

ポジトロニウム回折の初観測 ～ポジトロニウムは消滅するまで旅をする～

東京理科大学 理学部第二部 物理学科 准教授 | ^{なが た ゆう ご} 永田 祐吾

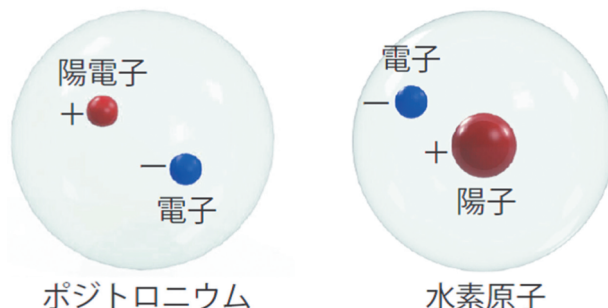
反物質

反物質、あるいは反粒子という言葉聞いたことはありますか？ 有名なアニメ（新世紀エヴァンゲリオンなど）や映画（天使と悪魔など）の題材にもなっているので、聞いたことのある方もいるかもしれません。反物質はとても面白い性質を持ちます。それは物質と出会うと消滅するということです。消滅といっても本当に無くなるわけではなく、エネルギーが別の形に変わるということです。

最初に発見された反粒子は、電子に対する反粒子で陽電子（ポジトロン）と言います。それは1932年のことでした。陽電子は電子と同じ質量を持ち、同じように電気を帯びていますが、電気の符号は電子と逆のプラスです。電子と陽電子が出会うと、電子と陽電子は消滅し、その代わりに γ 線（放射線、エネルギーの高い光）に変わります。これを対消滅と言います。実は、出会ってすぐに消滅するとは限りません。例えば、出会ったときに、電子と陽電子が電氣的に引き合って、結合することでポジトロニウムという状態になることがあります。これは電子と陽子（プロトン）が電氣的に結合した水素原子と同じようなものです【図1】。粒子と反粒子が結合するとは非常に奇妙にも思えますが、実際に実験室で作り出すことができます。また、ポジトロニウムは原子核を含まないので、原子番号0の原子とも言えます。

ポジトロニウムは安定な状態ではなく、寿命（対消滅するまでの平均の時間）があります。長寿命のポジトロニウムだと142 ns（nsは 10^{-9} 秒）ほどです。短寿命のポジトロニウムだと、さらに1/1000の寿命です。短いと思われるかもしれませんが、消滅するまでに様々な実験を行うことができます。

陽電子以外の反粒子として、陽子に対する反陽子、



【図1】 ポジトロニウムと水素原子の比較
左図はポジトロニウムを、右図は水素原子を表します。+と-は電気の符号を表します。+と-の電気をもつ粒子は互いに引き合い、結合することがあります。

中性子に対する反中性子などがあり、1955年頃に発見されました。これらは対消滅によりパイ中間子という粒子などに変わります。陽子と反陽子が結合したものをプロトニウムと言います。

対消滅とは逆に、対生成という現象もあります。アインシュタインの質量とエネルギーの等価の式である $E=mc^2$ をご存じでしょうか。ここで E は静止エネルギー（止まっても持っているエネルギー）、 m は物体の質量、 c は真空中の光速を表します。この式は質量がエネルギーの一種であることを意味しています。例えば、1gの物質であれば、 $E=0.001 \times (3 \times 10^8)^2 = 9 \times 10^{13}$ J=90兆Jのエネルギーを持ちます。これは現在の日本人ひとり当たりが使用する電気エネルギーの数千年分に相当します。電子や陽電子は、 m_e を電子質量として $E=m_e c^2$ のエネルギーを持ちます（陽電子の質量は電子と等しい）。電子と陽電子のエネルギーの和である $2m_e c^2$ を超えるエネルギーを持つ γ 線が物質に衝突すると、その衝撃で γ 線は無くなるとともに電子と陽電子のペアが生成されます。これを対生成と言います。つまり電子と陽電子は双子として生まれるのです。陽子や反陽子も対生成によって双子の形で生まれます。

