

演習課題 13

メスバウアー効果

～光のドップラー効果を見てみよう～

■ 指導教員

徳宿克夫 (KEK) 佐藤義輝 (東京工業大学) 久世正弘 (東京工業大学)
宮地義之 (東京工業大学) 石野宏和 (東京工業大学) 坪山透 (KEK)

■ Teaching Assistant

古田久敬 (東京工業大学) 松原綱之 (東京工業大学)
中山佳晃 (東京工業大学)

演習 13 : メスバウアー効果

1. 実験の目的

メスバウアー効果とそれに関連した物理を理解し、それを観測・測定する基本的な実験技術を身につける。

2. メスバウアー効果

原子核には基底状態と励起状態があり、そのエネルギー差に等しいエネルギーを持つガンマ線を当てるとガンマ線の共鳴吸収が起こる。ガンマ線源には、吸収体と同じ原子核が励起状態から基底状態に遷移するとき放出するガンマ線を使えばよいので、放射性同位元素を利用する。しかし、実際は 1958 年のメスバウアーによる成功まで、この方法では共鳴吸収は起こらなかった。なぜならば、自由空間中の原子核は励起状態から基底状態にガンマ線を放出して遷移するとき、運動量保存則によりガンマ線の反対方向に反跳を受けるからである。反跳エネルギーの分だけエネルギーが少なくなったガンマ線では共鳴吸収は起こらない。ところが、固体中の原子核の場合、原子核は原子間の結合力によって束縛されているので、ガンマ線の反跳エネルギーは固体全体に与えられるため事実上無反跳の状態になる。よってこの場合には共鳴吸収が起こるのである。この現象をメスバウアー効果という。

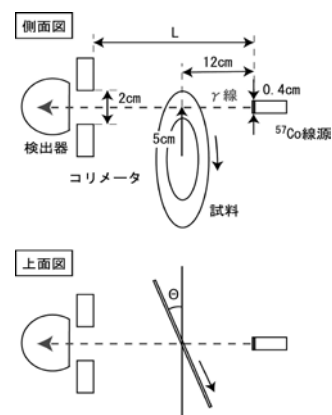
3. 実験

ガンマ線のエネルギーが変化すると共鳴吸収は起こらなくなるはずである。この実験では光のドップラー効果を用いてエネルギーを変化させる。吸収体を回転円盤（毎分 2 回転）に貼り付けて図のように回転円盤の角度を変えると、ガンマ線方向の速度成分を 1mm/s 程度変化させることができる。このときのドップラー効果によるエネルギーの変化は $10^{-12} \sim 10^{-13}$ であるため、高い分解能で測定ができる。NaI シンチレーションカウンターと比例計数管の 2 種類の検出器を使ってガンマ線を測定して吸収曲線を作成する。前者は、バックグラウンドは少ないが分解能が低い。それに対して後者は、バックグラウンドが大きいが高分解能は高い。

ガンマ線源には ^{57}Co を用いた。吸収体にはステンレス鋼と硫酸第一鉄 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) を用いた。

4. 結果と考察

NaI 検出器で測定した 2 種類の試料の吸収曲線を示す。上がステンレス鋼、下が硫酸第一鉄である。比例計数管でも似たようなグラフになったが、硫酸第一鉄でフィッティングができなかったため、ここでは紙面の都合もあり NaI 検出器の結果だけを使って考察する。



まず、ステンレス鋼のグラフから、吸収体の速度が 0 付近で無反跳ガンマ線核共鳴吸収が起こっていることが確認できた。ハイゼンベルクの不確定性原理より、

$$\Gamma \times \tau = h / 2\pi$$

(自然幅: Γ 、平均寿命 $\tau = 141.8 \times 10^{-9}(\text{s})$)

であるので、文献値は、 $\Gamma = 4.64 \times 10^{-9}(\text{MeV})$ であることが知られている。これに対してグラフから吸収スペクトルの面積強度を得て Γ の実験値を求めると、

