

レーザー誘起ブレイクダウン分光分析装置用試料ホルダの製作

中村信行研究室
直井祐樹

1. 背景・目的

鉄よりも重い元素は r プロセスによって作られると言われている [1]。r プロセスとは、中性子が崩壊して電子と陽子に分裂するよりも速く、原子核が中性子を捕獲し、重元素が合成されることを意味する。r プロセスが起こる天体現象の一つとして提唱されているのが中性子星合体である。実際に直接観測された中性子星合体の電磁波をモデル計算と比較することにより、中性子星合体で重元素が生成されていることが示唆された [2]。それによって中性子星合体が重元素の起源であるという説が有力になっている。中性子星合体から放出される電磁波のモデル計算は現状では限られた元素の原子データのみで行われている [3]。

より精度の高い計算をするためには、中性子星合体によって生成される広範な重元素について、遷移確率等の束縛-束縛遷移のデータが求められている。そこで我々の研究室では、種々の重元素の束縛-束縛遷移の遷移確率を求めるためにレーザー誘起ブレイクダウン分光分析装置 (Laser Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS) を立ち上げている。しかし立ち上げ段階において、いくつか課題がある。その一つが連続的に定量的な測定ができないことである。レーザーを試料の同じところに照射し続けると、試料にクレーターができてしまい、同じ条件で連続的な測定ができない。そこでレーザーが常に試料の新しいところに照射される回転機構を製作した。

2. 実験装置

2.1 レーザー誘起ブレイクダウン分光法

レーザー誘起ブレイクダウン分光 (Laser

Induced Breakdown Spectroscopy: LIBS) 分析装置とはパルスレーザーを試料へ照射することによってプラズマを発生させ、プラズマからの発光を分光して検出する装置である。LIBS の一般的な概略図は図 1 のようになっている。

LIBS ではまず、高強度のパルスレーザーを試料へ集光照射して試料の表面をプラズマ化する。このときにできたプラズマは高温で、非常に短い時間において局所熱平衡状態になっている。その後、励起している原子やイオンは発光して基底状態へと戻っていく。このときプラズマから放射した光を分光して検出器を用いて検出している。

我々が立ちあげている LIBS の装置構成として、レーザーに Q スイッチ Nd:YAG レーザー、光学素子にミラーや集光レンズ、ファイバー、エシエル型分光器、検出器に scientific Complementary MOS (sCMOS) を用いている。

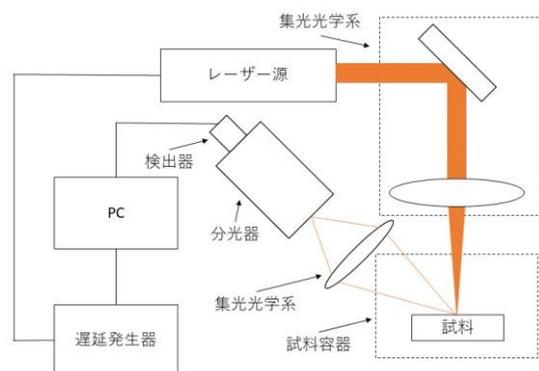


図 1. LIBS 装置概略図

2.2 LIBS を用いた実験の観測例

LIBS を用いて遷移確率を求める場合、プラズマが短時間において局所熱平衡状態にあり、

粒子密度がボルツマン分布に従っていると仮定する。このとき上準位から下準位への発光線の発光強度 I とプラズマ温度 T の関係は次のようになる [4]。

$$\ln\left(\frac{I\lambda}{gA}\right) = -\frac{1}{kT}E + \ln\left(\frac{hcN}{4\pi Z}\right) \quad (1)$$