宇宙誕生初期に、物質は対生成によって生まれたと

考えられています。対生成における物質と反物質の双子の性質から、同じ量の反物質が同時に生まれたと考える必要があります。しかし、私たちの身の回りには物質ばかりで、反物質は見当たりません。宇宙を見渡しても、反物質の惑星や星は見つかっていません。これは現代物理学の理論では説明できず、大問題になっています。反物質研究はこの謎を解き明かす鍵になるかもしれません。

陽電子の応用では、癌の診断法として陽電子放射断層撮影 (PET) がよく知られています。大きな病院には導入されています。癌にはブドウ糖 (グルコース) が集まりやすいことが知られています。そこで陽電子を放出する放射性核種を持つグルコースに似た薬剤 (FDG) を患者の体に静脈注射します。すると FDG が癌に集まり、そこで陽電子が対消滅を起こすと、 γ 線が放出されます。 γ 線は貫通力が高く、人体の中で発生した γ 線は体を貫通して外に飛び出します。この γ 線を検出すれば癌の存在する場所が分かります。つまり、癌が γ 線で光っているように見えるということです。

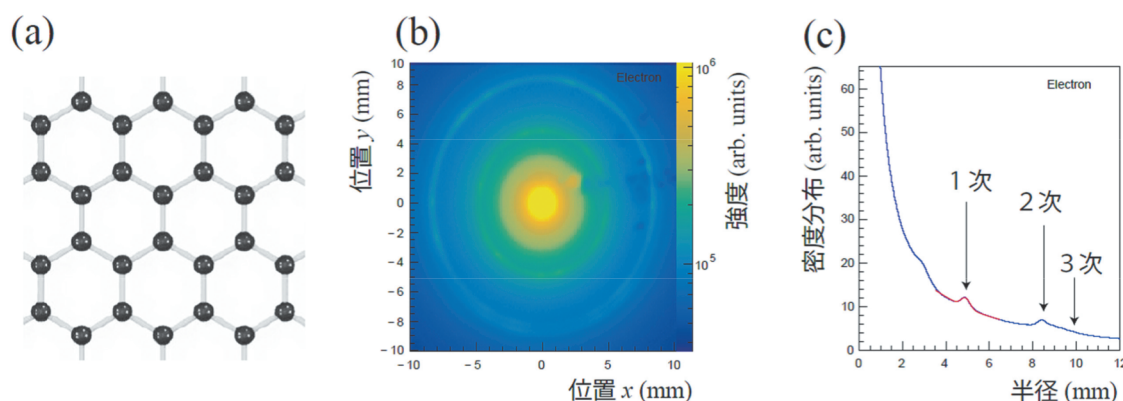
物質波の干渉

東京理科大学にはポジトロニウムのビーム生成装置があります。我々はポジトロニウムの興味深い性質を調べる研究をしています。本稿で紹介するのはポジ

トロニウムの回折 (あるいは干渉) 現象です。

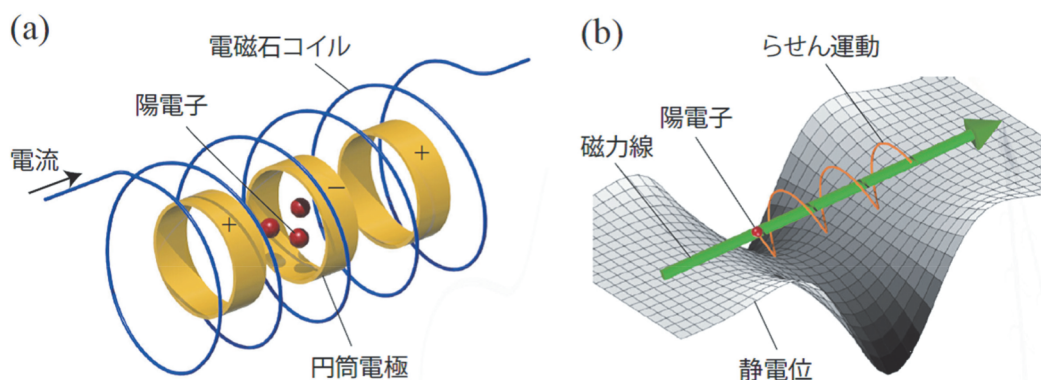
光は周期的な構造のものを通り抜けると、光の波の性質によって干渉し、明暗のパターン (波の強め合うところと弱めあうところ) を作ります。一方、物質は波ではないため、普通は干渉しないのですが、電子などの小さな粒子は、量子の性質によって波の性質 (波動性) が現れます。この波のことを物質波と呼びます。電子の波動性は 1927 年頃、デビッソンやガーマー、トムソンらによって、電子線を固体の結晶表面などに入射したときの回折による明暗のパターンを測定することで、初めて実証されました。この研究でデビッソンとトムソンはノーベル物理学賞を受賞しています。この実験は量子力学の発展に大きな役割を果たしました。その後、原子や分子、クラスター、最近では巨大分子なども、波としての性質を示すことが実験で実証されています。【図 2】は我々が測定したグラフェンという薄い二次元シート状の結晶を透過した電子による回折パターンを示しています。グラフェンは普通の三次元結晶とは異なり、非常に薄いので、電子が容易に透過します。その透過した電子は回折パターンを作り出します。

