

金属-プラズマ転移を利用した X 線点光源の開発

先進理工学科 蛭田興明

指導教員 米田仁紀 教授

はじめに

X 線は、多くの物質の透過像をとること、微細な構造を得ることができるため、物性研究や分子科学研究、医療分野応用など広く使われている。X 線の発生方法としては、高電圧によって加速させた電子をフィラメントに照射させてその励起光を得る方法や、X 線自由電子レーザーのように磁場によるシンクロトロン放射を利用する方法、短パルスレーザーや高電圧パルスで金属や気体に照射・印加し高温化する方法などがある。様々な応用で要求される光源は異なってくるが、エネルギー効率改善や光源大きさの縮小化など、未だに改善する開発研究が進んでいる状況にある。

最近、銅や金などの特定の金属が固体からプラズマ状態に向かう遷移過程の Warm Dense Matter 状態領域において、金属である物質の導電率が 3 桁程度急激に低下することが、実験・理論研究で明らかになってきた。この物質変化を用いれば、高温、高圧の高エネルギー密度状態を空間的に局在した形で短時間で生成できる可能性がある。そこで、本研究では、通常のパルス放電と、レーザーによる加熱を組み合わせた形の高効率微小 X 線源の開発を行った。具体的には、直径 $30\ \mu\text{m}$ ~ $150\ \mu\text{m}$ の銅線にレーザーを用いたスパークギャップにより数 kA のパルス電流を流し、その銅線の一部にレーザーパルスを照射し、そこだけを Warm

Dense Matter 状態に遷移させ、エネルギー付与領域を限定させたものを作る方法である。実験では、可視域の発光画像、発光波形、電流波形の変化を、レーザーを照射させた場合とさせなかった場合で比較し、最適な発光条件を調べることを行った。

Warm Dense Matter

固体密度状態で温度が数千から前後における固体-プラズマ中間領域状態は、Warm Dense Matter(WDM)と呼ばれている。この領域においては、固体物理学の理論を適用しても、プラズマ物理学の理論を適用しても理論値から大きくずれてしまうことが多く、さらにまだまだ十分な実験データが出揃っていないといった現状があり、物理学の新たな分野を開拓する上での良い題材となっている。例えば、銅線に大電流を流した場合において、固体物理学的には、自由電子のフォノンとの散乱が温度上昇とともに増加し、抵抗率が上昇する。一方で、プラズマ物理学的には、電子温度の $-3/2$ 乗に比例して低下することが予測されているが、WDM 領域では、抵抗値がこれら 2 つのモデルでは説明できない異常な値になってしまうことが観測されている。また、流体力学的な振る舞いを考えると、WDM 領域では、金属の膨張が止まることが観測されており、この気液 2 層流体領域において、臨界点の理論的予測は、自由電子、束縛電子、イオン、中性原子のす

べてを考慮する必要があるといった点から、非常に難しいという現状がある。

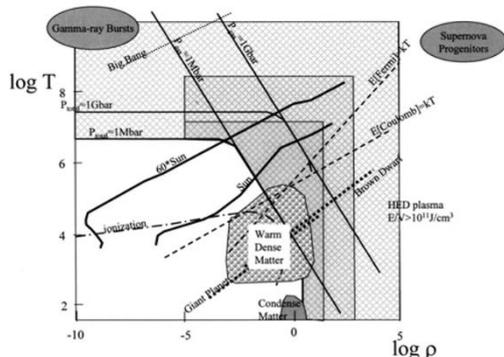


図 1. Warm Dense Matter

前項で説明したように、Warm Dense Matter とは物質に高密度のエネルギーを与えることによって再現できる新たな物性である。この物質状態は高エネルギー密度状態の中では最もエネルギー密度が低く、 $10^{10} \sim 10^{11} \text{ J/m}^3$ の領域であることが多い。このため、微小体積における WDM 状態は、 $2 \sim 3 \text{ mJ}$ 以下のエネルギー付与で可能となる。そのため、小さいターゲットを用いることによって、通常の実験室で用いられているレーザーでこの物性状態を再現することが可能である。