NaI : $\Gamma = (4.4 \pm 0.7) \times 10^{-9}(\text{MeV})$

比例計数管 : $\Gamma = (10 \pm 5.0) \times 10^{-9}(\text{MeV})$

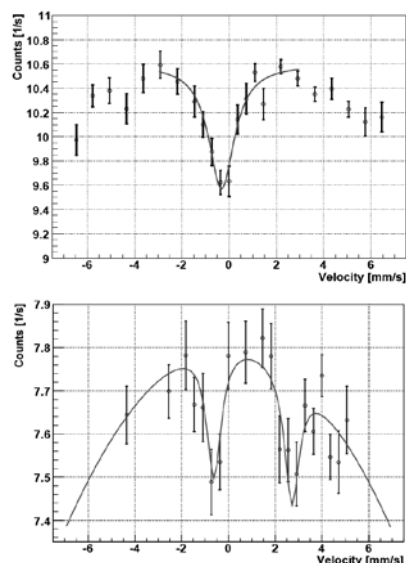
であった。

硫酸第一鉄では共鳴吸収曲線の中心位置がずれ、さらに 2 本に分裂している。これらの構造は超微細構造と呼ばれ、物質中の電子が作る電磁場と原子核の相互作用によるものとして説明できる。超微細相互作用のエネルギーを核の中心のまわりで展開すると、エネルギー準位は、軌道電子が原子核位置に作る電磁場と、原子核の各種モーメント（電気双極子モーメント、磁気双極子モーメント、電気四重極モーメント）の相互作用によって変化することがわかる。メスbauer効果でもその様子が観察できる。まず、吸収曲線がずれるのは原子核位置に電荷密度を持つ s 電子と原子核との間に働く静電相互作用に起因する。このずれをアイソマーシフト (δ) という。吸収曲線から、 $\delta = 1.03\text{mm/s}$ だから、アイソマーシフトの式で計算すると、

(吸収体の s 電子の存在確率) - (線源の s 電子の存在確率) = $-2.37 \times 10^{-13}(\text{1/fm}^3)$ が得られる。これは線源と吸収体の原子核位置における s 電子の電荷密度の違いを示している。吸収曲線が 2 本に分裂するのは四重極相互作用によるものである。電気四重極モーメント Q を持つ原子核が電場勾配のあるところに置かれると、原子核の角運動量の向きでその静電エネルギーが ϵ だけ変化する。今、吸収曲線から $\epsilon = 1.67\text{mm/s}$ だから、 ϵ の式から、 $Q = 0.229 \times 10^{-24}(\text{cm}^2)$ が得られる。 $Q = 0$ のとき電荷分布は球形、 $Q > 0$ のとき Z 方向に伸びている葉巻型、 $Q < 0$ のとき Z 方向につぶれたパンケーキ型である。今回の Q の求め方は Q の正負は判断できないが、0 でないことから球形の電荷分布ではないことが分かった。ステンレス鋼でアイソマーシフトや四重極分岐が起きないのは結晶系が正方晶系であるためである。

5. まとめ

- ・メスbauer効果と、それによって超微細構造が観察できることを理解した。
- ・実際に試料回転型のメスbauer装置を用いて無反跳ガンマ線核共鳴吸収を確認した。
- ・ステンレス鋼の吸収曲線から鉄の第一励起状態の自然幅 Γ を求めた。
- ・硫酸第一鉄においてアイソマーシフト及び四重極分岐を観測した。
- ・全体を通して、誤差の考え方、データ解析の仕方、プレゼン資料の作成などを学んだ。



演習レポート

演習番号 13 メスバウアー効果

2007年9月18日

1 はじめに

原子が結晶中に拘束されている時、 γ 線の反跳エネルギーが結晶全体によって受け止められるため、事実上無反跳の状態が実現できる。このため、原子核から放出される γ 線を同種の原子核に照射した際、双方の原子核が結晶格子などで束縛されていれば、無反跳核 γ 線共鳴吸収現象が起こりうる。この現象をメスバウアー効果と呼ぶ。

吸収体を微小速度で動かすと、光のドップラー効果を起こすことができる。この効果を利用することで、非常に高いエネルギー分解能で γ 線の再吸収を観察できる。光のドップラー効果を利用すれば、超微細相互作用によって発生する核準位の分裂やシフトを超高精度で観察できる。

本演習では、メスバウアー効果の観察と、それを実際に応用した実験を行う。現象の理解と、基本的な実験技術の習得がこの実験の目的である。

2 実験装置および方法

今回の実験では、 ^{57}Co (1MBq) を線源として使用する。線源を中心に、対称に NaI シンチレーションカウンターと比例計数管を配置し、両者の観測結果を比較する。図1に、実験装置の片方を示す。モーターは正確な回転数を持ち、試料円盤ごと照射方向に対して傾けることができる。この傾きによって、吸収体に γ 線の照射方向の速度成分を持たせることができる。

吸収体にはステンレス鋼 (SUS304) と硫酸第一鉄 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) を用いる。線源に使われる ^{57}Co は γ 崩壊や内部転換過程を通じ、安定な ^{57}Fe になる。このうち角運動量が $3/2$ から $1/2$ に遷移するときの γ 線がメスバウアー実験に使用される。 ^{57}Fe は Fe 元素全体の 2.12% を占める。硫酸第一鉄の吸収体は全て自作したが、実験に適切な試料の厚さ、粒子の細かさは何度も試行錯誤した。