ポジトロニウムのような粒子と反粒子が結合した、不安定な原子は、波の性質を示して回折するのでしょうか。我々はポジトロニウムビーム装置を用いてポジトロニウムが回折するかどうかを実証するための実験を行いました。その結果を示す前に、ポジトロニウム



【図 2】 グラフェンを透過する電子の回折 (干渉)

(a) グラフェン。炭素原子による蜂の巣構造を持つ。(b) グラフェンに電子を通したときの電子のリング状の回折パターン。中央の明るいところは回折しなかった透過電子を示す。(c) 回折パターンの中心を原点として、横軸を原点からの距離 (半径) としたときの電子の密度分布。3 本の矢印は 1 次、2 次、3 次の明線の次数を表す。Modified from Y. Nagata et al.¹⁾, licensed under CC BY 4.0.



【図 3】 陽電子トラップの概念図

(a) 青線の電磁石のコイルと黄色の電極で構成され、その中央に陽電子を閉じ込めることができる。(b) 磁力線に巻き付く陽電子のらせん運動、さらに磁力線方向の陽電子の運動を閉じ込める静電位を示している。

ビームの生成に重要な 2 つの実験技術、陽電子トラップとポジトロニウム負イオンの生成法を紹介します。

陽電子トラップ

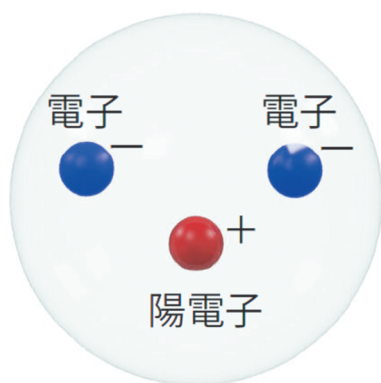
陽電子トラップは陽電子を捕獲する装置です。陽電子は空気中では分子と衝突して、分子の中にある電子と対消滅してしまいます。そのため、まずは装置の中身を真空にする必要があります。それにはステンレス製の容器を用い、容器中の空気を真空ポンプで排気することで真空を作り出します。しかし、これでも不十分です。陽電子は壁と衝突すると対消滅します。真空を作っている装置の壁を取り除くことはできませんので、ステンレス容器の中で陽電子を宙に浮かせる必要があります。浮遊させるには図のような円筒型の電極と電磁石を持つトラップを用います【図 3(a)】。電磁石のコイルは、右ねじの法則から円筒電極の軸に沿うような磁界を発生させます。陽電子のような電気を帯びた粒子は、フレミングの左手の法則から、磁力線に巻き付くように運動します【図 3(b)】。つまり、磁力線に巻き取られて、自由に動けなくなります。ただし、その場合でも磁力線の方にはらせん運動をしながらトラップの外に向かって移動することができます。陽電子を完全に閉じ込めるためには、中央の電極にマイナス電圧、両端の電極にプラス電圧をかけます。正の電気をもつ陽電子は、両端の電極から反発力を受けることにより、装置の中央で宙に浮いたまま完全に閉じ込めることができます。これがトラップの原理です。

