

高校生のページ

プラズマの光から何がわかる？ ～プラズマ分光学への第一歩～

エネルギー理工学研究所 エネルギー生成研究部門複合系プラズマ研究分野（稲垣研）
門 信一郎

1. はじめに

中学理科の「電気」の内容で、オーロラ、雷、ネオンサイン、蛍光灯、真空放電（正しくは気体放電）など、「プラズマ」という用語は使われなくても、皆さんは、プラズマ現象について多く学んできています。さらに高校の物理や化学では、水素原子が発する輝線スペクトルや炎色反応について学び、気体が発光する原理にも触れつつあると想像します。そこで、本稿では、自然界のプラズマや実験室のプラズマを例に、その現象解明に大きな役割を担っている「分光学」について紹介します。

2. 地上の放電現象、天空の光とプラズマでつながる！

天空からは様々な光がやってきました。太陽光は私たちに最もなじみのある光です。1666年、ニュートンはプリズムを用いて初めて太陽光を観察し、虹色の「連続スペクトル」を発見しました。1814年、フラウンホーファーは三角プリズムを望遠鏡の対物レンズの前に配置し、精密な角度調整によって太陽光のスペクトルを観測し、574本ものとびとびの黒い暗線（吸収線）を同定しました（図1）。さらにシリウス星に現れる暗線と比較し、地球ではなく、太陽由来のものであることも示しましたが、その物理的な解明にまでは至れませんでした（彼はその後、260本の平行ワイヤーを使った回折格子分光器を開発[1]）。太陽や他の様々な恒星が発する光のスペクトルだけでなく、北極や南極近辺に見られる大気発光現象であるオーロラも天空からの光です。

一方地上では、ボルタ電池と真空技術の発明で、ペトロフ、デービー（1803年）が独立にアーク放電ランプを発明しました（1821年に光がアーク状に曲がることから命名）。本格的な気体放電（グロー放電）をファラデーが確立（1835頃）すると、真空技術の進歩とともに放電研究が進展しました。クルックスは、ファラデーの講演録「物質は、固体・液体・固体・ラジアント（radiant matter）からなる」、を引用し、後に陰極線（1876年）、現代では電子ビームと言われる radiant matter の研究を精力的に行い、エッ

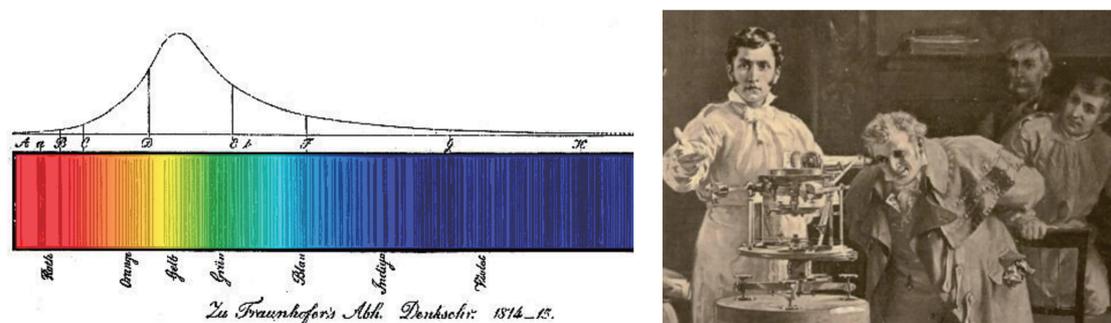


図1 フラウンホーファーが発見した太陽スペクトルにおける無数の暗線（1817年図の再現[2]）と、演示実験の様子 [Public domain, Wikimedia]。望遠鏡の先にプリズムが見える。

クス線を発生するクルックス管 (1872 年) を発明しました。中学高校の理科で学ぶ**真空放電**の項目には、グロー放電と陰極線が同等に掲載されていますが、**プラズマ中の電子の衝突で気体が発光するグロー放電と、陰極から放出された電子ビームの衝突によりガラス管が光る陰極線は異なる素過程によるものです。**

