

## A6. 微小信号計測(第 2 週目)

### プラズマ分光計測によるコインシデンス計測を利用した レーザー照射物質特定

電気電子情報工学専攻

兒玉研究室

担当: senmonA6@eie.eng.osaka-u.ac.jp

実験場所: レーザー科学研究所 L 棟 112

#### < 第 2 週目実験場所について >

第2週目の実験はレーザー科学研究所のレーザー装置を使用して行います。

第1週目と実験場所が異なるので注意してください。 緑の場所に集合時間に集まってください。



#### <実験に向けての注意事項>

本実験では高出力レーザーを用います。レーザーゴーグルを支給しますのでレーザー発振中は常にゴーグルを着用するようにしてください。安全の手引き p103 レーザー保護メガネの項を読んでください。発振を開始するときはその都度指示します。不用意にレンズやミラーの向きを変えるとレーザー光路が変わり、目などに入ると危険です。



## ＜実験目的＞

第1週目の実験において、複数の計測器を用いて同一の事象を計測し、その信号の相関から現象を特定するコインシデンス計測法に関して触れた。信号源から発生した信号のみを選択的に取り込むことができ、信号源と関係なく発生した信号、いわゆるバックグラウンド信号を大幅に低減することができる。第2週目の実験ではコインシデンス計測法を利用してレーザー生成プラズマから発生した放射光の波長分解計測を行い、バックグラウンドの多い計測における実験の精度向上の確認を行う。

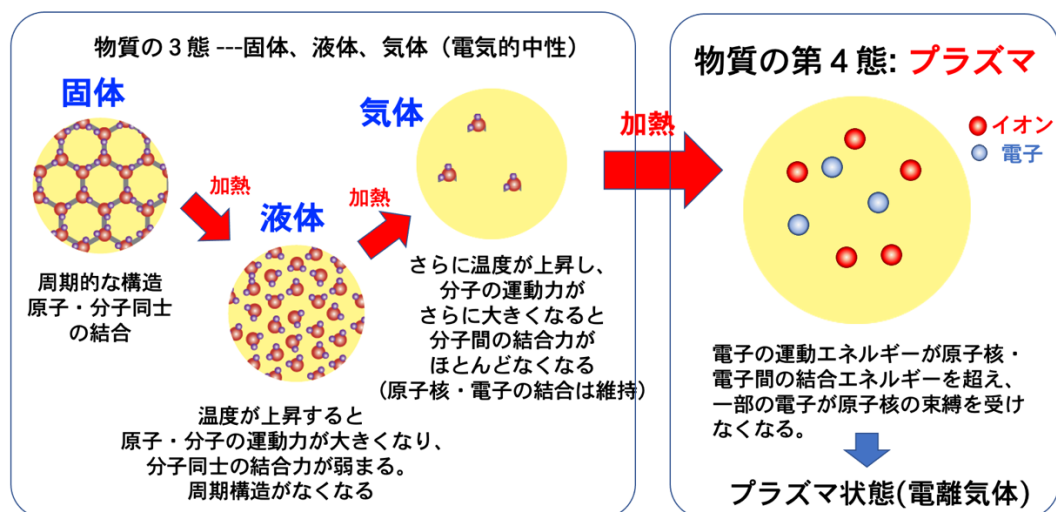
## ＜実験準備品＞

実験テキスト（本紙）、筆記用具、レポート用データの持ち帰りのため USB メモリを持参すること。  
（グループで一つ以上あれば良い）

## ＜高強度レーザー生成プラズマからの特性放射線＞

本実験では高強度レーザーにより生成されたプラズマから発生した放射光の波長分解計測を行う。ここではその放射線の発生原理に関して説明する。

### (1) プラズマとは



物質の状態は固体・液体・気体の3態がよく知られており、通常物質温度を上げると固体→液体→気体と転移していくことが知られている。この気体までの状態は電子・原子核が結合した原子のみが存在しており、電気的に中性を保った状態である。

その気体の状態からさらに温度を上げ、電子の振動エネルギーが結合エネルギーを超えると一部の原子が電子・イオンに分離される。この状態をプラズマと呼び物質の第4態として知られ

ている。プラズマは電子・イオンが分離しており電氣的性質を持つため、外部電界などで制御が可能となり、様々な応用に利用されている。

高強度レーザーなどを用いるとそのレーザー電界の高さから原子を容易に電離でき、プラズマを生成することが可能となる。レーザーにより生成されたプラズマを特にレーザープラズマという。

## (2) プラズマからの放射

プラズマは電子・イオンが分離して運動しており、絶えずそのエネルギー状態が変化するため、放射線が放出される。プラズマから放出される放射線の発生原理は主に二つに分類できる。