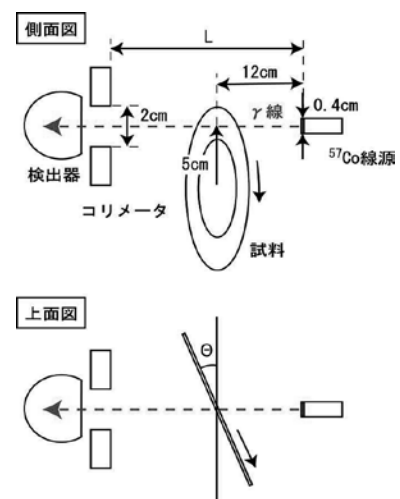


図1 実験装置

3 実験結果および考察

3.1 ^{57}Co の γ 線スペクトル

吸収体を外した状態で γ 線のスペクトルを測定した結果を図2に示す。14.4keVのピークにおける分解能はNaIで61.7%、比例計数管で5.2%だった。図2からもわかるように、NaIは分解能が低いが、バックグラウンドの影響が少ない。一方、比例計数管では分解能はとてもよい

が、バックグラウンドを多く拾ってしまう。

3.2 ステンレス鋼

吸収曲線の面積を求め、そこから自然幅 Γ を求めた。面積を求める際には、解析ソフト ROOT、描画ソフト gnuplot の両方を試し、更にバックグラウンドの扱い方について注意した。ソフトについては gnuplot の方が精度がよかった。バックグラウンドは、先に引くより、バックグラウンドも含めたデータでフィッティングを行った方が、カウント数が多い

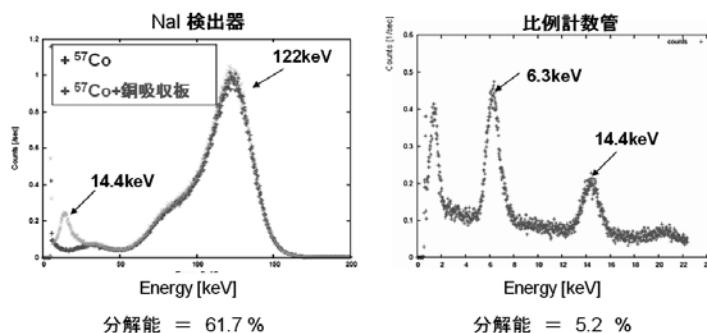


図2 γ 線のエネルギースペクトル

ので誤差が小さくなると考えた。この後の実験についても、この考えを踏襲した。文献値では $\Gamma = 4.64 \times 10^{-9}$ で、実験では NaI で $\Gamma = (4.4 \pm 0.7) \times 10^{-9}$ 、比例計数管で $\Gamma = (10 \pm 5.0) \times 10^{-9}$ となった。比例計数管は、分解能は高いが、誤差が大きいことがわかる。

3.3 硫酸第一鉄 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

硫酸第一鉄では、NaI ではなんとかメスbauer効果を観察された(図3)。しかし比例計数管では、一回ごとの誤差が大きかったため、明確な曲線が見えず、フィッティングを諦めた。NaI のグラフから、 $\delta = 1.03\text{mm/s}$ 、 $\epsilon = 1.67\text{mm/s}$ 。原子核の電気四重極子モーメントは $Q = 0.229 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ となり、原子核の電荷分布はかなり球に近いが、完全な球にはならないことを示す。 $J=3/2$ の励起状態のとき、確かに四重極分岐を起こしていることが分かる。また、 ϵ の値を使って、演習資料(15)式より、 $|\psi_a(0)|^2 - |\psi_s(0)|^2 = -2.37 \times 10^{-13} [1/\text{fm}^3]$ 。

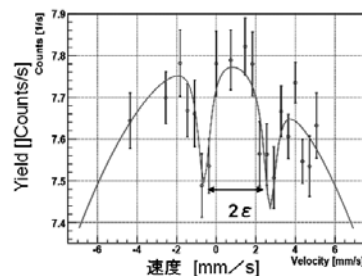


図3 硫酸第一鉄 (NaI 検出器)

3.4 吸収係数の測定

物質中を通過する γ 線の数、物質の厚さに応じて減少する。モリブデン、銅を使って γ 線の吸収係数を測定した結果をステンレス鋼と比較した(表1)。公開されている値と比較すると、SUS304だけが再現性を満たさない。このことから SUS304 でメスbauer効果が起こっていると期待される。