ポジトロニウム負イオン生成法

陽電子を金属に打ち込むと、陽電子は金属中の原子と衝突することで徐々にエネルギーを失って、物質の温度程度に減速されます（熱化）。金属中には多数の電子が存在するため、陽電子はすぐに対消滅すると思うかもしれませんが、結晶性のよい金属であれば、しばらくは対消滅せず、例えば 100 nm 程度、拡散しながら移動することができます。

金属中には電子がたくさん含まれます。これはつまり電子にとって金属の中は居心地がよいということです。金属中から電子を外に取り出すにはエネルギーが必要になります。このエネルギーを仕事関数と言い、通常、正の値を取ります。陽電子は電子と異なりプラスの電気を持つため、金属中で居心地の悪い場合があります。例えば、タングステンという金属に打ち込んだ陽電子は熱化した後、居心地が悪いために表面から自然に飛び出します。これはエネルギーを与えなくても勝手に金属表面から飛び出すことを意味しており、仕事関数が負になっているとも言えます。このようなことは電子では絶対に起こりません。

陽電子がタングステン表面から飛び出すときに、表面で電子を 2 つ拾ってポジトロニウム負イオン【図 4】が生成されることがあります。さらにタングステン表面にアルカリ金属を薄く蒸着すると、大変効率よくポジトロニウム負イオンを生成できることが、東京理科大学の研究で明らかにされました。このポジトロ



【図4】 ポジトロニウム負イオン

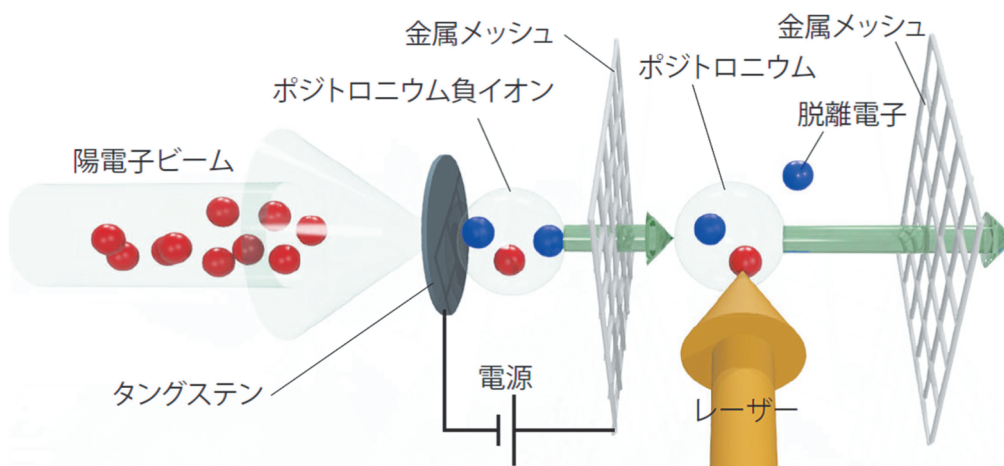
ニウム負イオンが、ポジトロニウムビームの生成に大きな役割を果たしました。

ポジトロニウムビームの生成

ポジトロニウム負イオンは、その名の通りマイナスの電気を帯びているので、近くに帯電した物体があれば、静電気力によって加速することができます。ただし、ポジトロニウム負イオンの寿命は約 0.5 ns なので、工夫が必要です。【図5】はポジトロニウム負イオン生成からポジトロニウム生成までの様子を示しています。陽電子トラップから打ち出した陽電子を薄いタングステンに打ち込むと熱化して、反対側の表面で電子を2つ拾ってポジトロニウム負イオンになりま

