

論文審査結果の要旨

論文提出者氏名 井上 耕治

本論文は2部構成であり、第1部の陽電子消滅2光子2次元角相関装置用の新しいタイプの位置敏感 γ 線検出器の開発で、序論に続き、第2章は従来の位置敏感 γ 線検出器の概説、第3章は新しいタイプの位置敏感 γ 線検出器の試作、第4章が陽電子消滅2光子2次元角相関装置用の位置敏感 γ 線検出器の開発の記述に当てられている。第2部は絶縁体単結晶中の陽電子消滅の研究で、序論は陽電子消滅法とコンプトンプロファイル法による運動量分布測定の概説、第2章はTiO₂単結晶の電子及び陽電子状態の研究、第3章はBaF₂単結晶の電子状態およびポジトロニウムの研究、第4章はSrF₂単結晶中のポジトロニウム研究に当てられている。

陽電子消滅2光子2次元角相関法(2D-ACAR)は、物質中の電子の運動量分布を調べるための有力な手段として知られている。物質中に入射された陽電子は主に物質の価電子と対消滅して2本の γ 線を放出する。この際、電子・陽電子の質量を含めたエネルギーと、運動量の双方が保存されるために、2本の γ 線は正反対方向からわずかの角 θ だけずれて放出される。その角度分布を測定することで、電子の運動量分布がわかる。

それを測定するための装置の心臓部が、 γ 線の2次元位置敏感検出器である。ただし、位置のみでなく2本の γ 線の同時計測が必要なので、時間分解能も必要である。

従来、この目的のために使われる γ 線検出器は、個別のシンチレーション検出器のアレイ、アングラー・カメラ、鉛コンバータ付電離箱、柱状のシンチレータのアレイと位置敏感光電子増倍管等が用いられている。

本研究では、2676本の柱状BGOシンチレータ結晶のアレイを光学ガラス板の上に並べて、その発光を36個のメタルパッケージ位置敏感光電子増倍管(PMT)で受けて、その出力を抵抗アレイで分割することにより、 γ 線がどのシンチレータに入射したかを判別するシステムを開発した。

本格的な装置を作る前に、324個のシンチレータアレイに4個のメタルパッケージ位置敏感PMTで受けたプロトタイプを作製して、位置信号の分離や分解時間や、板ガラスの厚さや屈折率の最適化を行った。その結果を参考にして、本格的な装置の作製を行った。

PMTの出力は576個あるが、これを抵抗鎖につないで縦横各8個ずつの出力にしてとりだし、工夫した演算で、2676本のシンチレータ結晶の一つ一つを明瞭に判別した。これにより位置分解能、検出効率、時間分解能を総合して世界最高クラスの性能が得られた。

第2部では、陽電子消滅法とコンプトンプロファイル(CP)法を用いて行った、絶縁体結晶中の電子状態と絶縁体中に生成するポジトロニウムの研究が報告されている。陽電子消滅法の測定は東京大学で、CPの測定はSPring-8で行った。

従来、 TiO_2 、 BaF_2 、 SrF_2 の3種類の絶縁体の電子状態は運動量分布の側面からのバンド理論との比較はほとんど行われていなかった。本実験では、第一原理計算のひとつである FLAPW (Full Potential Linearized Augmented Plane Wave) 法によるバンド計算と実験との詳細な比較を行った。

まず、 TiO_2 単結晶では、陽電子消滅2光子角相関 (ACAR) に対する磁場の効果から、 Ps が生成しないことを確かめた。ACAR にはこれまで絶縁体中では見られていない大きな異方性を見出された。これが電子の運動量分布によるものか陽電子の効果であるかを見るために、CP の測定を行った。その結果、電子運動量分布にも異方性が見られたが、2光子角相関の異方性より小さかった。このことから、ACAR の異方性は陽電子の波動関数に起因することがわかった。理論計算ではこの異方性は説明できず、電子陽電子相関の理論を整備する必要があることがわかった。

次に BaF_2 単結晶の測定を行った。この物質にはポジトロニウムが生成していることがわかったので、その温度依存性を 10K から室温までの範囲で測定した。90K 付近に、陽電子寿命の急激な変化が見られた。光吸収や発光スペクトルにもやはり 90K 付近に異常が見られる。ただしこの現象はこれまであまり注目されてこなかったようである。CP の温度依存性も調べたが、顕著な変化は見られなかった。CP の測定値とその第1原理計算との比較も行ったが一致はあまりよくない。

最後に SnF_2 単結晶についても、ポジトロニウムの生成が見られたので、陽電子消滅法ではポジトロニウムの研を行った。10K から室温の範囲で陽電子寿命と消滅 γ 線のドップラー広がりを測定した。また磁場中での ACAR を用いてポジトロニウムの運動量分布を抽出した。その結果、180K 付近で、ポジトロニウムが自由なブロッホ状態から自縄自縛状態へ遷移することが観測された。

このように、本研究は、陽電子消滅2光子角相関法装置に用いるための γ 線位置敏感検出器として、新しいタイプの世界最高の性能のものを開発し、また、陽電子消滅2光子角相関法とコンプトンプロファイル法を用いて、これまでほとんど行われていなかった、絶縁体結晶中の電子の運動量分布の精密測定を世界をリードする形で行ったものであり、博士の学位に十分値すると認められる。

なお、本論文は、指導教官及び久保康則教授ほかとの共同研究であるが、論文提出者が主体となって分析及び検証を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

よって本論文は博士(学術)の学位請求論文として合格と認められる。