

スピン偏極ヘイオン散乱分光法の開発

鈴木 拓

物質・材料研究機構 量子ビームセンター

1. 研究のねらい

磁性の発現機構の解明には、磁気構造（スピン配列）の解析が不可欠です。しかし、中性子散乱やX線磁気円二色性分光等の既存の磁性分析手法では、表面（最外原子層）に限定した元素選別スピン状態が得られないため、表面の磁気構造解析は至難です。したがって、表面磁性の発現機構に関する理解は殆ど進んでおらず、表面磁気構造解析手法の確立が強く要請されています。

本研究では、表面の磁気構造解析を可能にする新手法として「スピン偏極ヘイオン散乱分光法」(SP-ISS)の開発に挑みました。このSP-ISSの測定原理は、これまで分析手法に用いられたことのない物理現象である「イオン中性化のスピン依存」で、これによって最表面の元素選別スピン分析が初めて実現されました。SP-ISSによって表面の磁気構造解析が広く可能となれば、表面磁性発現機構の解明や、スピントロニクスの開発等の飛躍的な発展が期待されます。

2. 研究成果

偏極ビームとは、スピンを人為的に揃えたビームであり、物質の特定のスピンの相互作用するので、スピンのプローブとなります。なかでも、ヘリウムイオン($^4\text{He}^+$)の偏極ビームである「偏極 He^+ ビーム」は、電子や光子等の各種プローブビームの中で、表面のスピンに最も敏感です。

この偏極 He^+ ビームの特徴は、その発生に初めて成功した米国ライス大グループによって明らかにされました(1998年)。これを受けて私は、「パウリの排他律に従うイオンの表面での中性化(オージェ中性化)はスピンに依存すると考えられるので、偏極イオンを用いたイオン散乱分光法(SP-ISS)からこの中性化のスピン依存性を求めることで、個々の標的元素のスピン状態が得られる」と提案しました。ここで、イオン散乱分光法とは、1keV程度のイオンを試料表面に入射し、散乱イオンのエネルギー分析から表面の組成や構造を分析する、既に確立された手法です。ただし、その測定感度が(偏極率) \times (電流密度) $^{1/2}$ に比例するSP-ISSを実現するには、ライス大が報告した高々18%程度のビーム偏極率や、1nA以下のビーム電流の改善が不可欠でした。

この偏極 He^+ ビームは、次の多段プロセスから発生します。即ち、①放電によって準安定He原子($\text{He}^*, 2^3\text{S}_1$)を発生し、②この He^* を光ポンピング($2^3\text{S} \rightarrow 2^3\text{P}$)によって偏極し、③偏極した He^* のペニングイオン化で、偏極 He^+ を発生させます。③のペニングイオン化ではスピンは保存されるので、 He^+ の偏極率の改善に最も有効なのは、 He^* の偏極率を上げることです。

本研究では、まず偏極 He^+ ビームの開発に取り組み、世界で2番目にその発生に成功しました。次に、偏極率の改善に取り組み、偏極 He^* が輻射再吸収によって脱偏極していることを発見しました。この脱偏極は、光ポンピングで発生する 2^3P の 2^3S への緩和に伴う自発放出光を、偏極 He^* が再吸収することによって起こります。従って、輻射再吸収の抑制によって He^+ 偏極率の改善が期待できます。私は、この輻射再吸収を抑制する方法として、1083nm D_0 線を用いた新しい光ポンピング方法を提案しました。これは、 He^* の D_0 線に対する光吸収断面積が、従来光ポンピングで用いられてきた D_1 線や D_2 線に対するそれに比べて小さいので(無偏光に対しては、それぞれ1/3と1/5)、

自発放出光の再吸収を抑制できるからです。そして、He*偏極率が 0.1Wcm^{-2} 程度のポンピング光密度で飽和することを割り出した上で、1083nm D_0 線 ($\sigma+\pi$) 光ポンピングを実現するための光学系を構築し、それによって従来比 1.5 倍以上(25%以上)の偏極率のHe⁺ビーム発生に成功しました。さらに、ビームライン排気効率の改善に尽力した結果、従来比 10 倍以上のビーム電流を得ました。これらの開発の成果として、図 1 に示すSP-ISS装置を世界で初めて構築しました。