このグロー放電陽光柱に電極を挿入し、電流電圧特性を調べることで、その物性が次々と明らかになってきました。陽光柱の中の物質 (正確には物質の状態) をラングミュアは「**プラズマ**」と名付けました。1928 年 6 月 21 日のことです (プラズマ記念日?)。

1838 年にファラデーが気体放電によってオーロラに似た光を発光させると、両者の関連性を見出そうとする研究が盛んになりました [3]。オーロラの発光が物質固有の色であろう、と思いついたのは、ベンゼンとキルヒホフの**炎色反応**のことを知ったオングストロームです。キルヒホフは、1859 年、この暗線が太陽大気の原因による吸収スペクトルであることを示し、オングストロームはオーロラグリーンとして知られる代表的な緑色の発光 (557.7 nm) のスペクトルを観測し、これを 5567 という数字で表しました (1868 年)。この値は、**オングストロームという長さの単位の起源**にもなりました。1923 年になると、夜空に微弱なオーロラグリーンを放つ**夜間大気光**が干渉法といわれる手法で測定され、 5577.350 ± 0.001 という正確な値が得られています。やがて、太陽はプラズマの塊、オーロラは地球上空のプラズマによる発光現象という事が明らかになっていきます。

3. プラズマ発光分光法

3.1 プラズマで炎色反応?

光のスペクトルとは光の強度の波長依存性です。スペクトルには 2 種類あります。輝線 / 暗線を表す**線スペクトル**と**連続スペクトル**です。線スペクトルの波長は物質固有のものなので、炎色反応のように、元素分析さらには、その価数の同定が可能です。炎色反応では、火炎の熱エネルギーを励起源にするので、アルカリ金属やアルカリ土類金属など、電子の結合の弱い、周期表の左寄りのものが主体となりますが、プラズマを使えば、原理的には (可視光に限定しなければ) **周期表のあらゆる元素を光らせることができます** (図 2)。たとえば法医学や科捜研のドラマにでてくる (と思う)、ICP 発光分光分析装置は、アルゴンの高周波誘導結合プラズマ (ICP) を励起源として、元素を光らせ、スペクトルの波長から物質の種類を、スペクトル強度から濃度を特定するものです。