表1 吸収係数の比較

element	$\mu [\text{cm}^2\text{g}^{-1}]$	$\mu_0 [\text{cm}^2\text{g}^{-1}]$	μ / μ_0
Mo	31 ± 5	31	1.0 ± 0.2
Cu	88 ± 7	82	1.07 ± 0.08
SUS304	85 ± 4	62	1.37 ± 0.05

実験課題 13 : Mössbauer 効果 - 光のドップラー効果を見よう -

目的

光のドップラー効果を用いて、メスbauer効果を確認する。

原理

メスbauer効果 (Mössbauer effect)

1958年、Rudolf L. Mössbauerによって発見された物理現象で、固体の結晶中にある原子によるγ線の無反跳核共鳴吸収現象(recoilless nuclear resonance absorption of gamma radiation)である。自由空間中にある放射性原子核がγ線を放出するとき、運動量を持つため原子核自体が跳ね返され(反跳)、γ線のエネルギーが持ち去られるため同種の原子核に共鳴吸収されない。一方、原子核が結晶中に存在するとき、結晶全体で反跳エネルギーが受け止められ、事実上無反跳の状態が実現し、ガンマ線が再吸収されることがある。

超微細相互作用

軌道電子が原子核位置に作る電磁場と原子核の各種モーメントの相互作用により、原子核のエネルギー準位が変化する。メスbauer効果の測定によりその様子が観察できる。

$$H_{em} = \int \rho(\vec{x}) \phi(\vec{x}) d^3x - \vec{P} \cdot \vec{E}(0) - \vec{\mu} \cdot \vec{H}(0) - \frac{1}{6} \sum_{i,j} Q_{ij} \left(\frac{\partial E_j}{\partial x_i} \right)_0 + \dots$$

静電ポテンシャル (電子の確率密度) 電場 磁場 電場勾配
 ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
 電荷密度 電気双極子モーメント(=0) 磁気双極子モーメント 電気四重極モーメント

第一項目の電子密度により、吸収スペクトルの重心位置のずれ(アイソマーシフト)が存在する。第四項目の原子核内の電荷分布の歪みによって生ずる電気四重極モーメントにより、吸収スペクトルが分裂する。第二、三項目は、今回の実験では依存しない。

実験方法

⁵⁷Co線源を用いて、NaI検出器と比例計数管のそれぞれの検出器に放射線を当てる。その際、吸収板を動かして、光のドップラー効果によってどれくらいγ線のエネルギーが増加するか考え、吸収板を透過するγ線をそれぞれの検出器で一定時間観測する。回転盤に吸収板がはり付けられており、回転盤の角度を変えることによって、~1 mm/secでドップラー効果を観測することができる。

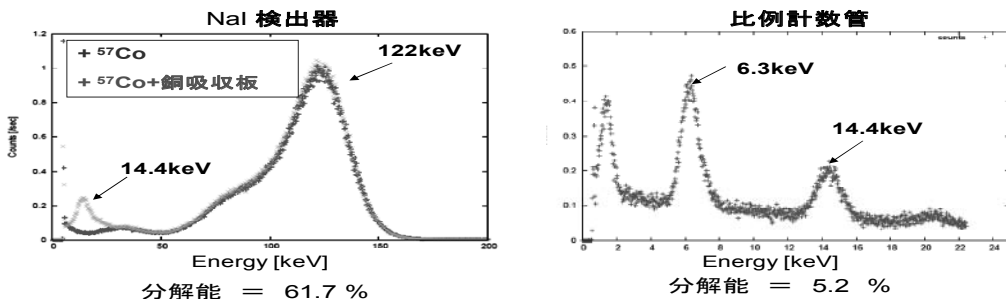
実験課題 1

内容

吸収板なしで、⁵⁷Co線源のエネルギースペクトルの分解能を調べる。また、NaI検出器と比例計数管を比較する。また、銅吸収板をNaI検出器の前に置くことによって122keVのγ線が14.4keVにどのくらい混ざっているか調べる。

結果

図1 : 実験課題 1



NaI検出器の方が比例計数管に比べて分解能は悪いが、backgroundの放射線の観測数が少ない。又、銅吸収板を置くことによって、微量の122keVのγ線が14.4keVに混ざっていることがわかった。

考察

誤差は、分解能小さい方がいいとか、backgroundが小さい方がいいとか、その線源にもよるが、今回は線源が弱かったため、NaI検出器の方がより多くの統計数がたまりやすく扱いやすかった。