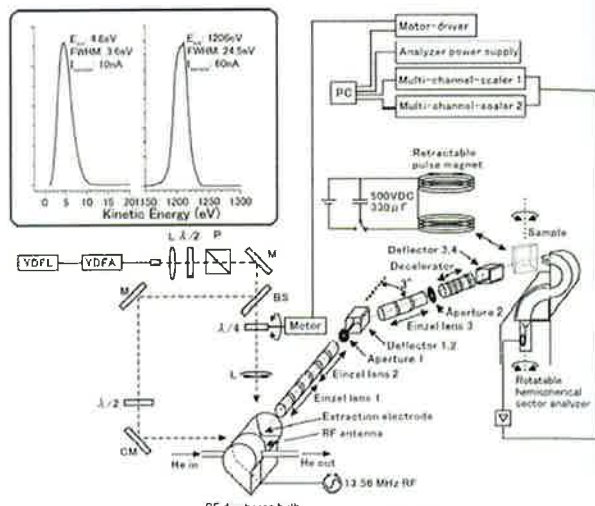


図 1 SP-ISS装置

最後に、磁化した O/Fe(100)表面で SP-ISS

計測に取り組み、イオン散乱のスピニ依存を発見し、更に SP-ISS によって表面の元素選別スピニ解析が可能であることを実証しました(図 2)。また、SP-ISS の角度分解測定から、表面 2~3 原子層程度に限定された深さ領域で、原子層を選別したスピニ解析が可能であることも示唆されました。ただし、SP-ISS の元素選別性や原子層選別性は試料の電子状態に依存すると考えられ、定量測定のためには「イオン中性化のスピニ依存」機構の更なる詳細な検討が必要です。

このように本研究では、当初の目標であった SP-ISS の開発に成功し、これによって表面の元素選別スピニ解析(表面磁気構造解析)が可能であることを実証しました。今後は、SP-ISS の実証レベルから実用レベルへの発展を目指し、ビーム偏極率を更に向上させて SP-ISS 測定感度を上げることと、前述のように、「イオン中性化のスピニ依存」を系統的に調べて定量計測を達成することを計画しています。今後、SP-ISS の発展によって、これまでその解析が至難であった表面磁気構造の一端が明らかにされ、表面磁性の発現機構の解明が進展すると期待されます。

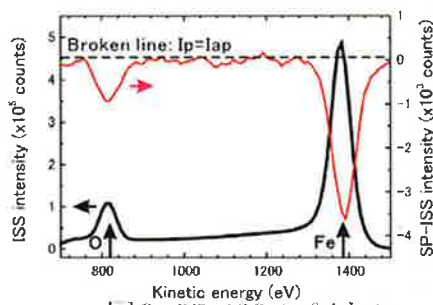


図 2 SP-ISSスペクトル

3. 主な論文

- ・ T. Suzuki and Y. Yamauchi, "Current enhancement of a He⁺ ion beam by optical pumping", *J. Phys. B* 40, 2817, 2007.
- ・ T. Suzuki and Y. Yamauchi, "Spin polarization measurement of metastable He 2³S₁ atoms in He discharge", *Jpn. J. Appl. Phys.* 46, 3673, 2007.
- ・ T. Suzuki and Y. Yamauchi, "Depolarization effects in electron spin polarization of 4He⁺ ion beam", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* 256, 451, 2007.
- ・ T. Suzuki and Y. Yamauchi, "Generation of polarized ⁴He⁺ ion beam by optical pumping using circularly and linearly polarized radiation tuned to D0 line (He metastables 2³S₁ → 2³P₀)", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 575, 343, 2007.
- ・ T. Suzuki and Y. Yamauchi, "Electrostatic linear ion trap for low-energy ion beam storage", *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A* 562, 53, 2006.

4. 特許

- ・ 鈴木 拓、山内 泰、イオンビーム発生方法とそれを実施するためのイオンビーム発生装置、特願 2006-321053、出願人：独立行政法人物質・材料研究機構
- ・ 鈴木 拓、山内 泰、偏極イオンビーム発生方法とその実施に使用する偏極イオンビーム発生装置、特願 2006-321044、出願人：独立行政法人物質・材料研究機構
- ・ 鈴木 拓、山内 泰、磁気構造解析方法とそれに使用するスピニ偏極イオン散乱分光装置、特願 2007-190277、出願人：独立行政法人物質・材料研究機構