

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：82121

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05237

研究課題名(和文) スピン偏極一価He+ビーム散乱における異常な非対称性散乱の起源の解明

研究課題名(英文) Theory on the Anomalous Asymmetric Scattering of the Spin-Polarized He+ Beam with Paramagnetic Target Materials

研究代表者

柳町 治(酒井治)(Yanagimachi, Osamu)

一般財団法人総合科学研究機構(総合科学研究センター(総合科学研究室)及び中性子科・総合科学研究センター・特任研究員)

研究者番号：60005957

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円

研究成果の概要(和文)：スピン偏極He+ビームを常磁性の物質に照射すると10%程度の非対称度が生じる。この値はポテンシャル散乱のスピン軌道結合による予測値の1万倍程度である。非対称度の散乱角度(θ)依存性は、AuやPt等の90°付近の θ で符号変化を示すタイプ、PbやBi等の符号変化を示さぬタイプに大別される。本課題で「Heと標的原子の間に生じる仮想電子移動励起状態において、標的上で電子に働く原子的スピン軌道相互作用がHe核の運動の異常なピン軌道結合の起源となる」ことを示した。占有5d電子の励起により実験に対応する非対称度を生じる。共鳴励起に近いPb等では符号変化が生じないが、弱共鳴のAu等では符号変化が生じる。

研究成果の概要(英文)：The scattering of an electron-spin-polarized He+ beam on paramagnetic materials has an anomalously large asymmetric scattering component (ASC) around 10% which is 10000 times that expected from the spin-orbit coupling for the potential of the target nucleus. The scattering angle dependence of the ASC has been measured. It changes sign near 90° for some materials (for example, Au), while it does not change sign for other materials (for example, Pb). It is noted in this study that the spin-orbit interaction of electrons on the target in the electron-transfer intermediate state causes the ASC of He nucleus motion. The sign change appears in the weak-resonance domain in the case of d electron excitation, whereas the sign change disappears in the strong-resonance domain. Calculated results qualitatively agree with the material dependence of the ASC observed experimentally.

研究分野：物性理論

キーワード：放射線・X線・粒子線 量子ビーム 1価ヘリウムビーム スピン非対称性散乱

1. 研究開始当初の背景

^4He 核はスピンをもたないため、 $^4\text{He}^+$ イオン(今後 He^+ と呼ぶ)に付随するスピンは電子によるものの1/2である。鈴木拓等は He^+ イオンビームのスピンを分極させる手法を開発した[1]。彼らはスピン偏極 He^+ を様々な常磁性物質に照射して、散乱の非対称性の測定を試みた。その結果、一般に5-30%程度の非対称度の発生することを見出した[2,3]。

図1に、鈴木等が得た様々な物質についての非対称度の散乱角(θ)依存性を示した[3,4]。入射 He^+ のスピンの方極は散乱面に垂直に選んである。スピン分極にたいし右回り(左回り)の弾性散乱成分の散乱強度を $I^+(I^-)$ として、非対称度は $A = (I^+ - I^-) / [(I^+ + I^-)p]$ と定義する。ここで p は入射ビームのスピン偏極率である。 θ 依存性を大きく分類すると、PbやBi等のグループaと、AuやPtなどのグループbに分けられる。aグループの物質は θ がゼロから180°の間で同一の符号を持つ。それに対しグループbは、 θ がゼロから180°まで動く際に $\theta \sim 90^\circ$ 付近でAが符号変化を示す。

He 核の運動に対するスピン軌道結合を、標的物質の内核電荷によるポテンシャルから生じるものとする、非対称度は 10^{-4} 程度であり、強度の説明が不可能である[2]。実験には、 θ 依存性が、物質に依存してaやb型にグループ分けされる特徴もある。この、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における非対称性の現象を、今後、異常なスピン軌道結合と呼ぶ。鈴木等は各種の実験の解析により、このスピン軌道・結合の起源は He^+ と標的核の2体散乱の範囲で考えることが可能であることを指摘した[2]。