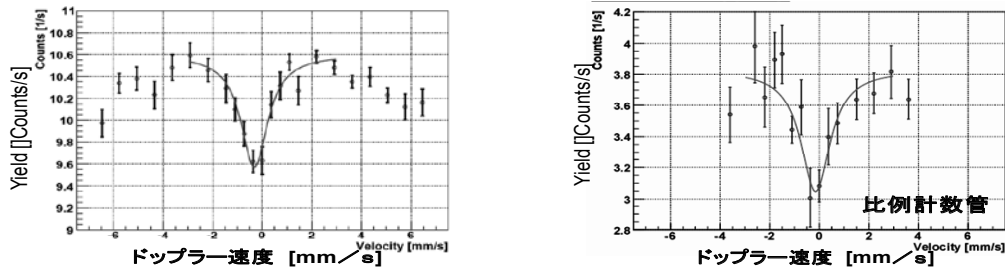
実験課題 2

内容

回転盤に、吸収板としてステンレスを付け、透過率を観測しメスbauer効果が生じているか調べる。

結果

図 2 ; 実験課題 2



自然幅 Γ は、NaI 検出器 : $\Gamma = (4.4 \pm 0.7) \times 10^{-9}$ 、比例計数管 : $\Gamma = (10 \pm 5.0) \times 10^{-9}$ である。

考察

文献値では、Heisenberg の不確定性原理より、 $\Gamma = 4.64 \times 10^{-9}$ である。メスbauer効果が、十分良い精度で確認できたといえる。

実験課題 3

内容

硫酸第一鉄を試料として用いて、回転盤に取り付けて透過率を調べる。この試料は、電気四重極子相互作用により、共鳴曲線が 2 本に分裂する。アイソマーシフト δ 、静電エネルギーのずれ ϵ を求め、超微細相互作用をしらべる。

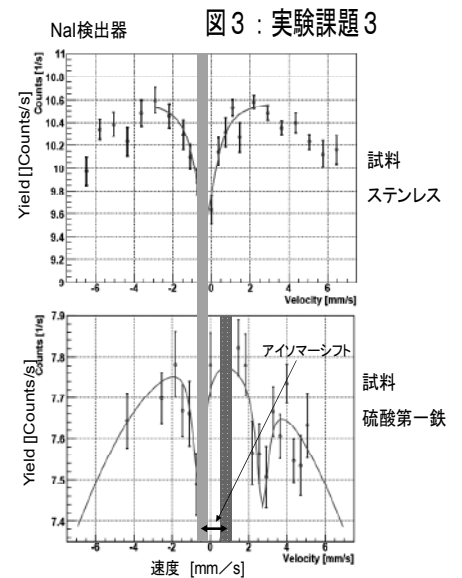
結果

アイソマーシフト $\delta = 1.03 \text{ mm/sec}$ から、(吸収体の s 軌道電子の存在確率) - (線源の s 軌道電子の存在確率) = $|\psi_{a(0)}|^2 - |\psi_{s(0)}|^2 = -2.37 \times 10^{-13} [1/fm^3]$ であることが求められた。また、静電エネルギーのずれ $\epsilon = 1.67 \text{ mm/sec}$ から、電気四重極モーメント $Q = 0.229 \times 10^{-24} [cm^2]$ であることが分かった。結果は NaI 検出器から求めた。

考察

文献値では、四重極モーメント $Q = 0.209 \times 10^{-24} [cm^2]$ であり、実験値は十分な再現性を得られた。また、比例計数管は、統計数をためるのに時間足りなかったため、誤差が大きくなり、データが得られなかった。

図 3 : 実験課題 3



実験課題 4

内容

モリブデン、銅、SUS304(Fe を含む) を吸収板として用いて、それぞれの試料の吸収係数 μ を求める。厚さ x とすると、物質を透過する γ 線の数、 $N(x) = N(0) \exp(-\mu x)$ である。

結果

表 14.4 [KeV] の γ 線での各試料の吸収係数の大きさ

element	$\mu [cm^2 g^{-1}]$	$\mu_0 [cm^2 g^{-1}]$	μ / μ_0
Mo	31 ± 5	31	1.0 ± 0.2
Cu	88 ± 7	82	1.07 ± 0.08
SUS304	85 ± 4	62	1.37 ± 0.05

※ μ_0 は <http://physics.nist.gov/PhysRefData/> にて公開されたデータを用いている。

公開されているデータで再現性を確かめると SUS304 だけ、吸収係数が大きくなっている。

考察

この結果からも、メスbauer効果が起こっていることが確認できる。