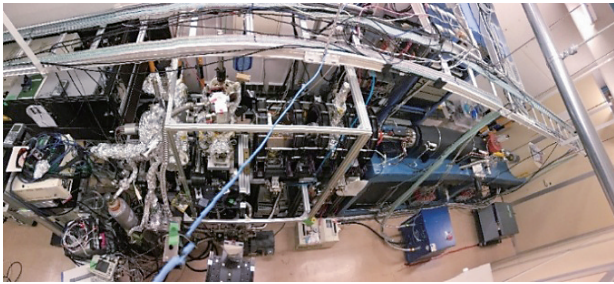
す。タングステンと金属メッシュの間に直流電源を使って電圧（実験では 3.5 kV）をかけると、静電気力によって負イオンを加速することができます。2枚の金属メッシュは、同じ電位にしておくとも静電気力は互いに打ち消されるため、負イオンは加速されずに安定に等速直線運動をします。このとき負イオンの運動エネルギーは 3.5 keV（キロ電子ボルト）です。そこにレーザーを照射して負イオンの中の1つの電子を取り除くことで（光による電子の脱離）、ポジトロニウムのビームが生成されます。これをポジトロニウム負イオンが消滅する前に速やかに行う必要があります。ビームとは、それぞれの粒子の運動の向きがそろっていて、さらに速さもそろっている状態のことを言います。ここではそれぞれのポジトロニウム負イオンを同じ電圧によって加速させることで、速度をそろえています。電子がひとつ脱離したことで、ポジトロニウムの運動エネルギーは $3.5 \text{ keV} \times 2/3 \sim 2.3 \text{ keV}$ になります。このときポジトロニウムの物質波としての波長は、約 18 pm（pm は 10^{-12} メートル）、グラフェンの格子定数（原子の並びの周期的な長さ）は 246 pm で、回折実験に適した条件になっています。

【図6】は東京理科大学に設置されているポジトロニウムビーム生成装置の写真です。



【図5】 ポジトロニウムビーム生成装置の概念図

陽電子ビームがタングステンに入射し、タングステン表面からポジトロニウム負イオンが放出されます。その負イオンはタングステンとメッシュの間に電圧をかけることで加速され、1枚目のメッシュを通り抜けた後、レーザーで電子1個が取り除かれ（光脱離）、ポジトロニウムになります。