一方、連続スペクトルは温度で決まり物質によりません。これは放射温度計の原理と同じです。青白

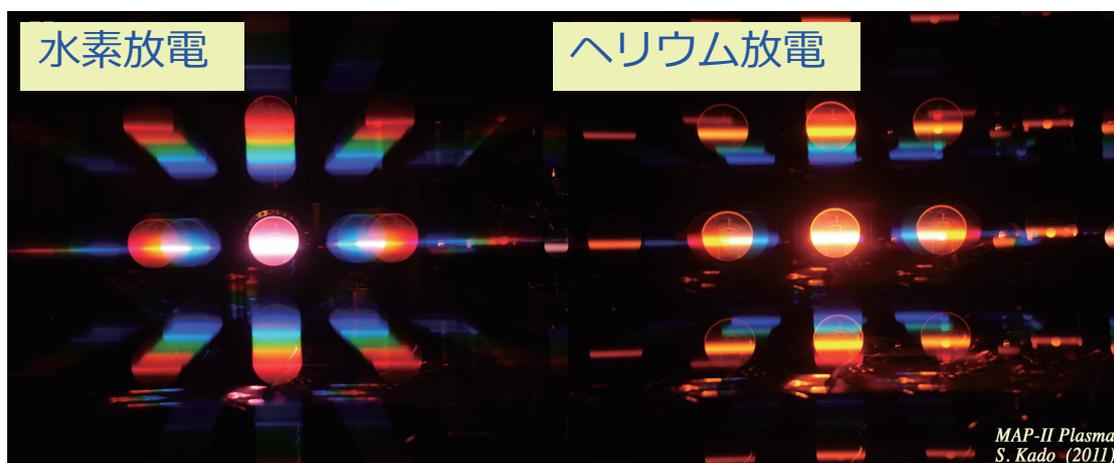


図 2 直線型装置 MAP-II 装置における、水素とヘリウムの直流アーク放電放電のスペクトル写真。クロス回折格子フィルムを通してカラー撮影。

い星は高温、赤い星は低温、というように、星の温度も連続スペクトルを用いて測定します。放射温度計は「透き通った物質」の温度は測れません。星はプラズマの密度が極めて高いために、分光学の言葉を借りれば「光学的に厚い」＝「透き通っていない」と言います。

3.2 励起・発光の物理モデル

プラズマの輝線強度は、多くのパラメータ（電子密度、電子温度、対象とする元素の種類や密度、輝線を発する量子準位）に依存します。前節のICP分析は、励起源のプラズマ条件を一定にし、既知の濃度の物質を測定して較正されている「検量線」を使って、対象物質の濃度を推定します。しかし、プラズマ実験の多くは、プラズマも混入元素も未知であるため、輝線強度を与える「物理モデル」を構築して、それを数式で表現する必要があります。まずは図3 (a) を例にしましょう。[M] から[L]への水の流量を測定量とします。この場合、[M]の容器に着目します。[M]へは[K]にある水から毎分10%を汲み上げて注ぎます。[K]以外の所の水からは汲み上げない、と想定します。[M]からは[L]と[K]に、毎分[M]の水の3%、5%をそれぞれ流出します。[M]の水量のバランスを考えると、[L]からの行き先は無視します。やがて、[M]での流入量と放出量がつりあったとき、[M]の水量は定常状態になります。[M]の出入りを考えます。[M]に溜まった水量を[M]、時間の単位を分で書くと

$$\frac{d[M]}{dt} = [K \text{ から流入}] - \sum_{\text{行き先}} [M \text{ から流出}] = [K] \times 0.01 - [M] \times (0.03 + 0.05)$$

と表せます。定常になった状態を式に書くと、時間変化を表す左辺が0ですから、[M]/[K] = 1/8、すなわち、[M]には[K]の水溜めの1/8の量が溜まった状態に維持されていることとなります。[M]から[L]への流量の絶対値が測定可能なら、[K]にある水量の絶対値を推定することが可能です。[K]に水がないと、汲み上げることもできませんから、これは大切な物理量です。

これを図3 (b) に示すプラズマ中の水素原子集団に適用します。水素は原子核と電子1個からなりますので、その1個の電子が基底状態にあるものを状態[K殻]の水素、励起状態[L殻]、[M殻]にあるものを、状態[L][M]の水素とし、それ以外の殻に励起電子をもつ水素は無視できるほど少ないと仮定します。

ここで、(a)の組み上げる水の量は(b)の電子衝突による励起に対応します。(a)の蛇口からの水の流出量は(b)の輝線の発光強度に対応します。したがって、[M]から[L]への電子遷移に伴う発光を観測することで、[K]すなわち基底状態にある水素の量を推定することができます。しかし、もし外に