申請者等は2013年に、異常なスピン軌道結

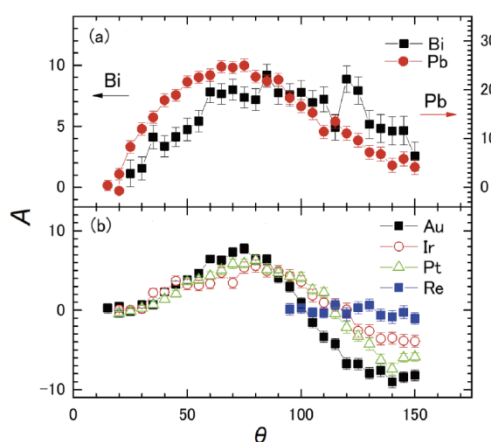


図1 鈴木等による、常磁性物質の非対称度A(%)の散乱角(θ)依存性の実験結果[3,4]。グループaは符号を変えない、一方グループbは100°付近で符号を変える。

合の起源は、電子移動型励起状態における電子の原子的スピン軌道相互作用である可能性を指摘した[5]。本課題は幸いに2015年度よりの科学研究費として採択され、研究を一段と進めることが可能となった。

2. 研究の目的

本課題の目的は、スピン偏極 He^+ ビームの常磁性物質による散乱実験において見出された、異常なスピン軌道結合の起源を理論的に明らかにすることである。

He イオンが標的イオンに近付くと、両者の間の電子移動型の電子励起が生じ、標的イオン上で電子の原子的スピン軌道相互作用が働く。このスピン軌道相互作用が He 核の運動における異常なスピン軌道結合の起源となる。予備的計算により、上記の可能性を指摘した。しかしながら、非対称度の計算には、様々な成分の寄与の間での相互打ち消し合いがあり、定式化の整理や、計算方法の工夫が必要である。当初に研究目的としたのは以下である。

(1) 定式化の整備と異常スピン軌道結合の発生条件の解明

電子移動型仮想励起によるスピン軌道結合の評価について、定式化の基本的立場の明確化と整理を行う。これにより、異常なスピン軌道結合の発生を導く最小の要素を明らかにする。

(2) 非対称度の散乱角依存性の計算、共鳴の効果

予備的計算においては、波数ベクトル表示(k 表示)を使用し、また散乱角の大きな領域に許される近似法を使用した。これにより、 d 電子励起の場合に $\sin\theta\cos\theta$ 型の θ 依存性となることを導いた。この依存性はグループbのAの定性的特徴を再現する。しかしながら、グループaのAの特徴とは合致しない。グループaの物質群では、 He の1sと占有5d状態の間の共鳴現象があるとされる。5d励起であるにもかかわらず、グループaではAが符号変化を示さない理由を明らかにする。

(3) 古典力学的取り扱いの可能性の検討

仮想電子移動励起に起源をもつスピン軌道結合に対し、古典力学的な結合項に還元する方法が存在するか調べる。

3. 研究の方法

本課題では、 He^+ ビームの散乱について、量子力学的散乱問題の形式で非対称度を求める。具体的に述べれば、 He^+ の弾性散乱チャンネルの遷移行列(T行列)にたいし、仮想電子移動過程による補正効果を求める。こ

の際に、電子に標的イオン上で働く原子的スピン軌道相互作用を考慮する。このような計算により、He⁺ビームにたいするスピン軌道結合がどのように生じるか調べる。

散乱の非対称度にはT行列の幾つかの成分の干渉項が寄与し、かつ、幾つかの干渉項の寄与の差が現れる。各々の寄与は相互の打ち消し合いがほぼ成立し、小さな差の部分が非対称度として現れる。非対称度の評価には、各々の干渉項が均等な寄与を与える計算法に基づき、偽の効果の要因を避ける必要がある[4,6]。

本研究では電子移動積分の2次摂動近似に範囲を絞り、それによる生じるT行列への補正効果を調べた。定量的には重要である過程といえども、移動積分の高次効果に属するものは落とされた。このような単純化により、相互に相殺して消失すべき部分は正しく相殺することが保証される。しかし一方で、計算結果の定量性については、オーダー評価的な近似の程度にとどまる。本研究は定性的な側面に主眼を置いた段階のものである。

