

国立研究開発法人

量子科学技術研究開発機構

高崎量子応用研究所

第66号

高崎研だより

役立つ科学

シリコン空孔量子センサの磁場・温度同時測定

My favorite

群馬の魅力

日本/世界見聞録

中世と現代の美の融合 オルレアン

研究装置紹介

誘導結合プラズマ発光分光分析装置

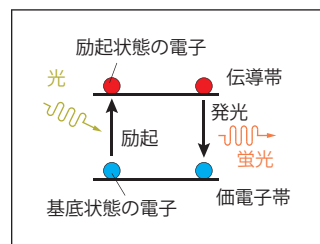


役立つ科学 シリコン空孔量子センサの磁場・温度同時測定

量子機能創製研究センター 田中 友晃

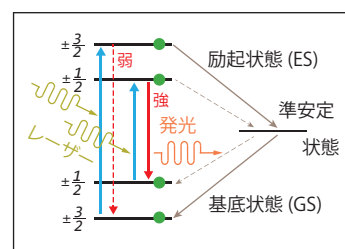
Q1. シリコン空孔量子センサとは、どのようなものですか？

シリコン空孔量子センサとは、シリコンカーバイド (SiC) という物質中にできたシリコン空孔 (シリコンが抜けた欠陥) をセンサとして利用する技術のことです。この欠陥 (スピン欠陥と呼ぶ) は、不思議なことに光を吸収すると (励起状態になると)、ある時間を経過後光 (蛍光) を放出しますが、この発光の強度が最大になる条件は、周りの磁場や温度などの影響を受けて変化します。この変化を読み取って、磁場や温度センサとして利用します。



蛍光発光のメカニズム

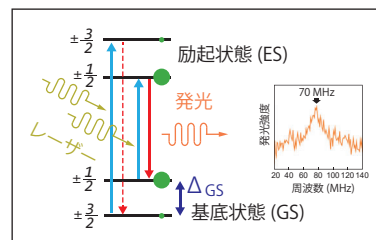
Q2. どのようにして、磁場を計測するのでしょうか？



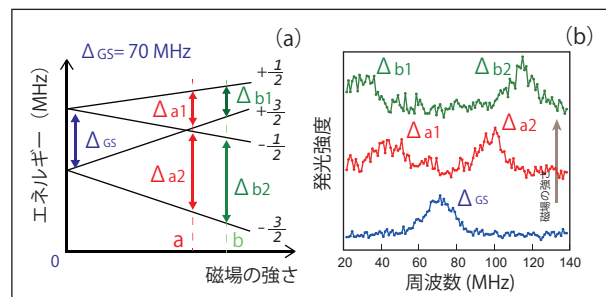
Si スピン欠陥の蛍光発光メカニズム

シリコン空孔を用いた磁場センシングには、レーザーと高周波を使用します。まず、レーザーを欠陥に当てると、左図のように基底状態の電子が励起状態へと移動し、その後基底状態に戻ります。基底状態に戻る際、①直接戻る、②準安定状態を経由して戻る、の2パターンが存在しますが、①のときのみ発光します。少々難しい話になりますが、シリコン空孔は、基底・励起状態それぞれにスピン $\pm 1/2$ と $\pm 3/2$ の状態をとることができ、前者の方が①の発光の割合が多くなります。

次に、レーザーを当て続けて発光している状態で、エネルギー (周波数) を変えながら高周波を当てると、右図に示す「 ΔGS 」に相当する 70 MHz を当てたときに、 $\pm 1/2$ のスピンの割合が多くなり (共鳴し)、それに伴い発光強度が増加します。この結果は磁場ゼロの場合ですが、磁場が存在する場合は下図 (a) に示すように、 $\pm 1/2$ と $\pm 3/2$ のスピンエネルギー



Si スピン欠陥の基底状態共鳴と蛍光発光

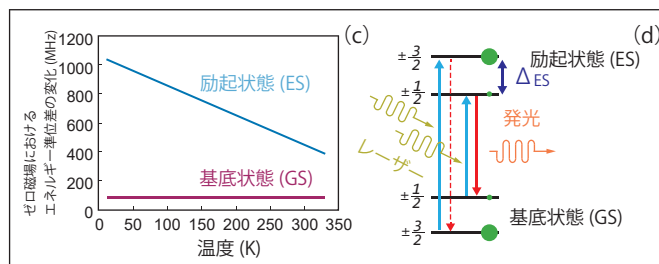


Si スピン欠陥のスピンエネルギー磁場依存性

が分裂し、1つであった「 ΔGS 」が2つになり、またそのエネルギーギャップは磁場の大きさによって変わります。この特徴を逆手に取り、高周波の周波数を変化させながら発光強度を測定することで、磁場の値を得ることができます。例えば、左図 (b) のように、共鳴周波数が $\Delta b1$ と $\Delta b2$ であったとき、左図 (a) から磁場の強さは、bであることが分かります。