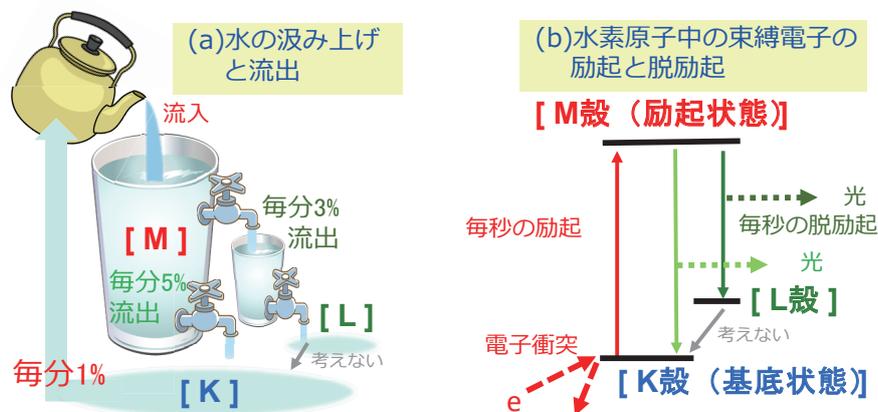


図3 (a) 水の汲み上げと放出のバランス方程式を与える物理モデル。(b) 3準位に着目した、プラズマ中の原子過程を記述する物理モデル。

流出する蛇口がとても狭く、たとえばポタポタ水漏れするぐらいだったとしましょう。[M]の水の行き場がなく、溜まる一方です。原子では、励起準位にある電子の寿命が極めて長く、発光も極めて微弱になります。このような励起準位を「準安定準位」、準安定準位からの発光を「禁制遷移」と言います。その遷移が許容遷移か禁制遷移か、というのは量子論からわかります。

禁制遷移を実験室で観測することは、極めて困難です。遷移1回につき、放出する光子が1個なので、寿命が長い、ということは、単位時間あたりの放出光子数が少なく、極めて微弱な発光となるからです。発光前に電子が再度衝突してきたり、自分が壁にあたったりすると、発光をせずに基底に戻りますから、光りません。

4. オーロラ発光の謎

この禁制遷移は、美しいオーロラの発光の原因なのですが、その素過程は長い間謎でした。気体放電でも出ない、窒素ではない、アルゴンでもない、... クリプトン説 (Ramsay, 1915年) までありました。やがて、1924-1925年頃、ヘリウムやアルゴンの気体放電に酸素を少し入れるとそれっぽいのがでていることが McLennan と Shrum によって確認され、McLennan のイギリス王立協会学術誌講演録(1928年)で、**酸素の禁制遷移**であることが述べられています。

図4にオーロラの写真 (a) とエネルギー準位 (b) を示します。量子準位の記号 S、P、D や全角運動量の量子数 J も記載されていますが、現段階ではそれらは無視して、波長 (λ) と秒 (s) で表される準位寿命に着目してください。禁制遷移は M1、E2 とラベルされています。許容遷移の寿命は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ s すなわち、ナノ秒のオーダーですので、557.7 nm の緑の発光 0.8 秒、さらには 630.0、636.4 nm の数 100 秒は桁違いに長く、すなわち発光強度も桁違いに小さいことが読み取れます。

オーロラは上空 100-300 km に現れます。上空では、酸素分子が解離しており、窒素も少ないため、酸素原子が主要な粒子種です。プラズマの密度が低く、壁もないため、酸素が励起したまま長時間存在し、ゆっくり発光する「猶予」があります。酸素原子の赤と緑の色の違いは励起準位の違いで、これによって生成や消失する素過程が異なるため、窒素が触媒的に作用して生じる緑が下方に現れ、緑より準位寿命がさらに長い赤は、他粒子との衝突による消失も増えてきます。この赤いオーロラ (Type-D オーロラと分類される) は、太陽活動が活発であれば、低緯度の地域でも観測されていて、日本でも