1kV程度の入射エネルギーの場合、原子標的によるHe⁺ビームの散乱問題は半古典力学的散乱理論の適用領域である。しかしながら、半古典論的取り扱いに伴う曖昧さの要因を避けるため、量子力学的な散乱問題の基本的な方法に忠実な計算を行った。この代償として、大きな波数状態($k \sim 10^3/a_B$, ただし a_B はBohr半径)に亘る波数空間での積分や、大きな角運動量($l \sim 10^3$)に亘る和を取る等、数値計算においては注意が必要になる。

4. 研究成果

(1) スピン軌道結合発生の条件[6]

標的の ℓ_{β} 軌道の占有電子がHe⁺の1s軌道に移動し、中間状態で中性Heと標的の+1価イオン状態を生じる過程を例にとり説明する。

He⁺の弾性散乱チャンネルのT行列にたいする、移動積分 $b^0(r'_n \ell_{\beta} s)$ の2次摂動による補正項を考え、スピン軌道結合を与える成分を座標表示で表すと [4,6]、

$$T_{SO\text{eff}}^{(II)}(\mathbf{r}'_n \sigma', \mathbf{r}_n \sigma) = \sum_{\ell_{\beta}} \sum_{j_{\beta}} b^0(r'_n \ell_{\beta} s) \times G(\mathbf{r}'_n, \mathbf{r}_n; [s^2 : (j_{\beta})]) b^0(r_n \ell_{\beta} s) \frac{i^{(-1)^{\ell_{\beta} - \frac{1}{2} - j_{\beta}}}}{4\pi} \times \frac{2\mathbf{s} \cdot [\mathbf{r}'_n \times \mathbf{r}_n]}{r'_n r_n}. \quad (1)$$

ここで、

$$G(\mathbf{r}'_n, \mathbf{r}_n; [s^2 : (j_{\beta})])$$

は電子移動中間状態におけるHe核の \mathbf{r}_n から \mathbf{r}'_n への運動を表すリゾルベントである。(電子間移動効果を仮に存在しないものとして、He核の標的的内核電荷ポテンシャルによる仮想的な散乱問題-これを仮想散乱問題と呼ぶ-を解いた結果のリゾルベントとする。)電子系はHeが中性状態 s^2 、標的に全角運動量 j_{β} の正孔状態、(j_{β})が生成されているとする。(この電子励起状態を $[s^2 : (j_{\beta})]$ と表示する。初期状態の電子状態をHe⁺と標的の中性状態、Aと仮定して、同様な記法で書き $[s : A]$ と表す。)電子系の $[s : A] \rightarrow [s^2 : (j_{\beta})]$ 励起に移った分だけGにおけるHe核の運動エネルギーは減少している。

(1)式の右辺の最後の行にHe核の位置座標 \mathbf{r}_n と \mathbf{r}'_n とのベクトル積が現れる。従って、中間状態におけるHe核の座標位置の移動を取り入れることは、(1)が有限の寄与の生じる条件となる。 j_{β} についての和ではその取り得る値 $\ell_{\beta} \pm 1/2$ の各々で逆の符号の寄与となる。従って電子状態のスピン軌道相互作用分裂がない場合にはこの補正項は消える。Heの1sから電子移動する標的上の電子軌道は、標的からHe核の方向をz軸に選んだ座標系においてシグマ結合となる成分である。式(1)の導出において、電子移動積分のHe核の位置座標に依存した、この軌道選択性が一つの効果を及ぼしている。

スピン軌道結合の生じる要件を纏める:電子系が中間励起状態にある間にHe核は座標空間で運動する。その位置変化に応じた電子移動積分の軌道選択性により、標的上で活性な電子軌道状態が変化する。電子軌道状態の量子力学的時間変化は電子のスピン軌道相互作用の影響のもとで生じるので、電子スピンがHe核の座標空間運動に影響を及ぼす。

