

陽電子ビームで電子スピンを見る

Observation of electron spin using positron beam

河裾 厚男 スピン偏極陽電子ビーム研究グループ
Atsuo Kawasuso Research Group for Spin-Polarized Positron Beam

電子の電荷だけでなく、スピンという自転に似た性質も利用する「スピントロニクス」の研究により、新しい現象が次々と発見されている。研究をさらに進展させるため、電子スピンを見る新しい手法が待ち望まれていた。2013年、河裾厚男グループリーダーたちは、陽電子ビームで電子スピンを見る装置の開発に成功した。

Novel phenomena have been successively discovered in the study of “spintronics” which is to use a rotation-like spin property of electrons besides their electric charges. Dr. Atsuo Kawasuso’s group successfully developed an apparatus to observe electron spin using positron beam.

歴史に埋もれた現象を掘り起こす

2010年、先端基礎研究センターに前川禎通 新センター長が就任した。「前川センター長は“不可能だと思われることでも失敗を恐れずにやるべきだ”という方針です。そこで私は、陽電子の研究の歴史に埋もれた現象をリバイバルさせようと思いました」と河裾厚男グループリーダー(GL)は振り返る。

陽電子は、1930年代に発見されたプラスの電荷を持つ粒子で、電荷の符号以外は電子とほぼ同じ性質を持つ。陽電子と電子が結合すると対消滅してガンマ線を出す。「1950年代の研究により、そのガンマ線の観測によ

Reinvestigation of phenomena hidden in history

Prof. Sadamichi Maekawa was appointed to Director General of ASRC in 2010. “His policy was to challenge the impossible regardless of a risk of failure. I then decided to reinvestigate immersed phenomena in history of positrons study.” said Dr. Kawasuso.

A positron, first discovered in the 1930th, is a particle with positive charge, and possesses almost the same property as an electron apart from its sign of charge. Binding of a positron and an electron induces annihilation and emits gamma rays. Early studies done in the 1950th demonstrated that a direction of electron

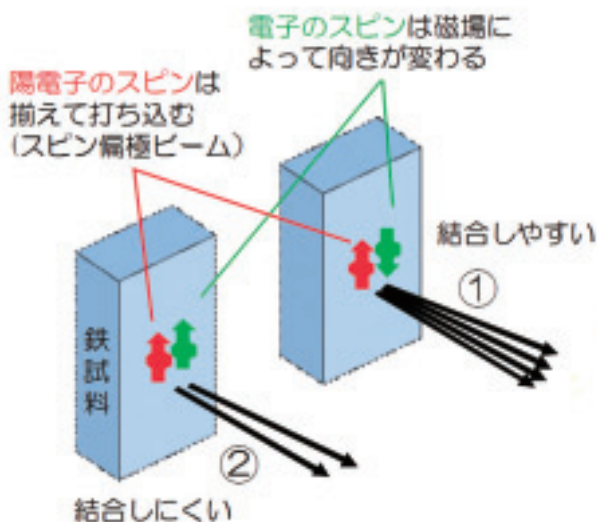


図1 陽電子ビームで電子スピンを見る原理

陽電子と電子のスピンが異なる場合、両者は結合しやすく、対消滅が頻繁に起きて強いガンマ線が発生する(①)。スピンの向きが同じ場合、両者は結合しにくくガンマ線の強度は弱くなる(②)。

Fig.1 Principle of observation of electron spin using positron beam

When spin directions of positron and electron are different, frequent bindings lead to frequent annihilations which result in emission of intense gamma rays (①). While the directions are the same, less binding occurrence and less intense gamma ray emissions (②).



河褌 厚男 (かわすそ あつお)

1967年、埼玉県生まれ。博士(理学)。東北大学大学院理学研究科博士課程修了。1995年、先端基礎研究センター 研究員。2003年より現職。専門は物性物理学(実験)。

Atsuo KAWASUSO

Born in 1967 in Sitama prefecture. Obtained Doctorate of Science at Graduate School of Science and Faculty of Science, Tohoku University. Became a researcher at JAEA since 1995. Current position held since 2003. The fields of experts is the condensed matter physics(Experiment).