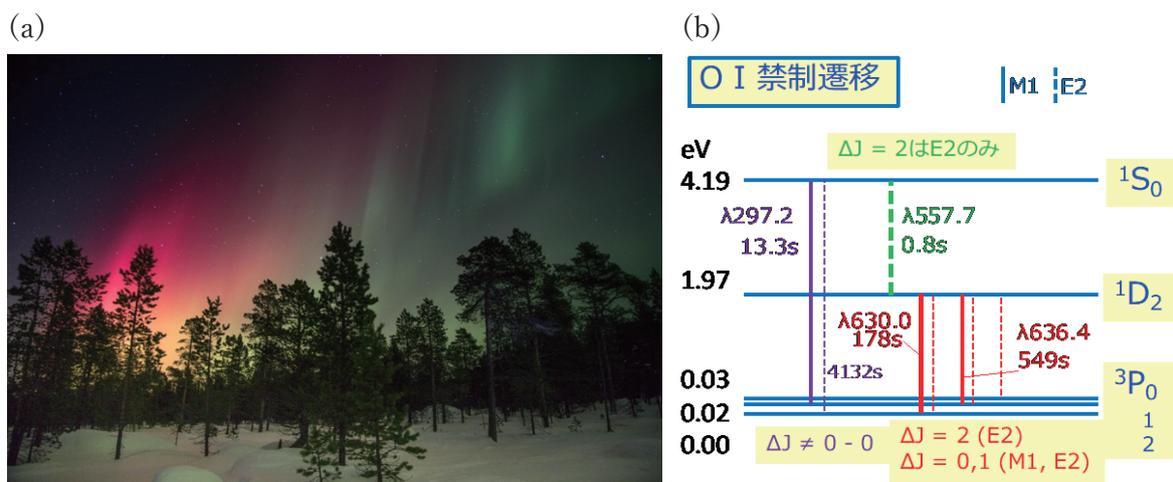


図4 (a) 典型的な緑 (557.7nm) と赤 (630.0、636.4 nm) の Type-A オーロラ [Public Domain, <https://publicdomainq.net>]. (b) 酸素原子 (O I) の禁制遷移を表すエネルギー準位図。λ は波長 [nm]、s の前の数字は準位寿命 [秒]

1400 年前の日本書紀や 1204 年藤原定家の明月記に「赤気（せつき）」として記録が残っています。

このように、オーロラが緑や赤の光を発する素過程は、酸素原子の発光でありながら、地上の放電とは異なる励起過程が関連していますので、それを地上で再現することは極めて困難なのがおわかりでしょうか。

一方、低高度下限付近では、気体密度が増え、さらに窒素の割合が増えるため、窒素分子、窒素分子イオンの紫のスペクトルが鮮やかに見えます。Type-B オーロラとして知られます。太陽活動が活発で、その高度まで到達するほど、高いエネルギーのプラズマが降り注ぐ必要がありますが、こちらは許容遷移による発光であるため、窒素を含む放電実験によって再現することができます。

5. 準安定準位を利用するガスレーザー

プラズマからの発光の利用は、前述のアークランプ（開放型）に始まりますが、放電管が最初に光源として利用されたのはムーア管（1893 年）です。その後、ネオン管（1910 年）や蛍光灯（1938 年）、最近ではプラズマディスプレイパネル（1992 年）などに応用されてきました [4]。

アインシュタインが 1917 年に光の共鳴吸収・誘導放出の原理を導くと、それから 40 年の時を経て、反転分布と共振器を利用したメーザー（1954 年）やレーザー（1960 年）として実を結びました。本節では、放電プラズマ中の準安定準位を巧みに利用した「ガスレーザー」の発振原理を見てみましょう。

単一ガスによる放電では、下の方の準位ほど、エネルギー的に安定しているので、下から上への遷移で光を吸収する過程のほうが、上から下への遷移で光り放出する過程よりも多く発生します。

そこで、「準安定準位」の登場です。ヘリウムの準安定準位は、ネオンの励起準位のすぐ近くにあり（そういう「相方」を探してきます）。図 5 のように、混合ガスを用いることで、ヘリウムの準安定準位を蓄積し、共鳴的に特定のネオン原子を励起します。上準位の密度のほうが下準位よりも高い状態、これを「反転分布」と言います。反転分布した上準位からの発光を「共振器」と言われる「合わせ鏡」構造内に閉じ込めると、吸収より発光のほうが多く、共振器の中を光が行き来するうちに、だんだん増幅されて、レーザー発振に至ります。図中の写真は He-Ne レーザーの放電管を回折格子フィルムを介

