

LHDトムソン散乱計測 ～2億3,000万度を光で測る～

山田 一博

核融合科学研究所の大型ヘリカル装置(LHD)では、プラズマの中の電子を最高2億3,000万度まで加熱することに成功しています。図1はその時の電子温度の測定結果です。2億度という温度はどうやって測るのでしょうか？ガラスは1,000度前後、鉄や銅などの金属は1,500度前後で溶けてしまいますので、普通の温度計では測れません。プラズマの温度を測定する方法の一つとして、「光」を利用する方法があります。光なら2億度のプラズマの中へも簡単に入れることができます。

皆さんは救急車のサイレンの音が、救急車が近づいてくる時は高い音で聞こえ、遠ざかる時は低い音で聞こえるという経験がありませんか？この現象を、この現象の公式を初めて導いたオーストリアの物理学者クリスチャン・ドップラー(1803～1853年)にちなんで「ドップラー効果」と言います。ドップラー効果は動いているものの速度が速くなり光速に近づくと光でも観測できるようになります。音のドップラー効果は音の高低となって現われますが、光の場合は光の色が変わります。2億度のプラズマ中の電子は平均的に光速の3分の1程度、秒速10万kmぐらいの非常に速い速度で運動しています。このような高速電子に光を当てると光のドップラー効果が観測できます。ドップラー効果でどれだけ光の色が変わったかを観測すれば、その電子の速度が分かります。速度が分かると、その速度から温度に換算できます。LHDではレーザー光線をプラズマの中へ入射し、ドップラー効果で変化した光の色を観測することでプラズマの温度を求めています。また、光が電子に当たって跳ね返ってくる現象は、この現象を初めて理論的に研究したイギリスの物理学者ジョセフ・ジョン・トムソン(1856～1940年)にちなんで「トムソン散乱」と言います。そして、この現象を利用してプラズ

マの温度を測定する装置をトムソン散乱装置と言います。トムソン散乱装置は世界中の核融合プラズマ実験装置で、プラズマの温度計として広く利用されています。

核融合科学研究所で開発したトムソン散乱装置は赤外線レーザーをプラズマの中へ入射します。入射する光は赤外線なので目には見えませんが、跳ね返って来る光はドップラー効果で色が変わります。プラズマの温度が高ければ高いほど赤から黄色、緑、青そして紫色へと人の目にも見える範囲まで広がった光へ変化します。2億3,000万度となると、青、紫を乗り越えて紫外線の範囲にまで広がった光になります。ただ、電子は半径が 3×10^{-12} mm(1兆分の3ミリメートル)と非常に小さい粒子なので、光を当てて跳ね返ってくる光を見ようとしても、なかなか上手く当てることができません。光がLHDのプラズマの中の電子に当たって跳ね返ってき

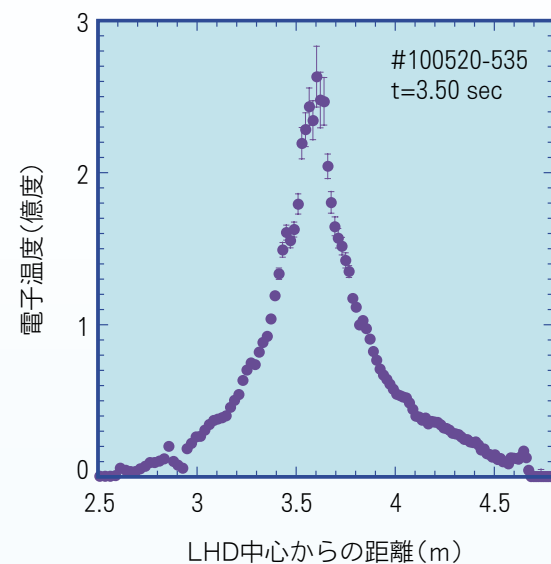


図1 LHDトムソン散乱装置で計測したLHDプラズマの温度。空間144点の温度を一度に測定できます。

て観測できる確率は1000億分の1と非常に低く、1000億個の光子を入射しても1個しか観測できないのです。そこで、まず入射するレーザーは非常に強力なものを用意します。LHDのトムソン散乱装置では2億ワットのレーザーパルスを毎秒10回発生できるレーザーを2台、1.6億ワットのレーザーパルスを毎秒30回発生できるレーザーを1台使用しています。図2は1.6億ワットのレーザーパルスを毎秒30回発生できるレーザーの写真です。この3台を同時に発射すれば一度に5.6億ワットのレーザーパルスをプラズマ中へ入射することもできます。

