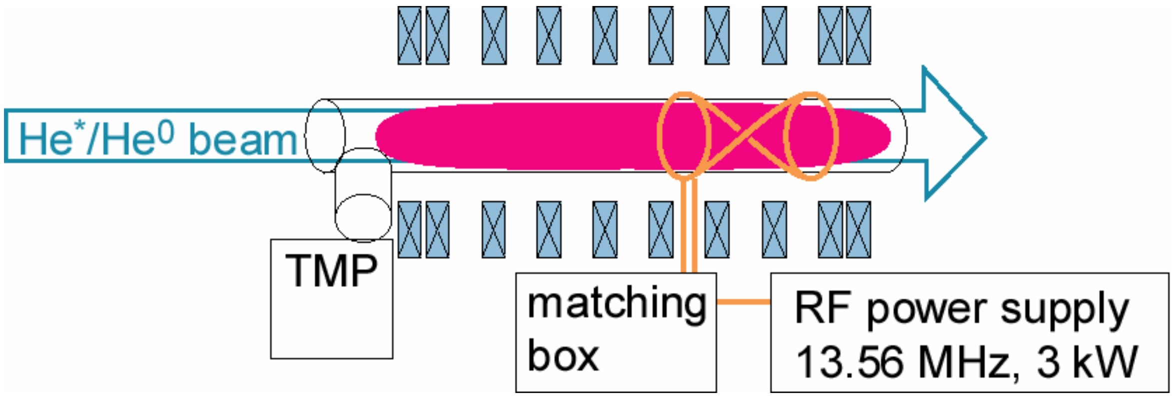


10^{13} cm^{-3}程度の密度が必要

ビーム入射標的用高密度プラズマ生成装置

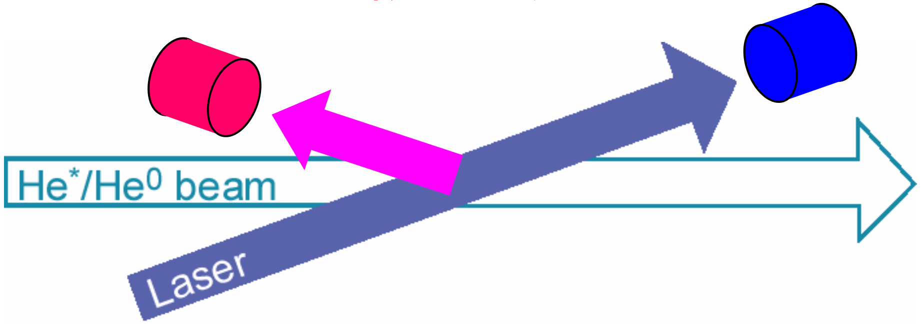
• 直線磁場	B	0.2 T
• RF(ヘリコン波)放電	P_{RF}	3 kW
• プラズマ体積	ϕ0.1 m x 1 m	
• プラズマ密度	n	10^{13} cm^{-3}
• 電子温度	Te	10 eV

- 既存の装置を改造中



レーザーを用いたHe*計測法

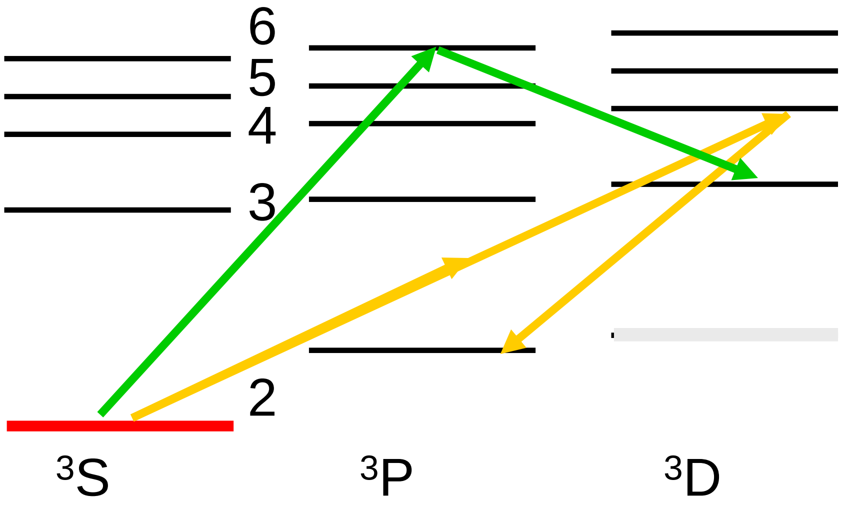
- 占有密度の直接計測
  - 準安定状態からのレーザー励起
    - レーザー吸収分光
    - レーザー誘起蛍光