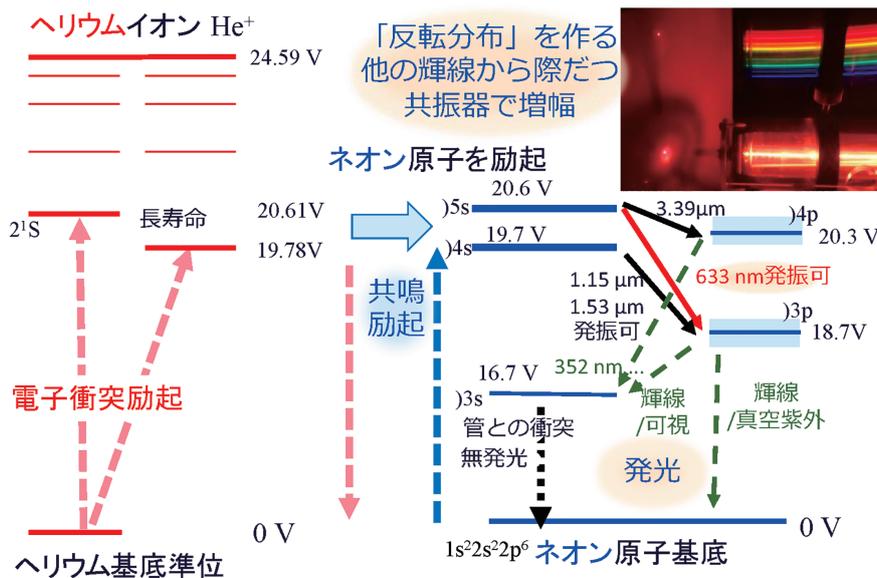


図 5 ヘリウム・ネオンレーザー発振に関連するエネルギー準位図。ネオンの励起準位の“()”は、便宜上、基底にあった 2p 電子の 1 つが“()”の後に書かれた軌道に励起していることを表す。

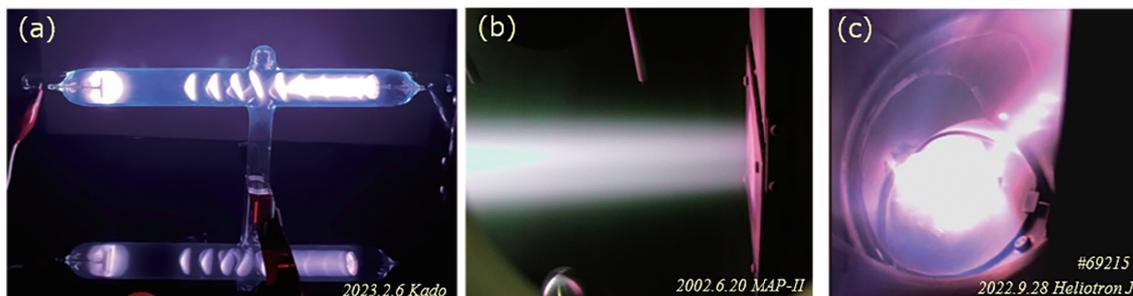


図6 (a) 直流グロー放電による水素プラズマ（電子温度約4万 $^{\circ}\text{C}$ ）、(b) 直線型ダイバータプラズマ模擬装置 MAP-II において、ヘリウム放電に水素を混合しプラズマの温度を下げる実験（約1～2万 $^{\circ}\text{C}$ ）。(c) ヘリカル型核融合実験装置ヘリオトロンJにおける重水素放電に固体軽水素を入射する実験（約1千万 $^{\circ}\text{C}$ ）。

して観測し、スペクトルの色を観察したものです。黄、赤、緑、青などのネオンの輝線が多数観測されます。そのうち、反転分布となった上準位より発する633nmの赤い輝線のみ増幅され、単色のレーザーが発振されます。