Q3. 温度は、どのようにして計測するのですか？

磁場の計測同様、レーザーと高周波を用いて発光強度の変化を測定します。ただし、温度計測の場合は、シリコン空孔周辺の温度変化によりスピンの分裂 ($\pm 1/2$ 及び $\pm 3/2$ の分裂) は起こらないため、スピン間のエネルギーギャップ ($\pm 1/2$ と $\pm 3/2$ のエネルギー差) の大きさの変化を利用します。この変化は、右図 (c) に示すように、基底状態では観察されないため、励起状態で周波数を変えながら高周波を当てます。具体的には、右図 (d) のように、「 ΔES 」で共鳴すると $\pm 1/2$ のスピンが減少し、 $\pm 3/2$ のスピンが増加します。つまり、磁場計測とは異なり、発光強度の減少から温度の情報を得ることができます。



Si スピン欠陥エネルギーギャップの温度依存性と励起状態共鳴

磁場・温度の同時計測は、基底状態の共鳴から磁場情報を、励起状態の共鳴から温度の情報を取り出すことで可能となります。

雄大な景色と美しい自然。山頂からの眺望と登頂による達成感は最高のひと時です！この感動と心の癒しが、今の自分には必要だと感じています。

私の場合、登山と言っても気軽に登れる低山登山ですが、それでも十分満足しています。昔は娘達から「登山って何が楽しいの？」と聞かれましたが、今では山頂からの写真を送ると「きれいな景色！」「今日も健康なママで嬉しい」と返してくれます。「一緒に登りたい」という返事はありませんが、もう少し大人になって山の魅力に気付いたとき、一緒に登れたらいいなあと思っています。

群馬県は豊かな自然に囲まれ、草木の緑と季節の花々、高山植物が豊富にあります。私のお気に入り、尾瀬や野反湖に咲くニッコウキスゲ



野反湖を望むニッコウキスゲ

ですが、これから秋は紅葉が見ごろを迎えます。そして、群馬県は言わずと知れた日本を代表する温泉王国です。高崎に越してきて4年半。こんなに近くにたくさんの温泉地があるのですから、堪能しない手はありません。楽しまなくちゃ！と想い、あちこち出かけています。

趣味の登山の後は温泉宿で汗を流し、美味しいお料理とお酒を味わい、非日常を楽しむ、そんな休日に心から癒されています。今度はどこの山に登って、どこの温泉に入ろうかな・・・そして、まだ知らないご当地グルメを探して、旅を楽しめたら幸せです。

生まれも育ちも群馬の方には魅力不足と感ずるかもしれませんが、私は今、群馬を堪能中です。

みさの (ペンネーム)

日本/世界見聞録

中世と現代の美の融合 オルレアン

2023年7月、フランスはオルレアンで行われた陽電子ビーム技術国際会議に参加しました。オルレアンは、パリから南へ約100km、中世の街並みが美しい、雰囲気の良いフランスの地方都市です。日本の旅行ガイドブックにはほぼ載っていませんが、パリから在来線快速で約1時間と、なんとなく高崎に似ています。

オルレアンは紀元前から存在する古い街で、中世にはロワール川を使った貿易で栄え、また地理的重要性から度々歴史にも登場します。特に有名なのは、フランスとイングランドの100年戦争における1429年のオルレアン包囲戦で敗戦寸前だったフランスを救ったジャンヌ・ダルクです。この戦いがその後のフランスの繁栄につながっていくことで、街はジャンヌ・ダルク推しです。街の中心広場には大きな銅像がある他、街のあちこちでオブジェやプレートに出会います。

石畳の街並みは美しく、どこを切り取っても絵になります。一方で、駅舎はスタイリッシュですがアートが国だと思わずにはいられません。ロワール川沿いにはきれいに整備された繁華街が広がり、街角のオープンカフェでは、夜遅くまでたくさんの人が食事を楽しんでいました。治安が悪い感じはなく、のどかな雰囲気も高崎に似ています。