り電子スピンの向きを知ることができることが分かりました」

スピンとは自転に似た運動量で、アップとダウンの2種類の向きがある。スピンを持つことで、陽電子や電子には磁性が生じる。

陽電子と電子のスピンの向きが反対の場合、両者は結合しやすく、対消滅が頻繁に起きて強いガンマ線が出る。両者のスピンの向きが同じ場合には結合しにくく、ガンマ線の強度は弱くなる。この現象を利用して、スピンの向きをそろえたスピン偏極陽電子ビームを発生できれば、それを物質に当てて出てくるガンマ線の強度を測定することで、物質中の電子スピンの向きを知ることができる (図1)。

「1950年代には物質中で原子が欠けた原子空孔や結晶の格子欠陥を陽電子で調べられることも分かり、その手法が広まりました。一方、スピン偏極陽電子を発生させて電子スピンの向きを知る装置の開発は進展しませんでした。もしかしたら、開発を阻む困難があるために歴史に埋もれてしまったのかもしれませんが。それでも私は、その開発に挑戦してみようと思いました」

窒化ガリウムで陽電子源をつくる

窒化ガリウムで陽電子源をつくるスピン偏極陽電子ビームを、どのように作りだすのか。「放射性同位元素の原子核の中で陽子が中性子に変わる β^+ 崩壊により、陽電子が飛び出てきます。そのとき同一方向に飛び出てきた陽電子の多くは、スピンの向きがそろっています。エネルギーの高い陽電子ほど、スピンの向きがそろっていて偏極率が高いという性質があります」

放射性同位元素の種類によって陽電子が飛び出てくる最大エネルギーは異なる。これまで物性研究の実験に用いる陽電子源として、ナトリウム22が一般に使われてきた。そこから最大で0.5 MeVというエネルギーの陽電子が出てくる。理論的には、そのうちの70%の陽電子のスピンの向きがそろっている。

さらにエネルギーの高い陽電子を出す放射性同位元素

spin can be observed with detection of the gamma rays.

Spin is momentum, similar to rotation, flowing to two directions both upward and downward. With spin, positron and electron induce magnetic field.

When spin of positron and electron are oppositely oriented, the binding is prone to occur, and accordingly increasingly frequent annihilations yield relatively intense gamma rays. When the directions are the same, less frequent binding occurs, and less intense gamma rays are emitted as a consequent. Based on this phenomenon, by exposing spin-aligned positron beam to an object to measure strength of the gamma ray emitted, directions of electron spin in the object can be observed. (Fig.1)

Dr. Kawasuso says “In the 1950th, it was found that atomic vacancies and lattice defects were able to be detected by using positrons, and the method became widely employed. On the other hand, development of apparatuses to generate spin-polarized positron for observation of electron spin directions did not progress. There might have been a great difficulty to hamper the development, but I decide to give it a try.”

Developing a positron source using GaN

Dr. Kawasuso explains how spin-polarized positron beams can be generated. “During a radioactive isotope disintegration in which a proton is transformed into a neutron, a positron pops out. In most of the positrons bounce out to one direction, their spin, too, is aligned in the same direction. The more a positron has high energy, the more precisely the direction of spin and higher the polarization that has.”

The maximum energy of the bounced positrons varies depending on types of radioactive isotopes. In experiments of solid state physics, Na-22 has generally used as a positron source. Positrons with maximum energy of 0.5 MeV can be produced there. Theoretically, 70% of them are spin-aligned.

Therefore, more highly-polarized spin-aligned positrons will be available by using radioactive isotopes generating positrons with higher energy. Radioactive isotopes can be produced by irradiation

を使えば、スピンのそろった偏極率の高い陽電子が利用できる。放射性同位元素は、加速器で生み出した陽子ビームを安定な元素の標的に照射してつくり出す。その半減期が短いと加速器で放射性同位元素をつくり続けながら、電子スピンを調べる実験をする必要がある。

「私たちが加速器を使用できる時間は限られているので、1回の照射で半減期がなるべく長く、陽電子のエネルギーが高い放射性同位元素をつくる必要がありました。そこで、ゲルマニウム68を選びました」

ゲルマニウム68の半減期は約280日と長く、最大で1.9 MeVの陽電子を出す。その理論的な偏極率は94%とナトリウム68に比べて24%も高い。「ゲルマニウム68をつくるために、安定なガリウムの標的に陽子ビームを照射します。その実験を始めたのですが、なかなかうまく行きませんでした。陽子ビームを照射すると標的は高温になります。ガリウムの融点は29℃と低いので溶けてしまうのです。ガリウムを金属容器に閉じ込めて陽子ビームを照射しましたが、容器から漏れ出てしまいました。冷却も試みましたが駄目でした。どうすればいいのか、途方に迷いました」

河堀GLは、青色LEDなどに使われている窒化ガリウムを試してみることにした(図2)。「その融点は2000℃以上と高いのですが、標的として使ってみようとは、すぐには思いませんでした。窒素とガリウムが1対1の化合物なので、純粋なガリウムを標的にする場合に比べて、ゲルマニウム68の生成効率は半分になってしまうから

of proton beams with an accelerator onto a target of a stable isotope. If a produced radio isotope has a short half-life, investigation of electron spin requires to be performed while the radioactive isotopes are being produced at the accelerator.