(a) 連続放射線 —— 自由電子の運動により発生する放射線

(b) 特性放射線 —— 原子核に束縛されている電子のエネルギー準位の変異

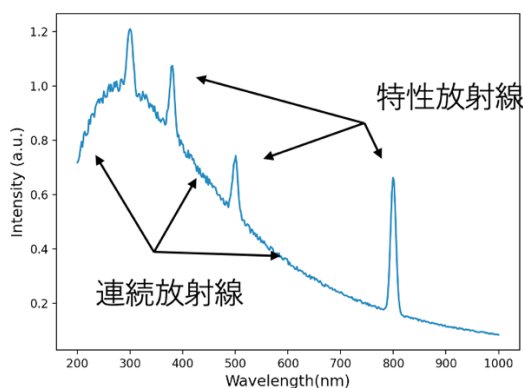
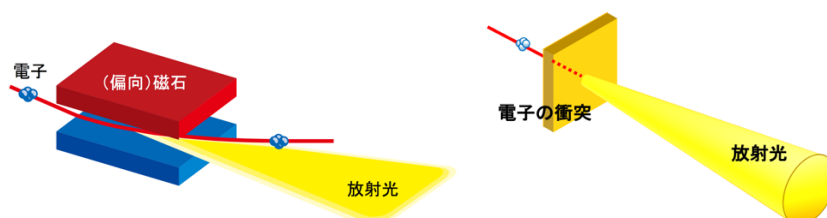


図. 典型的なプラズマからの放射線波長分布

### (a) 連続放射線

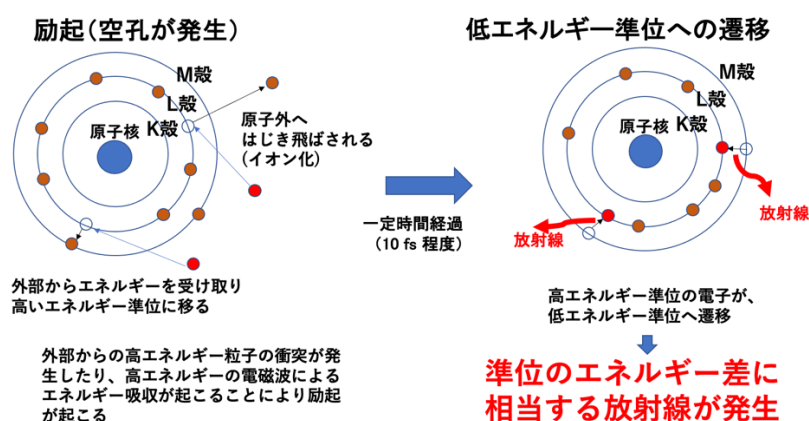
運動する荷電粒子が電界などにより外部から力を受け、加速が生じる時に発生する放射線。質量が軽く、速度が大きい電子により主に発生する。加速の大きさによって発生する波長が異なるため、広いエネルギー(波長)分布を持つ。さらに発生機構により黒体放射、制動放射、シンクロトロン放射、サイクロトロン放射などに分類される。



(左) シンクロトロン放射 (右) 制動放射

## (b) 特性放射線

原子核の周りにはその原子の種類によって決まったエネルギー準位に電子が束縛されている。それらの電子は外部からエネルギーを受け取るにより、初期準位よりも高いエネルギー準位へ遷移したり、原子核の束縛から外れ自由電子となることがある。この高いエネルギー準位への遷移を励起という。この励起に伴い、低エネルギー準位には空孔が生じ、不安定な原子状態となる。一定時間経過後、高いエネルギー準位にいる束縛電子が、空孔へ遷移することで安定状態に戻ろうとする。この低エネルギー準位へ遷移する時に、その準位のエネルギー差に応じた放射線が発生する。この放射線を特性放射線といい、波長幅の狭い単色の放射線となる。



電子のエネルギー準位は原子の種類により決まっており、特性放射線の波長強度分布はプラズマ内の原子核に拘束された電子の情報を表しているため、計測によりプラズマの原子種、電子温度・電子密度などがわかる。

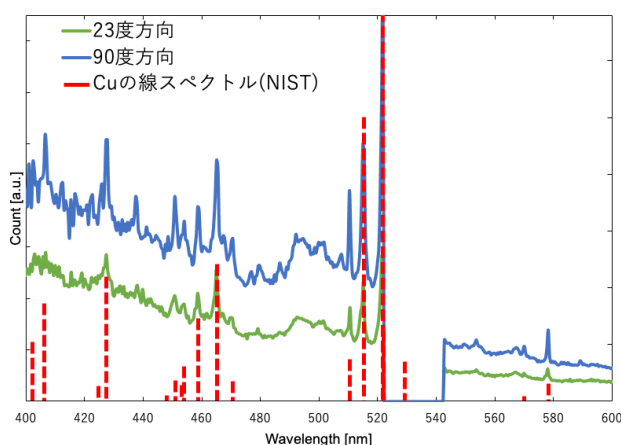


図 2. 典型的な銅プラズマからの放射線波長スペクトル。(青)(緑)は特定方向から計測した波長スペクトル。(赤)は銅 Cu の理論的なスペクトルの波長と強度

図 2 に示したようにプラズマからの波長解放射スペクトルを計測することでプラズマに含まれるイオンの種類などを特定できる。(実際のデータではここまで特定しやすくはないです)。