【図 6】 ポジトロニウムビーム生成装置

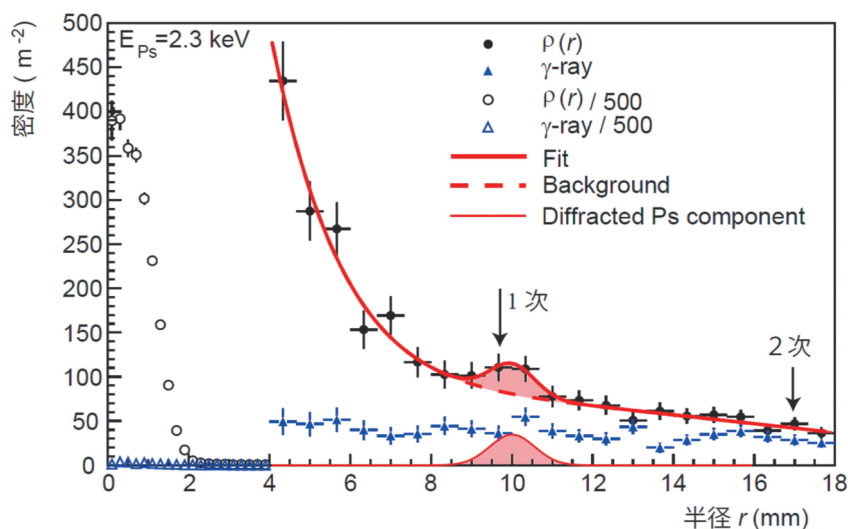
ポジトロニウムの回折

ポジトロニウムビームをグラフェンに打ち込み、グラフェンを透過したポジトロニウムが回折による明暗のパターンを示すかどうか実験を行いました。実験の準備として、上述のタングステン表面のアルカリ金属の蒸着膜を良い状態で使用するため、毎日張り替える必要がありました。また、グラフェンをきれいにするための加熱処理が必要でした。実験は毎朝、大学院生の三上さんとタングステンの加熱処理、アルカリ金属の蒸着、グラフェンの加熱処理を行いました。午後から夜にかけて、実験データを取得しました。しかし、なかなか回折パターンの兆候を見いだせず悩みました。背景ノイズの統計量から考えて、検出位置の精密な校正が必要だと判断して追加の実験を行いました。途中、データ解析や実験結果の検討に費やした期間もありましたが、これが回折だろうと言えるまでになったころ

には、およそ 2 年が経過していました。

【図 7】に我々が測定した実験結果を示します。横軸はグラフェンを透過したものの回折しなかったポジトロニウムビームの中心位置を原点としたときの距離（半径 r ）を表します。それに対し、縦軸はポジトロニウムの検出器で測定したポジトロニウムの数の密度分布を表します。黒丸●（ $r \geq 4$ mm）と白丸○（ $r < 4$ mm）がポジトロニウムのデータ点です。原点付近ではポジトロニウムの強度が強く密度が高いため、○のデータ点には $1/500$ がかけられています。 $r \sim 10$ mm のところにポジトロニウムの密度の膨らみがあります。

赤の太線は、●のデータ点に最もよく合うように当てはめた曲線です。この曲線を参考に、ポジトロニウムの密度の膨らみの中央位置を計算すると、10.0 mm となりました。一方、ポジトロニウムの回折条件を理論的に計算すると、 $r = 9.7$ mm が明線の位置になり、実験結果は理論計算と不確かさの範囲内で一致しました。青のデータ点は、周囲から入ってくる不要な γ 線を表し、 r に依存せずに平坦な分布をしており、ポジトロニウムの回折パターンへの影響は少ないと考えられました。以上により、ポジトロニウム回折の観測に成功しました。



【図 7】 2.3 keV のポジトロニウムの回折パターン

Modified from Y. Nagata et al.¹⁾, licensed under CC BY 4.0.

おわりに

粒子と反粒子の結合状態であるポジトロニウムや、世界で初めてのポジトロニウム回折実験を紹介しました。また、実験に必要な装置の説明も行いました。このような研究は、最近まで不可能と考えられていましたが、東京理科大学の装置で初めて可能になりました。

ポジトロニウム以外の反物質原子として、陽電子と反陽子が結合した反水素原子があります。2002年にジュネーブにあるCERNの実験グループが反水素原子の大量合成に成功したことを報告しました。現在までに非常に多くの重要な成果が発表されています。

原子の周期律表で見られるように、現在118種の原子が確認されており、それらが結合した分子が無数にあります。それと同じように、反原子や、反分子が存在するはずですが、しかし実験的な合成に成功し、研究が広く進められているのは、ポジトロニウムや反水素原子など、反物質のうちのごく一部です。つまり、我々は今、大きな広がりのある反物質世界を切り開くためのスタート地点にいるのです。

反物質にどのような性質があるのか、基礎科学や応用の観点で、世界中から大きな注目を集めています。反物質を用いた実験は、現代の基礎物理学の最前線分野の一つです。是非一緒に研究してみませんか。

今回紹介したポジトロニウム回折実験は、長嶋泰之教授、三上力久博士（現KEK研究員）との協力により行われました。また、産総研の満汐孝治主任研究員には装置についてご協力いただきました。この研究はJSPS科研費JP25H00620, JP21H04457, JP17H01074の支援を受けて遂行されたものです。ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Yugo Nagata, Riki Mikami, Nazrene Zafar, Yasuyuki Nagashima, Observation of positronium diffraction. *Nature Communications*, 17, (2026): 1159.