“Due to a limited machine time allotted to us, we need to produce radioactive isotopes which have a longer half-life and generate high-energy positrons at one irradiation. So we chose Ge-68.”

Ge-68 emits positrons with the maximum energy of 1.9 MeV and its half-life is as long as 280 days. Its theoretical polarization level is 94% which is higher by 24% than that of Na-22. “We first irradiated proton beams onto a stable gallium(Ga) target in order to generate Ge-68, but it did not work.” He continues, “A gallium target is heated to a high temperature when irradiated by proton beams, but it was melt because the melting point of gallium is as low as 29°C. We irradiated gallium sealed in a metal container, but gallium melted inside and leaked out. An attempt of cooling, too, came to naught. We were quite at a loss.”

He, then, gave another try with GaN which is used in blue LED. (Fig.2) “I had never thought about using it as a target although its melting point is higher than 2000°C. Generation efficiency of Ge-68 using GaN, a compound of one to one in ratio, as target, is supposed to be reduced by half compared to a case of using pure gallium. Our experiment, however, proved that Ge-68 was generated at the efficiency rate theoretically predicted without melting the target.”



図2 ゲルマニウム68生成用の窒化ガリウム標的とスピン偏極陽電子ビーム発生装置

Fig.2 GaN target to generate Ge-68 and the spin-polarized positron generation apparatus.

です。ただし実験をしてみると、標的は溶けることなくほぼ理論通りの効率でゲルマニウム68を生成できることが分かりました」

2013年、河堀GLたちは偏極率が47%の陽電子ビームの開発に成功した。そして、そのスピン偏極陽電子ビームで純鉄中の電子スピンを調べる実験を行った。すると、陽電子と電子のスピンの向きが同じ場合と違う場合で、強度の異なるガンマ線が測定された。スピン偏極陽電子ビームで電子スピンを見る手法の開発に成功したのだ。

陽電子ビームで物質表面や薄膜の電子スピンを見る

これまでの電子工学では主に電子の電荷が利用されてきた。さらに電子のスピンを利用するスピントロニクスにより、消費電力が格段に少ないデバイスや、高効率の太陽電池や熱電変換素子などをつくることが目指されている。

「近年、スピントロニクスの研究により、予想もしていなかった現象が次々と発見されています。理論も進展し、新しい現象が予言されています。発見された現象を解明したり理論の予言を検証したりするために、スピンを見る新しい手法が待ち望まれていたのです」と河堀GL。

スピントロニクスで肝心の電子スピンを見るために、中性子や放射光X線、ミュオンなどが用いられている。ただしスピンを見る手法には一長一短がある。例えば中性子ビームなどは透過力が強いので、厚い材料の内部を調べるには有効だが、物質の表面や薄膜の電子スピンを見ることは難しい。一方、陽電子ビームは物質表面や薄膜の測定に適している。

「物質表面は、さまざまな現象が現れる場です。また新しく合成される材料のほとんどは薄膜での状態です。物質表面や薄膜の電子スピンを陽電子ビームで見ることで、新しい現象を発見できるはずです」

中性子などでスピンを見る手法では、電子スピンのように生じる磁場によって中性子などが散乱される様子を測定して、間接的に電子スピンの向きを調べる。そのため、測定データの解釈には推測が入る余地がある。「一方、陽電子ビームでスピンを見る手法は、陽電子と電子が1対1で対消滅する現象を利用して、電子スピンを直接検出する点が大きな特徴です。シンプルな現象なので、測定データの解釈が容易です」

スピンのそろった大強度陽電子ビームを開発する

陽電子ビームで電子スピンを見る手法を発展させるため、ビームの強度を上げたいと河堀GLは語る。「現在、一つの試料を測定するのに数時間かかります。ビーム強

In 2013, Dr. Kawasuso and his colleagues succeeded in development of positron beams with polarization of 47%. Using the generated spin-polarized positron beams, they performed an experiment for investigation on electron spin in pure iron. Here, they discovered that, depending on spin direction of positrons and of electrons whether they are the same or not, the strength of the gamma rays measured varies. They successfully invented a method to observe electron spin by using spin-polarized positron beams.