- 原理検証実験で生成されるHe⁰ビーム
  - 100-200 keV, 10-100 μA, ~φ1 cm
  - $n_{beam} = 3 \times 10^5 - 4 \times 10^6\ cm^{-3}$
  - He* (1s2s $^3S_1$) 数%混在？
    - 非常に低密度(~$10^4\ cm^{-3}$)

- 検出下限ビーム密度の評価
  - 適切な光源・検出器・励起準位の選択

レーザー誘起蛍光法によるHe*計測



$$n_{\text{photon}} = n^* \frac{g_2}{g_1 + g_2} \frac{A_{23}}{\sum_i A_{2i}} V \frac{\Omega}{4\pi} \eta$$

n_{photon}	受光光子数
n^*	準安定状態占有密度
g_i	準位iの統計重率
A_{2i}	自発遷移確率
V	観測体積
Ω	受光立体角
η	受光光学系透過率

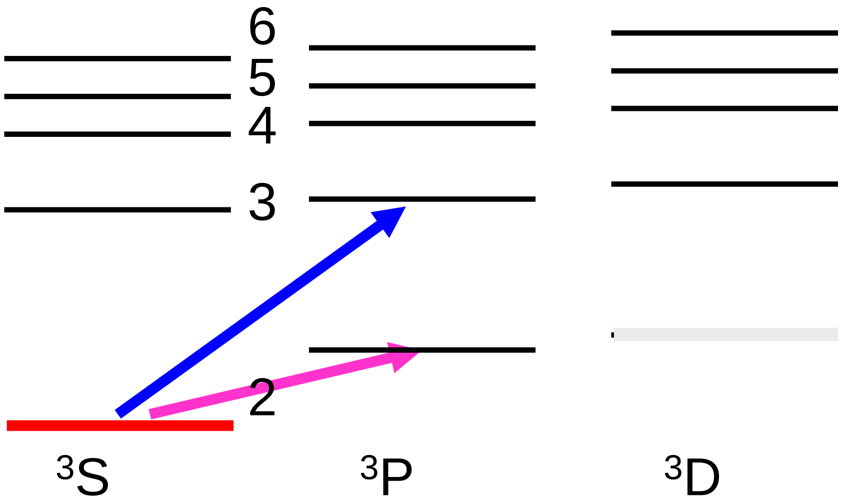
各手法におけるエネルギー準位・波長(上段)
各パラメータと1x10^{5}cm^{-3}に対するレーザー1パルスあたりの受光光子数(下段)

	準位1	励起波長	準位2	蛍光波長	準位3
a	2 ^{3}S	282.9nm	6 ^{3}P	1099.7nm	3 ^{3}D
b	2 ^{3}S	633.1nm*2	4 ^{3}D	447.1nm	2 ^{3}P

	$g/g+g$	$A/\Sigma A$	V[cm-3]	Ω[sr]	n_{photon}
a	0.75	0.0267	3.37	4.4x10^{-3}	0.5
b	0.83	0.790	7.85x10^{-2}	0.44	73

- 手法a
  - 強度が弱い→検出効率について要検討
  - 積算により1x10^{5}cm^{-3}は検出可能(要迷光対策)
- 手法b
  - 二光子励起なので十分なレーザー強度が必要(≧100mJ/pulse)
  - 励起さえしてしまえば蛍光の観測は容易

レーザー吸収分光法によるHe*計測



	準位1	吸収波長	準位2	B係数	$h\lambda B/c\Delta\lambda$
a	2 ^{3}S	388.9nm	3 ^{3}P	0.1×10^{21}	16×10^{-16}
b	2 ^{3}S	1083nm	2 ^{3}P	2.3×10^{21}	16×10^{-16}