このとき λ は波長、 g は上準位の統計重率、 A は遷移確率、 k はボルツマン定数、 E は上準位のエネルギー準位、 h はプランク定数、 c は光速、 N と Z は原子またはイオンの数密度と分配関数を示している。観測した発光線において式(1)に用いる値がわかっているスペクトルを用いてプロットしたものが図 2 となる [4]。図 2 において、横軸が上準位のエネルギー準位 E 、縦軸が式(1)における左辺を示している。図 1 では観測結果にばらつきはあるものの、直線でフィッティングされていることが分かる。このばらつきはプラズマ温度の不安定性や発光強度の不安定性によるものである。図 2 において観測結果が直線を示すことから、発光強度 I とエネルギー準位 E が分かれば、遷移確率 A を求めることが可能になることがわかる。

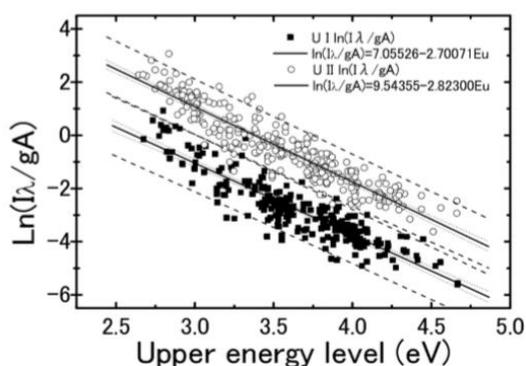


図 2. 観測した発光線のボルツマンプロット [4]。黒い四角がウランの中性原子、白い丸がウランの 1 価のイオンのボルツマンプロットを示している。図中の実線がリニアフィッティングした直線、破線は信頼限界、点線は推定限界を表している。

3. 試料回転機構

3.1 全体構成

製作した試料回転機構の断面図を図 3、設置図を図 4、その内部を図 5 に示す。また回転機構を動かすために使用する回転導入機 (RRM-133.11) を図 6、その仕様を表 1、試料の回転とビームウエストの比較を表 2 に示した。

図 3 では、最上部にあるステッピングモーターが回転することにより、高さ方向に直線上にある六角溝棒、六角棒、寸切りボルト、試料ホルダーも同時に回転する。このとき寸切りボルトは真鍮部品のねじ穴に沿って上昇し、六角棒は六角溝棒やモーター接続部品の中に入っていく。これにより試料の回転と高さ方向への移動を可能にしている。つまりレーザーは試料に対してねじの溝に沿った形、すなわち螺旋状に照射される。