本実験では複数の種類のターゲットに対してレーザー照射を行い、未知のターゲットの原子種を放射スペクトルから特定する。

表. 銅Cu (1価) プラズマから放射される波長スペクトルデータ

Wavelength[nm]	遷移確率 $A_{ki}$ [ $s^{-1}$ ]	k準位エネルギー $E_k$ [eV]	k準位の多重度 $g_k$
402.2629	1.90E+07	6.867196	4
406.2641	2.10E+07	6.867646	6
424.8956	1.95E+07	7.993553	2
427.5107	3.45E+07	7.737027	8
448.035	3.00E+06	6.55241	2
450.9374	2.75E+07	7.993553	2
453.0785	8.40E+06	6.55241	2
453.9695	2.12E+07	7.883492	4
458.697	3.20E+07	7.80459	6
465.1124	3.80E+07	7.737027	8
470.4594	5.50E+06	7.737027	8
510.5541	2.00E+06	3.816692	4
515.3235	6.00E+07	6.191175	4
521.8202	7.50E+07	6.192025	6
522.007	1.50E+07	6.191175	4
529.2517	1.09E+07	7.737027	8
570.024	2.40E+05	3.816692	4
578.2132	1.65E+06	3.785898	2

参考データ: [https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html)

## <レーザーとは>

Laser とは **L**ight: 光, **A**mplification: 増幅, **S**timulate: 誘導, **E**mission: 放出, **R**adiation: 輻射, の頭文字を取った略称で、「輻射の誘導放出による光の増幅」を意味する。レーザーは人工の光で、特定の物質に人工的に光や放電などの強いエネルギーを与えて励起させることで発生する。

一般的なレーザーの特徴として以下のものが挙げられる。

- ✧ 単色性: スペクトル幅が非常に狭い
- ✧ 指向性: 光が拡散せず、広がらない
- ✧ 可干渉性: 波長と位相が重なった光の集まり(コヒーレンス)
- ✧ 制御性: 出力光に容易に変調をかけることができる

レーザーは自然光に比べて非常に高パワーであり、単色性と指向性が良いことから、レーザービームはレンズを用いて集光することで回折限界まで絞ることができ、エネルギー密度を高くすることができる。これはレーザーが集光性にも高輝度性にも優れていることを示している。

例えばレーザーのエネルギーが 50mJ、パルス時間幅が 5ns の場合、レーザーパワーは

$$P = \frac{\text{Energy}}{\text{Pulse Duration}} = 10^7 (W) = 10 (MW)$$

となり、このレーザー光をレンズを用いて 100  $\mu\text{m}$  の円形 $\phi$ に集光するとレーザー強度は

$$I = \frac{P}{\pi\phi^2} = \frac{10^7}{\pi(50 \times 10^{-4})^2} \approx 127 (GW/cm^2)$$

で表される。この場合、レーザー電界が  $E = 2.7 \times 10^3 \sqrt{I} = 1.0 (GV/m)$  に達し、通常の金属の電離エネルギーを容易に超えるため、物質をプラズマ化することができる。

## ＜実験計測装置＞

### a. 高強度レーザー装置

Continuum 社製の Powerlite DLS 9010 YAG レーザーを使用して実験を行う。レーザーの仕様を以下の表に示す。

表. YAG レーザーの仕様	
Energy	<1 J
Wavelength	532, 1064 nm
Pulse Duration (FWHM full width half max)	4 - 8 ns
Beam size	12 mm
Frequency	10 Hz

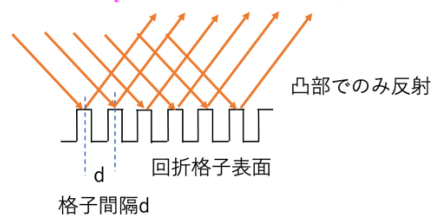
実際の実験では 10mJ 程度で行う。

### b. 反射型回折格子を用いた分光器(波長スペクトル計測)

一定の周期間隔で凹凸を繰り返す光学素子のことを回折格子という。下図で示したように各凹凸からの反射光は干渉しあい、波長によってその反射光が強め合う角度が異なるため、空間的に波長で分離した計測が可能となる。本実験で使用する分光器は Ocean Optics 製 HR2000+CG UV-NIR である。可視光(400nm-700nm)の波長領域での一般的な分光器です。