プラズマの中で運動する電子に当たって跳ね返ってきた光は一種の反射望遠鏡を使って集めます。LHDトムソン散乱装置では、弱い光をできるだけ沢山集めるために縦1.8m×横1.5mの長方形の大きな凹面鏡を使っています。図3がその写真です。日本で一般公開されている反射望遠鏡で一番大きいものは兵庫県立西はりま天文台公園の「なゆた」で、その口径は2mですから、それに準ずる大きさがあります。

強力なレーザーを入射し、跳ね返ってくる光を大きな反射望遠鏡で集めても、その光はまだ十分な明るさではなく、暗すぎて人の目では感じられないぐらいの強さしかありません。条件が良い場合でも数千個から1万個程度の光子しか捕まえる

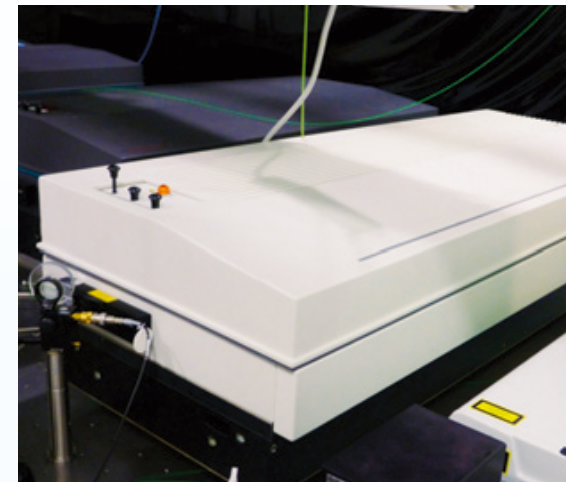


図2 LHDトムソン散乱装置の赤外線レーザー装置。このレーザーは1.6億ワットのレーザーパルスを毎秒30回発生します。

ことができません。そこで、光子を1個、2個単位でも検出できるAPD(アバランシェフォトダイオード)という超高感度な光検出器を使います。このAPDは東北大学・元総長で発明の巨人ともよばれる日本の西澤潤一博士が発明したものです。

1億度、2億度という高温プラズマを発生させるためにLHDでは数多くの先端技術が用いられていますが、そのプラズマの温度を測定するためにも、いろいろな最先端の光技術が応用されています。LHDトムソン散乱装置は、図1のようにプラズマの端から端まで144点の温度を、1秒間に最高100回測定できます。LHDトムソン散乱装置は15年前に開発されたものですが、今でも世界トップクラスの性能を誇っています。

(高温プラズマ物理研究系 准教授)

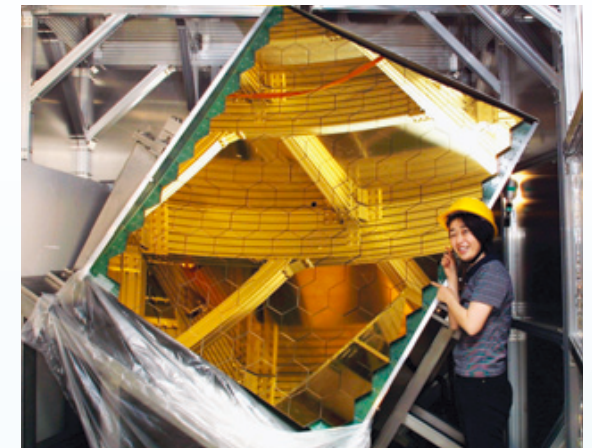


図3 高さ1.8m×幅1.5mの凹面鏡。金色の部分が鏡です。この凹面鏡は、LHDの観測窓が傾いて付いているため、この傾きに合わせて斜めに置かれています。