研究の第一段として、式(1)を波数表示(k表示)に基づき計算して、非対称度の数値的評価を実行した。ただし、散乱角の大きい領域でのみ許される近似を採用した。(リゾルベントGに対し、T行列近似法を採用した)[6]。電子の原子的状態の波動関数とエネルギー準位には局所密度近似(LDA)による計算を採用した。その結果、占有3d電子がHeに移動して、中間状態で中性He状態となる過程は、AuやPtにおいて絶対値として10%程度の値を十分生じることが示された。ただし、符号はエネルギー準位の値に敏感に依存して振動的であることが分かった。Heが金属表面に近づくにつれ、He1sのエネルギー準位は標的上の電子軌道のそれに対し、相対的に上昇することが知られている。上昇の値(E_{mod})を0.3Ry程度に選択すると、実験で観測された非対称度の符号と同じになる。上に述べた、(1)に対するk表示による近似計算では、散乱角の大きい領域の非対称成分の θ 依存性に $\sin\theta P'_{\ell_{\beta}}(\cos\theta)$ という因子が現れる[4-6]。sin

関数は非対称性に付随する因子である。 $P'_{\ell_{\beta}}$ はLegendre関数の微分である。その次数は標的の励起電子軌道の角運動量 ℓ_{β} である。d電子励起の場合後者は $\cos\theta$ であるので $\sin\theta\cos\theta$ という因子が生じる。

(2) 球面波表示法の展開と非対称度の散乱角依存性の計算[4]

スピン σ の量子化軸を散乱面に垂直にとり、入射(散乱)波数が \mathbf{K}_i (\mathbf{K}_f)の場合について、式(1)を部分波表示(L表示)により求めると、

$$T_{eff\,SO}^{(II)}(\mathbf{K}_f, \sigma \leftarrow \mathbf{K}_i, \sigma) = 4\pi \sum_{\mathcal{L}} t_{so, \mathcal{L}\sigma}^{(II)} \cdot (i \sin\theta_{\mathbf{K}_f \mathbf{K}_i}) P'_{\mathcal{L}}(\cos\theta_{\mathbf{K}_f \mathbf{K}_i}) \quad (2).$$

ただし、 $P'_{\mathcal{L}}$ は[s : A]チャンネルにおける角運動 \mathcal{L} に対するLegendre関数の微分である。(2)に \sin 関数が含まれ非対称成分であることを示す。 $t_{so, \mathcal{L}\sigma}^{(II)}$ は次のように与えられる、

$$t_{so, \mathcal{L}\sigma}^{(II)} = \sum_{\ell_{\beta}} C_{BS}^{(II,1)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}) \langle \sigma | 2S_z | \sigma \rangle.$$

因子 $C_{BS}^{(II,1)}$ は以下のように与えられる、

$$C_{BS}^{(II,1)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}) = \sum_{j_{\beta}} B^{(II)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) \times S(\mathcal{J}, \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) (-1)^{\mathcal{L} + \frac{1}{2} - \mathcal{J}}.$$

$B^{(II)}$ は以下の積分により与えられる：

$$B^{(II)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) = e^{2i\delta_{\mathcal{L}}} \int dr'_n r_n'^2 \int dr_n r_n^2 \mathcal{F}_{\mathcal{L}}(r'_n; [s\sigma': A]) \times b^0(r'_n; \ell_{\beta}, s) g_{\mathcal{L}}(r'_n, r_n; [s^2: (j_{\beta})]) \times b^0(r_n; s, \ell_{\beta}) \mathcal{F}_{\mathcal{L}}(r'_n; [s\sigma: A]).$$

ここで、 $g_{\mathcal{L}}$ は $[s^2: (j_{\beta})]$ チャンネルにおける仮想散乱問題のリゾルベントの動径成分で、L部分波に対応するものである。 $\delta_{\mathcal{L}}$ と $\mathcal{F}_{\mathcal{L}}$ はそれぞれ[s : A]チャンネルの仮想散乱問題のL部分波に対応する phase shift と波動関数の動径成分である。保存量である全角運動量 \mathcal{J} により状態を整理する。この際の角運動量の結合係数を表す因子 S は以下のように与えられる。

$$S(\mathcal{J}, \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) = \frac{(2\ell_{\beta}+1)(2\mathcal{L}+1)}{4\pi(2\mathcal{L}+1)} \times \langle \mathcal{L}0 | L\ell_{\beta}0, 0 \rangle^2 \left\langle (L(\ell_{\beta} \frac{1}{2}) j_{\beta}) \mathcal{J} \middle| (L(\ell_{\beta}) \mathcal{L} \frac{1}{2}) \mathcal{J} \right\rangle^2.$$