前項の説明でも触れたが、銅線に大きな電流を流して高速で加熱しプラズマ化する場合、従来の固体物理学やプラズマ物理学の理論に基づく値よりもはるかに抵抗率が上昇することが今までの実験によって観測されている。そこで本研究では、直径 $30 \sim 150 \mu\text{m}$ の微細な銅線を用い、これに 10 kV の高電圧をかけて瞬間的に大電流を流し、加熱することによって WDM 状態を再現し、その後レーザーパルス照射によるターゲットの発光を観測した。仮に WDM 状態で発光していれば抵抗

率が急激に下がっているはずであるため、レーザーを照射させた場合とさせなかった場合の波形を比較し、その真偽を追及した。

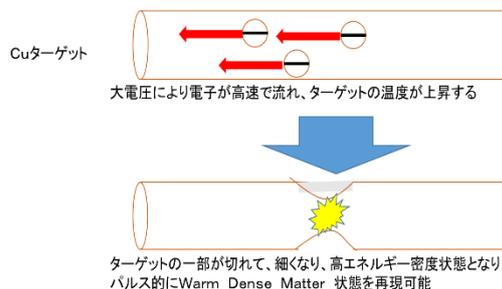


図 2. 本研究における Warm Dense Matter 状態の再現

銅の発光実験

実験セットアップ図を以下に示す。まず、コンデンサーに DC 電源を接続し、 10 kV の電圧を帯電させた。本研究では、ターゲットに瞬間的に大きな電流を流す必要があるため、高速でスイッチングできる素子を利用する必要がある。そのために、LTSG(レーザートリガースパークギャップスイッチ)を作成した。これは同サイズの金属を交互に設置し、片方にレーザーパルス照射させることによってもう片方の金属をプラズマ化することで高速に電流を流すことのできる素子であり、これによってパルス的に電流を流し、銅線を加熱させた。しかし、電流のみで加熱すると温度上昇が不十分で、さらに電流の場合、銅全体が加熱されてしまい局所的に高エネルギー密度状態を再現できないといった問題点があるため、本研究では、電流に加え、レーザーパルスによる加熱による温度上昇を目標とした。

まず、ピックアップコイルを用いて銅に流れる電流の時間変化を測定した。もし前

述の方針による実験で銅線が Warm Dense Matter 状態に遷移していれば、導電率が固体状態と比較して 3 桁程度急激に下がることが予測されるため、銅線に流れる電流波形を、固体状態、電流を流した状態、レーザーと電流双方の状態と比較することによって、導電率の変化を調べた。

また、それぞれの状態におけるターゲットの発光画像と電流波形の関係を、レーザーを照射させた場合とさせなかった場合とで比較し、最適な条件を定めた。銅が発光している時間をフォトダイオードを用いて検出できるように努めた。回路に電流を流した直後にレーザーによる加熱を行うと、銅線に電流が流れていない状態で加熱されてしまい、十分に加熱されない可能性があるため、スイッチと加熱用のレーザーの間に約 16m の光路差をつけ、銅に十分に電流が流れているときにレーザー照射を行うように心がけた。

最後に、それぞれの条件下における発光画像を、CCD カメラに対物レンズを取り付けた

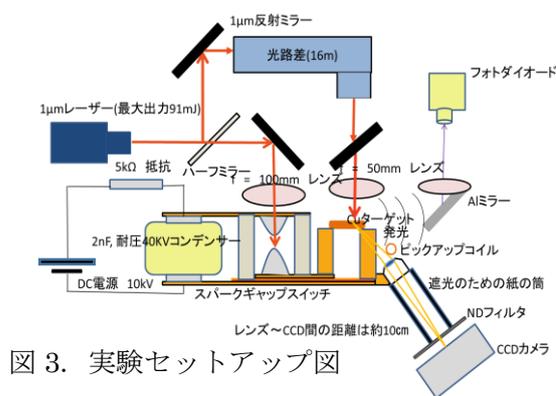
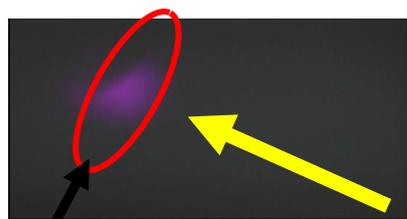