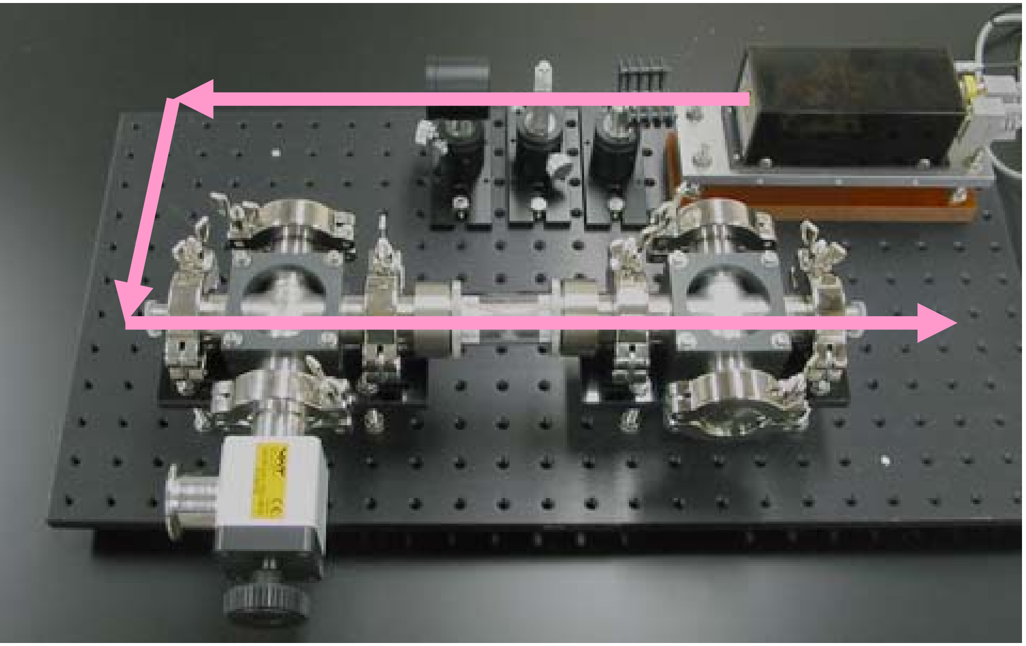
$$I(x) \approx I(0)\exp\left[-\frac{h\lambda}{c\Delta\lambda}Bn^{*}x\right]$$

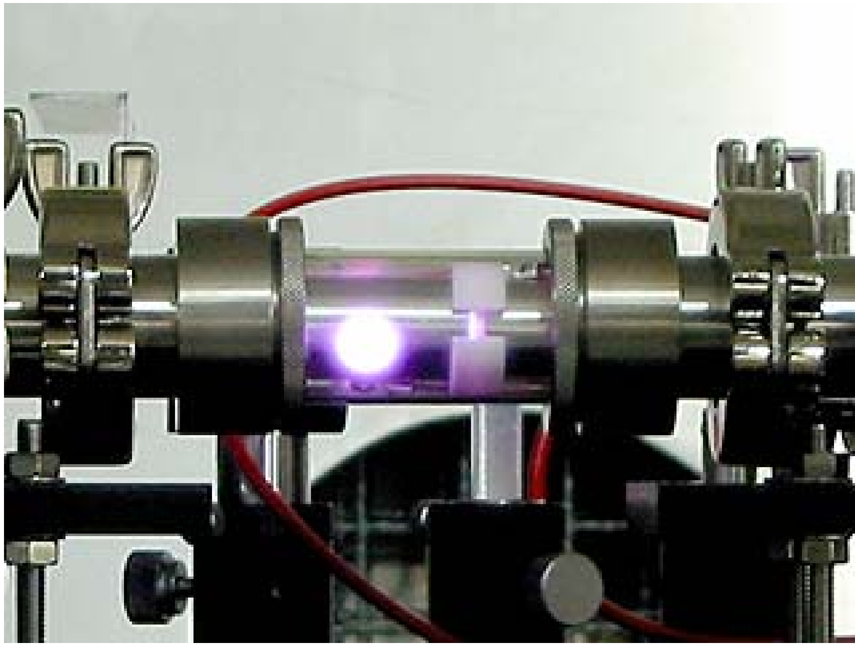
$I(x)$	レーザー強度
λ	波長
B	B係数
n^{*}	準安定状態占有密度
x	吸収長
$\Delta\lambda$	スペクトル広がり

- 励起(吸収)波長:1083nm
  - 光子吸収断面積の点で優位
  - 半導体レーザー(出力1mWあれば十分)
  - IR-PMTで観測体積通過後のレーザー光強度を計測
- 検出下限は検出器のダイナミックレンジで決まる
  (微弱光を測るのではなく、減光を測る)
  ➡ $I(x)/I(0) = 1 - 4\times10^{-3}$ (→$n^{*} = 5\times10^{6}$ cm^{-3})
  (吸収長 x=1 m、スペクトル広がり Δλ=0.003 nm)