6. プラズマ核融合とプラズマ分光

太陽がプラズマの塊であり、その発光のエネルギー源が核融合反応 [6] であることが示され、プラズマによる核融合が可能であるとの理論が生まれることにより、高温プラズマの生成・加熱実験が盛んになると、弱電離を扱う放電（図6 (a)）と完全電離を扱うプラズマ物理（図6 (c)）は乖離していきました。太陽内部や核融合炉心のプラズマは完全電離しており、軌道電子をもたず、輝線を発しないからです。しかし近年、ダイバータ・境界層プラズマと言われる、核融合プラズマ周辺部は、壁からリサイクルされた原子分子や意図的に入射された中性の気体により、電離度が低い領域が重要視されています。太陽大気も弱電離のプラズマであり、様々な元素が存在しています。現代の分光学、素過程の知見で、実験室、太陽、オーロラなど、様々なプラズマを比較することで、フラウンホーファーやキルヒホフが思い描くことすらできなかった、両者の素過程の類似性や相違点が明らかになってきています（図6 (b)）。

スペクトルの波長はプラズマ中の不純物の種類や価数の特定に、強度は元素の量や励起源である電子の温度や密度を、スペクトルのシフト（ドップラー効果）からプラズマの流れ速度を、熱運動によるスペクトルの広がりから発光元素の温度を・・・など、分光診断から得られる情報は多岐にわたります。さらには意図的に不純物元素をトレーサーとして導入したり、レーザーや粒子ビームを打ち込んだりして誘起された発光を計測するなど、様々な能動的計測法も実用化され、活躍しています。

5. おわりに

プラズマの「素過程」と「分光診断」は、量子論や原子物理学などの聞き慣れない用語が次々と出てくるので、最初はとっつきにくい印象を感じる方が多いと思います。しかし、正直にいうと、量子論を完璧に理解して、分光診断に利用する、というわけではなく、先人たちの知見の蓄積のなかから、実験的に検証された「評価済みデータベース」を利用します。その過程で、実験との矛盾が確認されれば、新しい現象の発見や、それまで無視していた素過程の重要性につながることも少なくありません。

扱うプラズマのパラメータ領域や元素が近年ますます拡大し [6]、分光診断は、プラズマ中の元素分析や価数、励起源であるプラズマの密度や温度等を調べる手法として、様々な装置、様々な分野において、重要な計測手段として発展を続けています。

この先、読者の皆さんと一緒に研究できる機会があればこの上なく喜ばしいです。そうでなくても、

どの分野に進んでも、分光学に支えられた分析装置や解析方法を目にしたいと思います。その時に、ふと本稿を思い出して、核融合や天体、オーロラなどのプラズマ研究が、どれだけ進歩したか、振り返って関心をもってもらえたら嬉しい限りです。その時の期待に答えられるよう、我々研究者は探求し続けます！ [7]

参考文献（オープンアクセスの和文誌と一般入門書を挙げました）

- [1] 波岡 武「第1講分光器概論」分光研究（1985）34巻1号 41-53
- [2] <http://www.exo.net/~pauld/workshops/Stars/Stars.htm>（2023年7月閲覧）
- [3] 小口 高 著 「オーロラの物理学入門」（2.6節） 名古屋大学太陽地球環境研究所編集 [https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/public-notice/post_25.html]
- [4] 板谷良平「20世紀におけるプラズマ物理の歴史と将来展望」応用物理 69, p971（2000）
- [5] 「プラズマエネルギーのすべて」 日本実業出版社（2007/2/22）
- [6] 「図解でよくわかる 核融合エネルギーのきほん」 誠文堂新光社（2021/1/12）
- [7] 門信一郎「すぐにわかるプラズマと核融合エネルギー」国立大学共同利用・共同研究拠点協議会 YouTube [<https://youtu.be/YwkTx9W918Q>]（2021年1月配信）