積分 $B^{(II)}$ が \mathcal{J} に依存しないことに留意して、

$C_{BS}^{(II,1)}$ を与えるサムのうち、 \mathcal{J} による和を行うと、

$$\sum_{\mathcal{J}} S(\mathcal{J}, \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) (-1)^{\mathcal{L} + \frac{1}{2} - \mathcal{J}} = \frac{1}{2} (-1)^{\ell_{\beta} + \frac{1}{2} - j_{\beta}} C_S^{(-)}(\mathcal{L}, L, \ell_{\beta})$$

の関係が得られる。これにより、 $C_{BS}^{(II,1)}$ は j_{β} による分裂が電子状態に存在しなければ零になることが保証された表式：

$$C_{BS}^{(II,1)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}) = \frac{1}{2} \sum_{j_{\beta}} (-1)^{\ell_{\beta} + \frac{1}{2} - j_{\beta}} B^{(II)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) \times C_S^{(-)}(\mathcal{L}, L, \ell_{\beta})$$

で与えられる。ここで、 $C_S^{(-)}$ は

$$C_S^{(-)}(\mathcal{L}, L, \ell_{\beta}) = \frac{\mathcal{L}(\mathcal{L}+1) - L(L+1) + \ell_{\beta}(\ell_{\beta}+1)}{\mathcal{L}(\mathcal{L}+1)} \times \frac{2\mathcal{L}+1}{4\pi} \langle \mathcal{L}0 | L\ell_{\beta}0, 0 \rangle^2.$$

電子移動の2次摂動の範囲で、スピンに依存せず対称成分型の補正項も生じる：

$$T_{eff\,0}^{(II)}(\mathbf{K}_f, \sigma \leftarrow \mathbf{K}_i, \sigma) = 4\pi \sum_{\mathcal{L}} (2\mathcal{L}+1) t_{0, \mathcal{L}\sigma}^{(II)} P_{\mathcal{L}}(\cos\theta_{\mathbf{K}_f \mathbf{K}_i}). \quad (3)$$

ただし、 $t_{0, \mathcal{L}\sigma}^{(II)}$ は次のように与えられる：

$$t_{0, \mathcal{L}}^{(II)} = \sum_{\mathcal{J}, j_{\beta}} B^{(II)}(K, k_{\beta}; \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}) \frac{2\mathcal{J}+1}{2(2\mathcal{L}+1)} \times S(\mathcal{J}, \mathcal{L}, L, \ell_{\beta}, j_{\beta}).$$

ちなみに、[s : A]チャンネルにおける仮想散乱問題に対するT行列は対称成分であり、

$$T_{eff\,0}^{(0)}(\mathbf{K}_f, \sigma \leftarrow \mathbf{K}_i, \sigma) = 4\pi \sum_{\mathcal{L}} (2\mathcal{L}+1)$$

$$\times \left(-\frac{\hbar^2}{2m_n K} e^{i\delta_{\mathcal{L}}} \sin\delta_{\mathcal{L}}\right) P_{\mathcal{L}}(\cos\theta_{\mathbf{K}_f \mathbf{K}_i}). \quad (4)$$

と与えられる。

式(4)に(2)と(3)の修正項を加えた全T行列の絶対値の2乗により散乱確率を求める。T行列の対称成分と非対称成分、(2)のクロスタームが散乱確率の非対称性成分となる。AuとPbの場合に求めた非対称度Aの θ 依存性を図2に示す。非対称度AはAuの場合には θ が90°付近で符号変化を示す。一方、Pbの場合には符号の変化を示さない。計算による θ 依存性の定性的な振る舞いは実験のbとaグループのそれぞれに対応する。