Observation of electron spin in material surfaces and thin films using positron beam

So far, charges of electrons have generally been used in electric engineering. Additionally, spintronics, using spin of electrons, has been aiming at production of energy-saving devices and high efficiency solar cells and thermoelectric conversion elements.

“Recently, in the field of spintronics research, numerous unforeseen phenomena have been discovered one after another, and theoretical studies predict more to come out. In order to explore newly discovered phenomena and to verify theoretical predictions, a novel method to observe spin has long been anticipated.”

Electron spin, essential element in spintronics, can be observed using neutrons X-rays, and muons. These methods have, however, advantages and disadvantages. For instance, neutron beams, having high transmission, is effective in examinations of inside thick materials, but not of observation of electrons in thin films or on material surfaces. The method using the positron beams, on the other hand, is ideal for the latter.

“A variety of phenomena happens on material surfaces. Moreover, most novel materials are synthesized in the form of thin film. We are certain that more novel phenomena will be found through observation of electron spin on material surfaces and thin films by using positron beams.”

When using neutrons to observe spin, direction of electron spin is detected indirectly by measuring neutron scattering caused at an electron spin originated magnetic field. This may leave room for a speculation in the data interpretation. “The significant feature of the positron beam method is that it makes a direct observation of electron spin possible by making use of electron-positron annihilation. Obtained data based on this simple phenomenon is relatively easy to be interpreted.”

Development of spin-aligned high intensity positron beam

Dr. Kawasuso now intends to increase strength of the positron beam in order to advance the observation method of electron spin using positron

度を2桁強くすることで、10~20分で測定できるようになりたいと思います」

スピン偏極陽電子ビームの強度を高めるには、二つの方法がある。「一つは、スピンのそろっていない大強度の陽電子ビームのスピンをそろえる方法です」

日本では、高エネルギー加速器研究機構や産業技術総合研究所に大強度の陽電子ビームを発生する施設がある。「数年のうちに、それらの施設にスピンをそろえる装置の導入を提案したいと思います。現在、そのための手法について検討しているところです」

もう一つの方法は、よりエネルギーの高い陽電子を出す放射性同位体を用いるものだ。「例えばシリコン27は4MeVという高いエネルギーの陽電子が出てきます。理論的な偏極率はほぼ100%なので、より強度の高い陽電子ビームが得られます。ただし、半減期は4秒なので、加速器でシリコン27をつくり続けて、電子スピンを調べる実験をする必要があります」

陽電子ビームで電子スピンを見る手法の開発を進めているのは、世界でも河堀GLたちだけだ。「ぜひ、ほかの研究グループも参入して、この手法と一緒に発展させてほしいですね」と河堀GL。

そのためにもスピン偏極陽電子ビームがスピントロニクス研究に有用であることを実証していく必要がある。

陽電子ビームでスピントロニクスを推進する

先端基礎研究センターの前川禎通 センター長は、スピントロニクスの先駆者の一人である。また同センター

beams. “At present, it takes hours to measure one sample. We want to shorten it to 10 to 20 minutes by strengthening the beam by two orders of magnitude.”

There are two ways to increase strength of spin-polarized positron beam. “One is to get spin direction of a spin-disordered high intensity positron beam lined up.”

In Japan, the High Energy Accelerator Research Organization and the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology have facilities to generate high intensity positron beam. “In the coming years, we would like to propose an installation of equipment to manipulate spin direction. We are currently working on a technique for the manipulation.”

Another method is to use radioactive isotopes with higher energy positron. Dr. Kawasuso gives an example. “Si-27 generates positron with high energy of 4 MeV. As its theoretical polarization is considered to be almost 100%, strong positron beams should be obtained. Because Si-27 has a short half-life of 4 seconds, successive production of Si-27 at accelerator is essential to implement an electron spin observation.”

There is only his group in the world working on development of this innovative method. “We would be happy to work with other researchers to further advance this method.”

In order to realize such collaboration, it is necessary to demonstrate a capability of spin-polarized positron beam in the field of spintronics.