- 吸収経路の多重化などの工夫でHe*計測に適用可能と考えられる

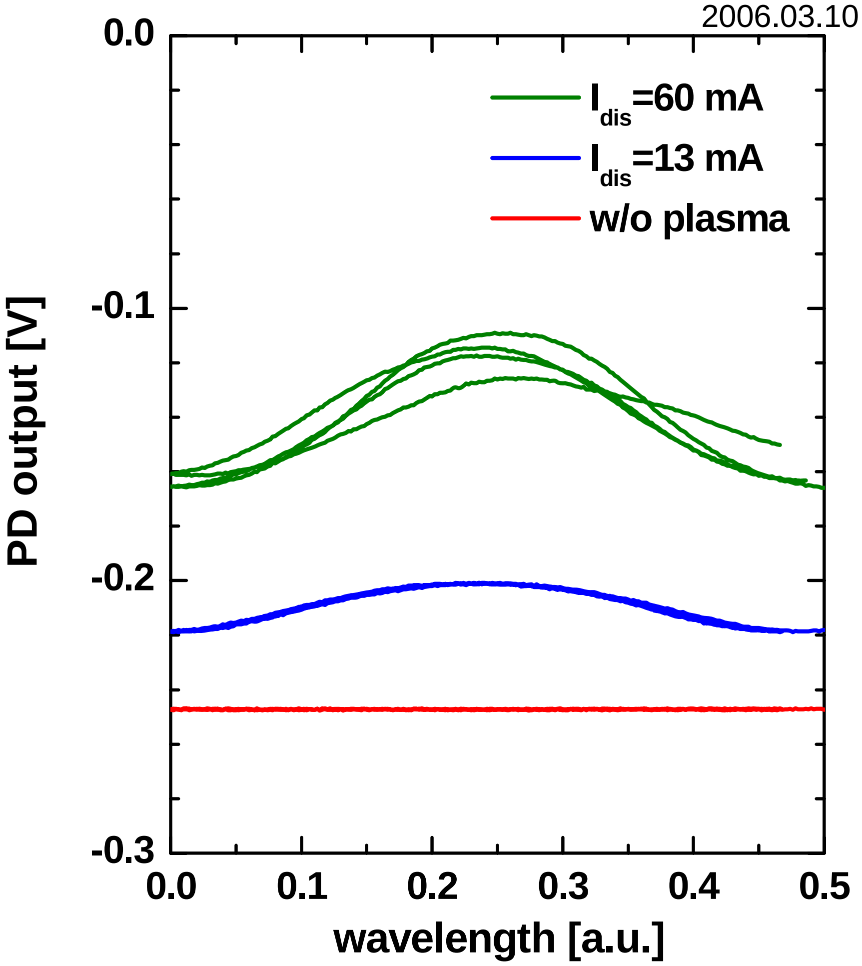
レーザー計測法テストスタンド

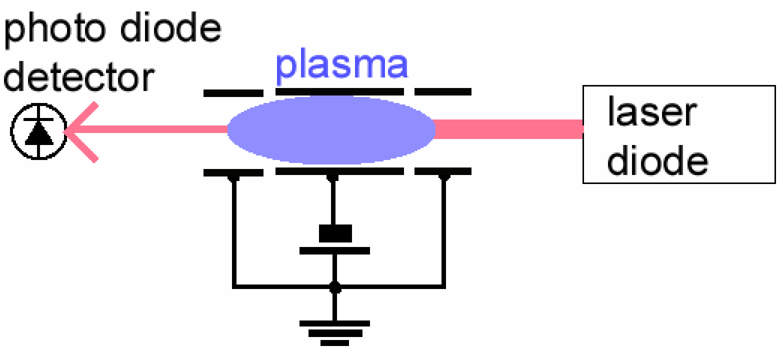




- He^-イオン源開発、He^0ビーム生成実験と並行して吸収分光/レーザー誘起蛍光計測装置の開発
  - レーザー計測装置のテストのための準安定粒子生成装置（中空陰極放電管, V_{dis}~200-300V, I_{dis}~100mA）
  - 準安定粒子生成装置のテストのための波長可変半導体レーザー（Ar 4s-4p, 826.452nm）

レーザー吸収分光実験(初期結果)