実験との対応の詳細な部分では問題は残っている。本課題ではHe1s準位の表面効果による上昇分を \mathbf{E}_{mod} としてパラメータとした。 \mathbf{E}_{mod} による単純化を含め、He核に対する標的内核ポテンシャルの選び方(+Z|e|)のクーロン力と仮定し、カットオフは角運動量 \mathcal{L} の和の最大値をKに限った)など、改良すべき点も

多い。しかしながら、異常スピン軌道結合の起源が仮想電子移動励起状態で働く電子のスピン軌道相互作用であるとするこの、大筋での正しさを計算結果は示していると考える。

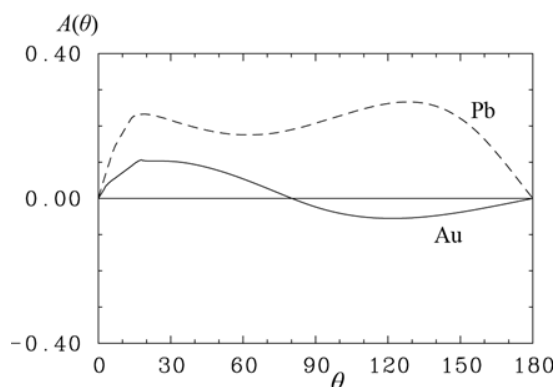


図 2 PbとAuに対する A の θ 依存性の計算値。LDAによる5d状態の準位は $-0.61\text{Ry}(\text{Au})$, $-1.66\text{Ry}(\text{Pb})$ である。He1sの準位は -1.53Ry 。He核に対する標的的内核ポテンシャルは $Z=20$ を仮定し、 E_{mod} は 0.25Ry を仮定した。図の $A=0.4$ は40%に対応する。

(3) 纏めと課題

項目(2)で述べたように、スピン偏極 He^+ ビームの常磁性物質による散乱で見出された異常スピン軌道結合の起源は、仮想電子移動励起状態における電子の原子的スピン軌道相互作用にあると考えられる。この機構により、AuやPt等の比較的浅い占有5d電子を持つ系では、非対称度が散乱角 90° 付近で符号変化を示すこと、PbやBi等、深い準位の5d電子を持つ系は 90° 付近の符号変化が生じなくなること、が導かれる。後者の系の5d電子はHe1s状態と共鳴励起しやすいエネルギー準位をもつ。

スピン軌道結合の生じる条件として、中間励起状態にHe核が運動することを取り入れることが必要であった。低エネルギー原子散乱を扱う標準的な方法では、断熱近似を基礎にHe核の位置座標を固定して、移動積分を含めた電子系の固有解を求める。この固有値をもとに分子間ポテンシャルを定め、散乱問題を解く。スピン軌道結合を求めるには、この出発点から、核の運動と電子のスピン軌道相互作用を取り入れる近似に進める必要がある。

研究目的の第(3)項目については、期間内に手掛けることが出来なかった。散乱角依存性の符号変化が共鳴の程度により支配される等の現象は、単純な古典力学の形式内に取り入れることが可能であるかなど、非自明な問題点もあり、今後考察を進める。