Fostering of Spintronics using positron beam

Prof. Maekawa, Director General of ASRC, is a

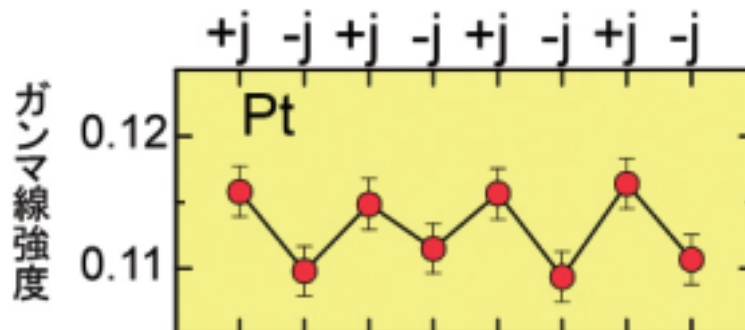


図3 陽電子ビームによるスピン蓄積の実験データ
ガンマ線の強度の変化が白金表面にスピン蓄積が起きていることを示している。

Fig.3 Experimental data on spin accumulation obtained by the use of positron beam
Intensity change of gamma ray indicates occurrence of spin accumulation.

の力学的物質・スピン制御研究グループを率いる齊藤英治GLは、スピントロニクス的重要な柱である「スピン流」の研究のトップランナーだ。電荷の流れが電流であるのと同様に、スピンの流れがスピン流である。

「齊藤GLたちは、スピン流により物質表面にアップあるいはダウンスピンの電子が集まる“スピン蓄積”と呼ばれる現象の研究をしています。私たちは齊藤GLからスピン蓄積を示す白金試料を提供してもらい、スピン蓄積を陽電子ビームで確かめることに成功しました」(図3)

共同研究の輪は、センター外の研究機関や大学にも広がり、新しい試料が次々と河堀GLの下に届けられ始めた。「実は、私は大学院で半導体の物性研究をしていました。半導体の性能には結晶の格子欠陥が大きく影響するため、陽電子ビームを用いて測定していました。その後、陽電子ビームの専門家になりましたが、利用者である物性の研究者たちが何を知りたいのか理解できません。今回の研究開発では、センター内に利用者であるスピントロニクス一流の研究者がいて、気軽に相談できたことがとても役立ちました」

河堀GLは、10年ほど前から高崎市の合唱団に参加している。「私は自然の摂理、普遍的な真理を探究したいと研究者を志しました。音楽と研究は似ています。研究を続けていると、誰も見たことがない新しい現象と出会うことができます。音楽も続けていると、こういう発声の仕方をするとか、こういう響きになるのかと、新しい発見があります」

河堀GLたちが開発したスピン偏極陽電子ビームは、自然の摂理を探究する強力な手段となる。

(取材・執筆：立山晃／フォトンクリエイト)

leading expert in the field of spintronics. Prof. Eiji Saitoh, the leader of the Research Group for Spin Manipulation and Material Design by Combining Spintronics and High-Speed Rotation Technique, is a pioneer researcher of spin current, a principal pillar in spintronics. As with electric current, a flow of electric charge, a flow of spin is called spin current.

“Prof. Saitoh and his group study a phenomenon called “spin accumulation” where electrons with up- or down-spin assemble on the material surface. With Pt sample indicating spin accumulation provided by Prof. Saitoh, we have successfully identified the phenomenon using positron beams. (Fig.3)

The circle of the collaboration has expanded to universities and research institutions outside ASRC, and new samples have been brought to Dr. Kawasuso. “I used to study solid state physics of semiconductor as my postgraduate research. Positron beams were used to measure crystalline lattice defects which would greatly influence performance of semiconductors. I later became a positron beam researcher, but, because of my background, I am aware of what solid state physicists want to know. In the current collaboration, we have been very fortunate to have spintronics experts in the center we could frequently interact with.”

Dr. Kawasuso has been a member of choral society of Takasaki city for ten years. “I aimed to be a scientist to seek natural laws and a universal truth. Music is akin to science research. As a researcher, I have met never-seen-before phenomena. In music, I have also discovered something new such as a striking correlation between vocal technique and harmony.”

Spin-polarized positron beam, developed by Dr. Kawasuso and his group, will be a powerful tool to explore natural providence.



スピン偏極陽電子ビーム研究グループの研究者たち

The members of Research Group for Spin-Polarized Positron Beam