## 回折格子による波長分解 回折格子---凹凸が繰り返す光学素子

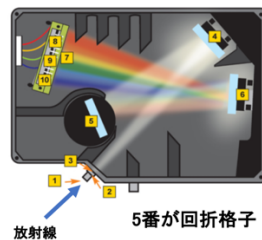
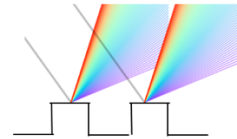
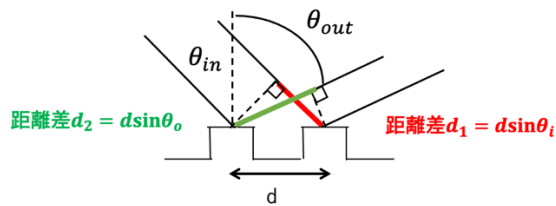
入射光（入射角 $\theta_i$ ） 反射光（反射角 $\theta_o$ ）



$|d_2 - d_1| = m\lambda$ を満たす方向で反射光が強めあう

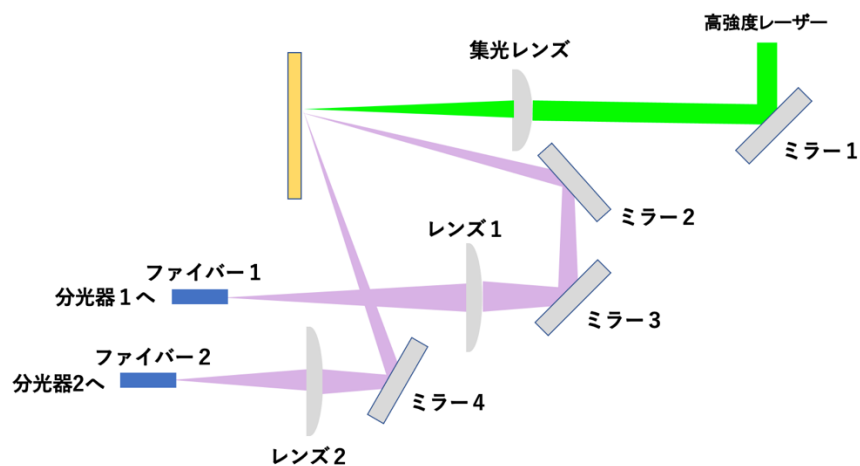
波長によって強め合う反射の方向 $\theta_o$ が異なる

光を波長ごとに空間的に分離できる

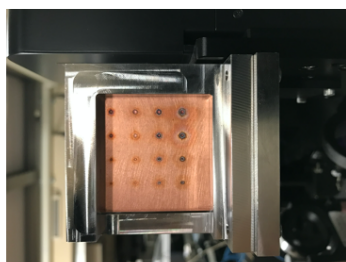


## <実験概要>

### ☆ 実験配置



## ☆ 実験試料



照射後のターゲットの状態

今回の実験では4種類のターゲットを使用しています

1. 銅Cu
2. シリコンSi
3. 炭素C
4. 鉄Fe

## < 計測・課題 >

- 各々それぞれ 5 個のターゲットを照射し、その分光スペクトルを計測
- 1. 添付のエクセルファイル(NIST\_Spectral\_data.xlsx)の理論スペクトルデータと比較してターゲットの種類をそれぞれ特定する。
  - ターゲット種類は個人ごとに不特定です
  - 銅 Cu、シリコン Si、炭素 C、鉄 Fe のいずれかです
  - 全ての種類のターゲットが含まれているとは限りません
- 2. 複数の方向から計測するコインシデンス計測の効果について簡単に述べなさい

## < レポートについて >

1. 実験目的、実験装置、手順に関しては記載しなくて良い。
2. 課題で指定された計算結果、グラフを載せること。その際、縦軸、横軸などの単位もきちんと記載すること。
3. 参考文献などはきちんと記載すること。
4. 1週目分、2週目分(別実験指導書)を合わせて提出とする。
5. レポート提出期限は第2週目実験日から 1 週間とする。
6. レポートは word か pdf ファイルとしてメールにて提出: [senmonA6@eie.eng.osaka-u.ac.jp](mailto:senmonA6@eie.eng.osaka-u.ac.jp)
7. レポートのファイル名を 班名\_学籍番号\_名前.doc, もしくは班名\_学籍番号\_名前.pdf  
(ファイル名例) 第 1 班\_08D\*\*\*\*\*\_中村浩隆.doc