本課題の遂行に当たり、共同研究者である物・材機構の鈴木拓氏には、彼らの実験の詳細の説明をはじめ、様々な参考文献の紹介や有益な助言を頂いた。心より感謝いたします。

<引用文献>

- ①T. T. Suzuki and Y. Yamauchi, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. A **575**, 343 (2007)
- ②T. T. Suzuki, Y. Yamauchi, and S. Hishita, Phys. Rev. Lett. **107** 176101 (2001)
- ③T. T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinokura, T. Hirahara, and S. Hasegawa, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B **354**, 163 (2015).
- ④O. Sakai, and T. T. Suzuki, J. Phys. Soc. Jpn. **87** 054302-1~13 (13p) (2018).
- ⑤酒井治、鈴木拓、西野正理、原子衝突学会第38回年会、理研、2013.11.16~17.
- ⑥O. Sakai and T. T. Suzuki, J. Phys. Soc. Jpn. **86** 064301 (2017)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- ①Osamu Sakai and Taku T. Suzuki, Effects of the Electronic Spin-Orbit Interaction on the Anomalous Asymmetric Scattering of the Spin-Polarized He^+ Beam with Paramagnetic Target Materials II. Partial Wave Representation, J. Phys. Soc. Jpn. (査読あり) **87** 054302-1~13 (13p) (2018), DOI <http://doi.org/10.7566/JPSJ.87.054302>
- ②T.T.Suzuki and O. Sakai, Spin-orbit coupling and surface magnetism coexisting in spin-dependent low-energy He^+ -ion surface scattering, Phys. Rev. (査読あり) **B95** 155437-1~6 (6p) (2017), DOI:10.1103/PhysRevB.95.155437
- ③Osamu Sakai and Taku T. Suzuki, Effects of the Electronic Spin-Orbit Interaction on the Anomalous Asymmetric Scattering of the Spin-Polarized He^+ Beam with Paramagnetic Target Materials, J. Phys. Soc. Jpn. (査読あり) **86** 064301-1~6 (6-p) (2017) DOI <http://doi.org/10.7566/JPSJ.86.064301>

④鈴木拓、酒井治、偏極 $^4\text{He}^+$ イオンビームによるスピン依存イオン散乱とその応用、表面科学（公益社団法人日本表面科学会）（査読あり） Vol.38(2017) No.4 p.164-169 (J. Surf. Sci. Jpn. 38 164 (2017),
Doi <https://doi.org/10.1380/jsssj.38.164>

⑤T.T. Suzuki and O. Sakai, Oscillatory spin asymmetric scattering of low-energy He^+ ions on Sn surfaces, Nucl. Instrum. Methods in Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. (査読あり) 382 2-6 (2016).
DOI:10.1016/j.nimb.2016.02.064

⑥Sin-ichi Kimura, Yong Seung Kwon, Yuji Matsumoto, Haruyoshi Aoki, and Osamu Sakai, Optical Evidence of Itinerant-Localized Crossover of 4f Electrons in Cerium Compounds, J. Phys. Soc. Jpn. (査読あり) 85 083702-1 (5p) (2016),
DOI <http://doi.org/10.7566/JPSJ.85.083702>

⑦T. T. Suzuki, O. Sakai, S. Ichinose, T. Hirahara and S. Hasegawa, Target element dependent spin-orbit coupling in polarized $^4\text{He}^+$ ion scattering, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B-Beam Interact. Mater. (査読あり) 354 163-166 (2015),
DOI:10.1016/j.nimb.2014.11.055

[学会発表] (計 6 件)

①酒井治、鈴木拓、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における異常なスピン軌道相互作用の理論II、日本物理学会 第73回年次大会（東京理科大学野田キャンパス、2018.03.22~03.25）、22pK204-4

②酒井治、鈴木拓、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における異常なスピン軌道相互作用の理論、日本物理学会 2017年秋大会（岩手大学上田キャンパス、2017.09.21~24）、22pA18-11

③酒井治、鈴木拓、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における異常なスピン軌道相互作用の起源V、日本物理学会 第72回年次大会（大阪大学豊中キャンパス、2017.03.17~03.20）、17pC24-1

④酒井治、鈴木拓、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における異常なスピン軌道相互作用の起源VI、日本物理学会 2016年秋大会（金沢大学角間キャンパス、2016.09.13-16）、13aKK-2

⑤酒井治、鈴木拓、西野正理、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における異常なスピン軌道相互作用の起源III、日本物理学会 第71回年次大会（東北学院大学泉キャンパス、2016.03.19~03.22）、19aAE-12

⑥酒井治、鈴木拓、西野正理、スピン偏極 He^+ ビーム散乱における異常なスピン軌道相互作用の起源II、日本物理学会 2015年秋季大会（関西大学千里山キャンパス、2015.09.16-19）、16aAA-2

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
柳町治 (酒井治) (Yanagimachi Osamu)
一般財団法人総合科学研究機構
特任研究員
物質・材料研究機構 客員研究員
研究者番号：60005957

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし

(4) 研究協力者
鈴木拓 (Taku T. Suzuki)
物質・材料研究機構 主席研究員