オルレアンは最高気温30℃程度で、朝は肌寒く上着が必要なほどでしたが、帰国後は連日40℃の天気悶絶する日々……。気温もオルレアンに似てくれたら良いのに……。



サン・クロワ大聖堂を望む
オルレアンの街並み



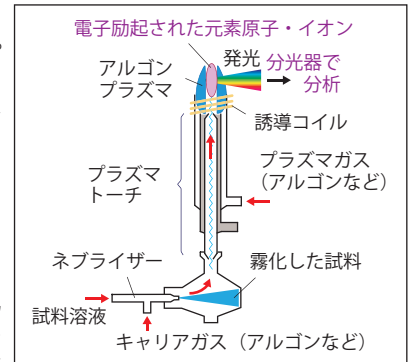
スタイリッシュなオルレアン駅

前川 雅樹 (先進ビーム利用施設部)

【原理と特徴】

誘導結合プラズマ発光分光分析装置では、プラズマ（Inductively Coupled Plasma: ICP）内に溶液試料を導入し、その試料に含まれる元素からの発光を分光器で分析することにより、元素の種類や濃度の情報を得ることができます。元素の検出には、元素発光分光法（Atomic Emission Spectroscopy: AES）を利用することから、本装置は ICP-AES と呼ばれます。

元素分析を行うときは、まず、高周波電圧をかけた誘導コイル内にプラズマトーチの内周部を通してアルゴンガスを導入し、コイル内の電界を利用してアルゴンプラズマを点火します。このプラズマは、誘導コイルに近いほど濃度が高く、中央部では濃度が薄い、ドーナツ形状をしています。この中央部に、プラズマトーチの中心部を通してネブライザーにより霧状にした試料を導入することにより、アルゴンプラズマと気化した試料を相互作用させて、高エネルギー状態に励起した対象元素の原子・イオンを生成します。



ICP-AES の試料導入部

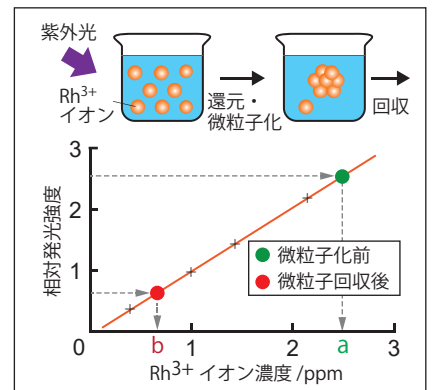
励起された元素原子・イオンは、余分なエネルギーを持っているので、光を放出すること（発光）により安定状態に戻ります。放出される光のエネルギーは元素に固有であるため、発光スペクトルを分光器で測定することにより、どの元素が試料に含まれているか帰属できます。

また、発光スペクトルの強度は元素濃度に比例するので、対象元素について濃度が分かっている水溶液を使って、あらかじめ元素濃度と発光強度の関係を調べることにより、試料濃度を決定できます。なお、ICP-AES は、希ガスや一部の軽元素（水素、酸素、窒素）を除くほとんどの元素を検出でき、また 10 ppb ~ 10 ppm の濃度領域での定量測定に適しています。

【実際の分析例】

貴金属イオン水溶液にエタノールを添加し、紫外光を照射すると、貴金属イオンが還元されて、自発的に微粒子を形成するので、ろ過などで回収することができます。

この原理を利用して工場廃液から貴金属を回収する研究においても、ICP-AES が役立ちます。例えば、濃度の異なるロジウムイオン Rh^{3+} 標準液からの発光（343.5 nm）を測定して、濃度と発光強度の関係をプロットすると、右図のような直線関係が得られます。次に、 Rh^{3+} 濃度未知の溶液の発光強度を測定し、この関係から Rh^{3+} 濃度 (a) を求めます。さらに、紫外光を照射して微粒子を生成・回収し、再び発光強度を測定して溶液中の Rh^{3+} 濃度 (b) を求めます。(a-b) 濃度を計算することにより、この方法により回収した微粒子中に含まれる Rh の量を知ることができます。



微粒子化した貴金属イオン
回収前後の濃度

Qメッセージ

先日、民放の教養バラエティー番組で高崎研の「量子センサー」の研究が取り上げられました。タレントさんが高崎研に来られ高崎研研究者とのやり取りを通して、施設や研究内容についてご説明いただきました。特に、量子センサーの将来の利用例として、「ペットとの意思疎通」、「充電不要のスマホ」、「がん治療」などを分かりやすく紹介していただきました。今後の広報活動では、今回の経験を活かし、一般の方々理解できる分かりやすい情報発信を心掛けてまいります。（高崎量子応用研究所長 前川 康成）