図 3. 実験セットアップ図

実験結果

条件を変えた場合における銅の発光画像、およびその強度分布の比較を図に示す。この 3 つの図および強度分布を比較すると、

レーザーによる加熱と電流による加熱を組み合わせた場合において、明らかにそれらの影響によるものとは異なる光が認識されることが分かった。ただ、本研究では画像の撮影を通常の CCD カメラで行っており、加熱によるレーザーパルスのタイミングによって得られる画像が変わってしまう可能性も否定できない。



銅線の位置 レーザー照射

図 4. 発光画像(レーザー照射のみ)

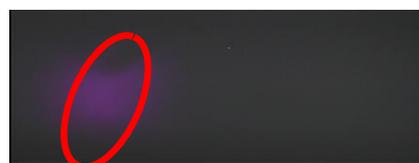


図 5. 発光画像(電流のみ)



図 6. 発光画像(電流、レーザー双方)

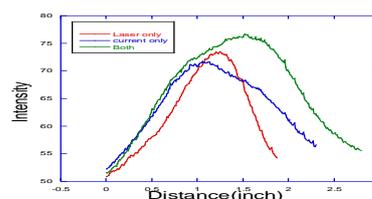


図 7. 発光強度分布の比較

次に、電流が流れた時間と銅の発光時間の関係を以下に示す。

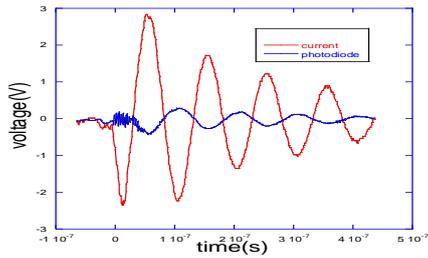


図 8. 発光時間と電流波形の関係(電流のみ)

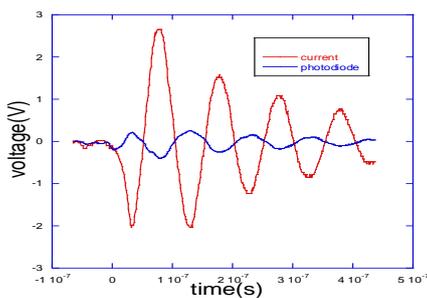


図 9. 発光時間と電流波形の関係(電流、レーザー双方)

最後に、両者の電流波形の比較を行った図を以下に示す。

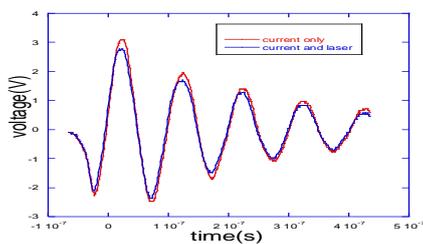


図 10. 銅に電流を流した場合、および電流とレーザー双方による加熱をさせた場合の電流波形の比較

結論

直径 $100\mu\text{m}$ の銅ターゲットにギャップスイッチを用いてパルス的に電流を流し、同時にレーザー照射の温度上昇による固体からプラズマに転移する状態における発光を利用した光源を開発した。レーザー照射のみ、電流のみ、双方同時によるターゲットの発行画像を撮り、それぞれの強度分布を割り出した結果、双方同時の場合において、明らかに電流によるものでもレーザーによるものでもない光が認識された。

さらに、フォトダイオードを用いて、電流と発光時間の関係を比較することができた。最後のデータによると、概ね電流のピーク位置において発光していることが分かった。銅線に電流のみを流した場合と電流に加えてレーザーパルス照射させた場合の電流波形を比較すると、レーザーパルス照射させた場合の立ち上がり電流の減衰が大きかった。

今後の展望としては、よりターゲットを加熱しやすくするために、スイッチ用と加熱用のレーザーを別々に使い、さらに真空中で同様の実験を行いたいと思う。また、プリズムを用いた発光波長の特定も行ってきたい。