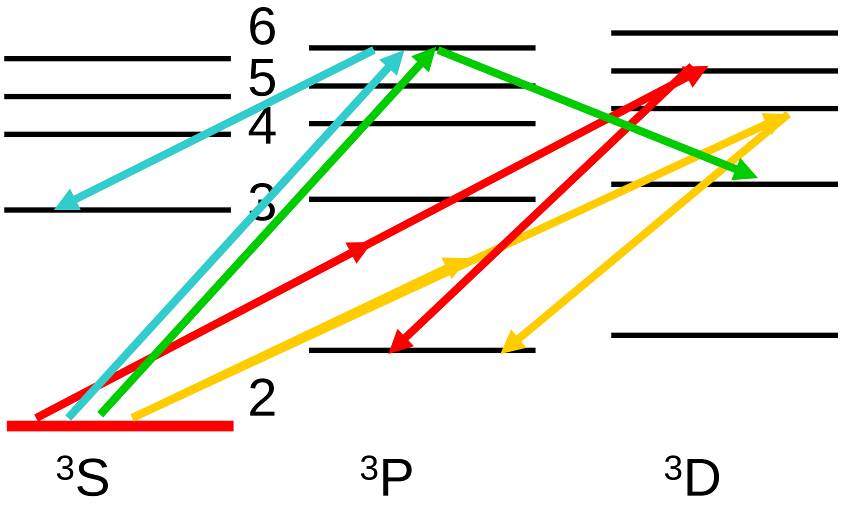
- まだ本当に初期段階ではあるが、準安定粒子生成装置と波長可変半導体レーザーを用いて吸収分光のデータが得られた
- 放電電流 増 → 電子密度 増 → 準安定粒子 増 → 吸収 増

まとめと今後の課題

- ヘリウム基底状態中性粒子ビーム生成に向けて、小型イオン源を用いたビームラインを構築し、原理検証実験を行っている
- He^0ビームにおける準安定状態について、プラズマ中でのビーム減衰およびレーザーを用いた占有密度計測法を検討した
  - 衝突断面積からビーム減衰を計算し、準安定粒子He*の割合によるビーム減衰の変化を評価した
  - 長さ1mのプラズマ柱ではイオン密度10^{13}cm^{-3}程度が必要である
  - 波長可変半導体レーザーを用いた吸収分光法による計測の可能性を見出した
  - レーザー誘起蛍光法について励起から受光系透過率まで考慮した受光光子数の評価を行い、計測の可能性を見出した
  - レーザー計測の実証のため準安定粒子生成装置を製作した

- 高密度ターゲットプラズマの生成およびプラズマ基礎特性の計測
- レーザー吸収分光を用いたHe*計測装置の開発

レーザー誘起蛍光法によるHe*計測



各手法におけるエネルギー準位・波長（上段）
各パラメータと1x10^{5}cm^{-3}に対する受光光子数（下段）

	準位1	励起波長	準位2	蛍光波長	準位3
a	2 ^{3}S	282.9nm	6 ^{3}P	836.1nm	3 ^{3}S
b	2 ^{3}S	282.9nm	6 ^{3}P	1099.7nm	3 ^{3}D
c	2 ^{3}S	633.1nm*2	4 ^{3}D	447.1nm	2 ^{3}P
d	2 ^{3}S	587.2nm*2	5 ^{3}D	402.6nm	2 ^{3}P

	$g/g+g$	$A/\Sigma A$	V[cm-3]	Ω[sr]	n_{photon}
a	0.75	0.0337	3.37	4.4x10^{-3}	0.6
b	0.75	0.0267	3.37	4.4x10^{-3}	0.5
c	0.83	0.790	7.85x10^{-2}	0.44	73
d	0.83	0.710	7.85x10^{-2}	0.44	66

$$n_{photon} = n^* \frac{g_2}{g_1 + g_2} \frac{A_{23}}{\sum_i A_{2i}} V \frac{\Omega}{4\pi} \eta$$

n_{photon}	受光光子数
n^*	準安定状態占有密度
g_i	準位iの統計重率
A_{2i}	自発遷移確率
V	観測体積
Ω	受光立体角
η	受光光学系透過率

- 手法a,b
  - 強度が弱い→検出効率について要検討
  - 積算により1x10^{5}cm^{-3}は検出可能（要迷光対策）
- 手法c,d
  - 二光子励起なので十分なレーザー強度が必要(≧100mJ/pulse)
  - 励起さえしてしまえば蛍光の観測は容易