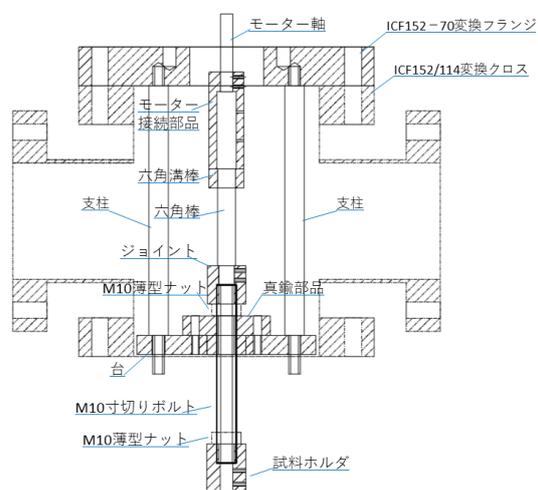


図 3. 回転機構の断面図

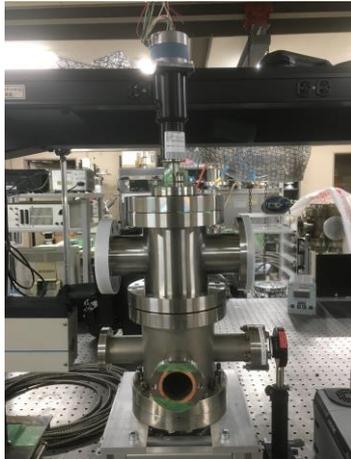


図 4. 回転機構設置図

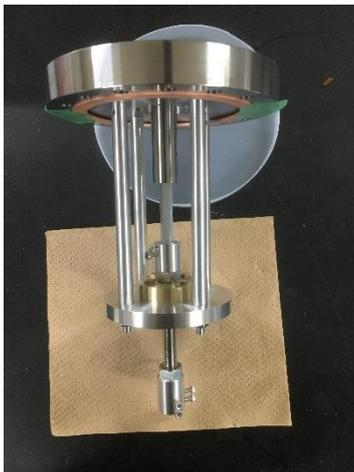


図 5 回転機構内部



図 6. ステッピングモーター

表 1 回転導入の仕様

定格電圧	DC5V
定格電流	0.7A
温度範囲	-40°C to 65°C
ステップ角	1.8°

表 2 試料の回転

試料の直径	6mm
1 周の長さ	18.9mm
1 ステップの長さ	95 μ m
ビームウエスト	約 50 μ m

次に、表 2 に示したように試料ホルダは直径 6mm の試料を固定できるように設計した。寸切りボルトのピッチの長さを 1.5mm とすると、1 周あたり 18.9mm だけ試料が回転することになる。ステップ角が 1.8° より、1 ステップの長さは 95 μ m になる。ビームウエストの大きさは計算により約 50 μ m と求まるので、1 ステップでレーザー光が試料の新しいところに照射されることが分かる。

3.2 長さの決定

製作した図 3 の試料回転機構はストロークが 40mm になるように設計した。ストロークとは試料が高さ方向に対して直線で移動することができる長さを意味する。またジョイントなどで接続するための長さは 10mm としている。ただし薄型ナットは 6mm として計算している。

図 3 から、モーター接続部品はモーター軸と接続しているため 40+10=50mm と計算できる。この様に六角棒は上下 2 ヶ所接続しているため 60mm となる。寸切りボルトは上下 2 ヶ所、薄型ナット 2 ヶ所、真鍮部品の高さ 20mm から $40+(10 \times 2)+(6 \times 2)+20=92$ mm

となる。ストロークの長さから直接求められるのはこの3つで、モーター軸から試料ホルダまでのそれぞれの長さや接続のための長さを踏まえた合計を表3にまとめた。また図7に各パーツの断面図を示した。

表3 モーター軸から試料ホルダまでの長さ

	長さ(mm)
モーター軸	40
モーター接続部品	50
六角溝棒	10
六角溝	60
M10寸切りボルト	92
試料ホルダ	25
接続を踏まえた合計	247

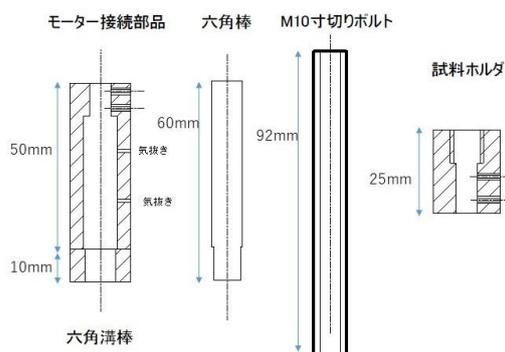


図7. モーター軸上の各パーツ。六角溝棒の下10mmは接続のため円柱形になっている。

4. まとめと今後の展望

本研究では LIBS 装置に用いる試料回転機構を製作した。製作において、ストロークが40mmになるように各部品を設計した。

今後は、レーザーや検出器を制御しているPCを用いてステップモーターを動かすための環境を整え、回転機構の動作確認を行う。そして実際に試料を用いて実験を行い、観測データと使用後の試料から連続的に定量

的な観測が行えたかどうかを検証する。その後重元素を試料として使用して分光実験を行い、遷移確率等の束縛—束縛遷移のデータを収集する。

参考文献

- [1]和南城伸也
超新星爆発と中性子星合体—r プロセス元素の起源として 天文月報 2014年1月
- [2]Yousuke Utsumi
J-GEM observations of an electromagnetic counterpart to the neutron star merger GW170817
Astron.Soc.Japan(2017)69(6),101(1-7)
- [3]Masaomi Tanaka
Properties of Kilonovae from Dynamical and Post-merger Ejecta of Neutron Star Mergers The Astrophysical Journal, 852:109 (2018)
- [4]赤岡克昭, 大場正規, 宮部昌文, 音部治幹, JAEA-Research 2015-012 (2015)