

KEK 夏の学校 07 (覚書 2) : 「試料回転型メスバウアー装置」鉄試料の結果

2007.2.6、佐藤

試料回転型メスバウアー装置 (試作一号機) を用い、鉄試料についてメスバウアー吸収スペクトルを測定した。微細構造は検知可能だが、分解能が不十分なため定量的に議論を進めることは困難である。

測定の様子を下の写真に示す。試料上での γ 線 (検出器のアクセプタンスに入るもの) の広がりをなるべく小さく抑え、吸収スペクトルの分解能の向上を図るため、回転標的は線源に近づけた。線源から検出器手前のコリメータ ($\phi 2 \text{ cm}$) までの距離は 50 cm で、線源から試料までの距離は 12 cm である。 γ 線は回転円盤の最上位置 (時計の 12 時の位置) で試料に入射する。

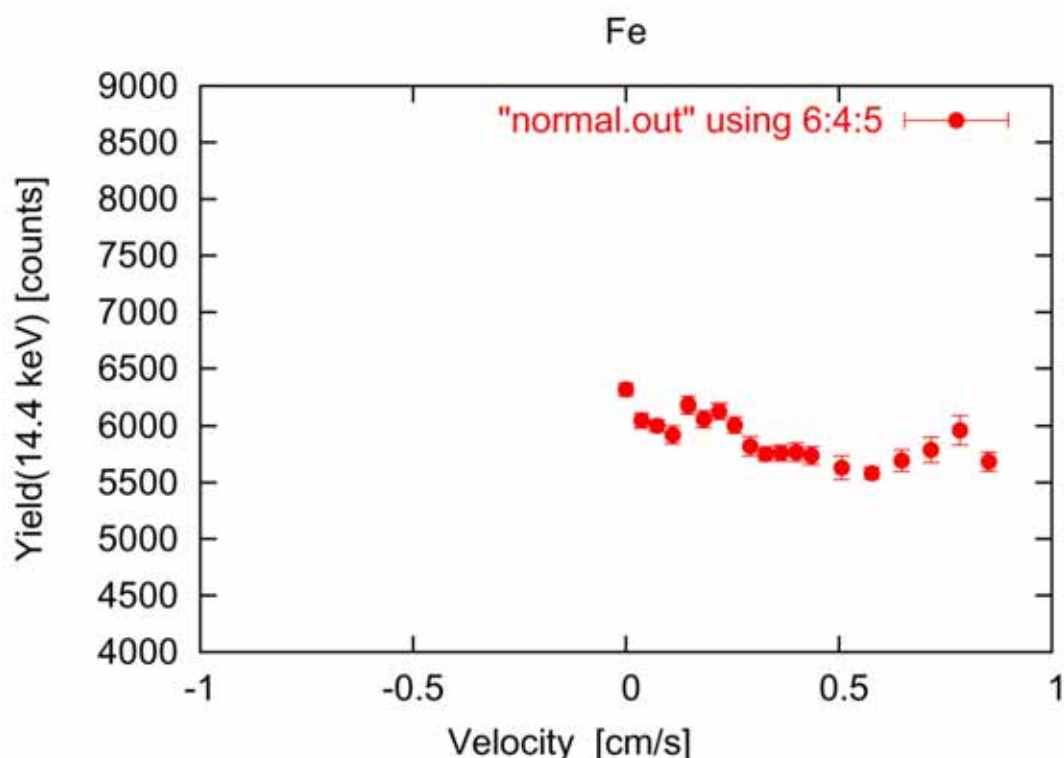


次ページ図に、今回取得した鉄のメスバウアー吸収スペクトルを示す。おのあの点は、 γ 線スペクトル中の 14.4 keV の光電吸収ピークのカウント数をフィットによって求め測定時間で規格化したものである。測定時間は一点につき約 6000 秒 である (データ点は 1000 秒 相当値に規格化してある)。試料の回転方向は順方向のみとしたのでド

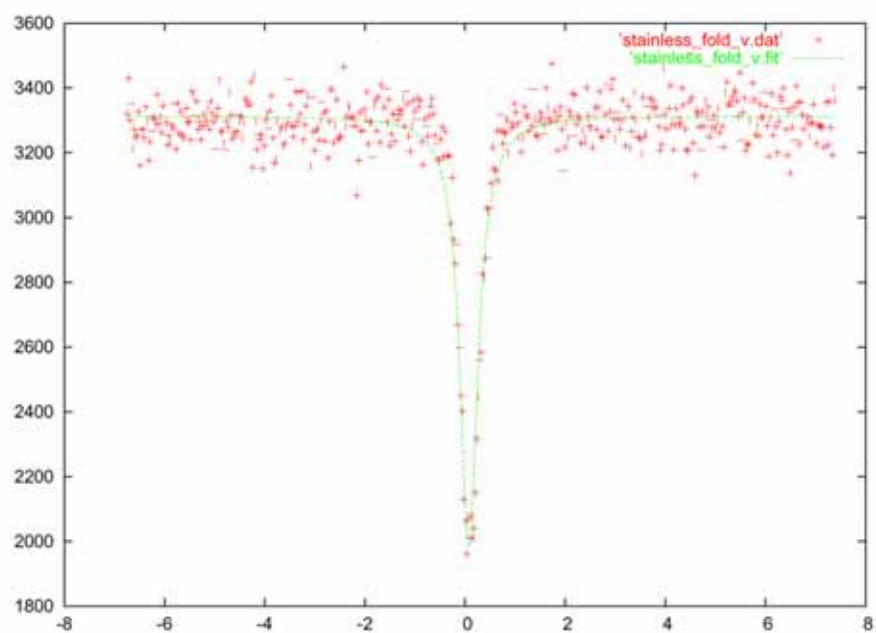
ップラー速度が正の場合のみの結果となっている。試料が傾斜し厚みが変わることによる γ 線の減衰率の違いは補正した。補正値は試料が最も傾斜した $\theta = 24^\circ$ で 10%であった。

データ点は比較的良好に滑らかに推移している。鉄の場合、内部磁場により吸収線が六本にゼーマン分岐し、これらがドップラー速度の正と負の二つの領域に対称に現れる。今回測定した、ドップラー速度が正のスペクトル領域において、確かに三箇所、共鳴吸収によるものとみられる窪みが観察された。よって、超微細構造が検出されたといえる。しかしながら、以下の理由により、鉄試料に対するメスバウアー測定は（弱線源を用いた場合）サマースクールでの実施項目としては現実的ではないと思われる：（１）分解能が良くないので共鳴吸収が顕著ではない、（２）長時間の測定が必要となる。これは、ステンレス試料で観察された一本の吸収線の強度が六本に分離するため、各ピークの強度が必然的に小さくなることから、ある程度予想できた事柄である。超微細構造の観察には、従って、四重極相互作用により吸収線の分裂が二本で、且つそれらが十分に離れている硫酸第一鉄（ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ）等が適当であろうと推測される。

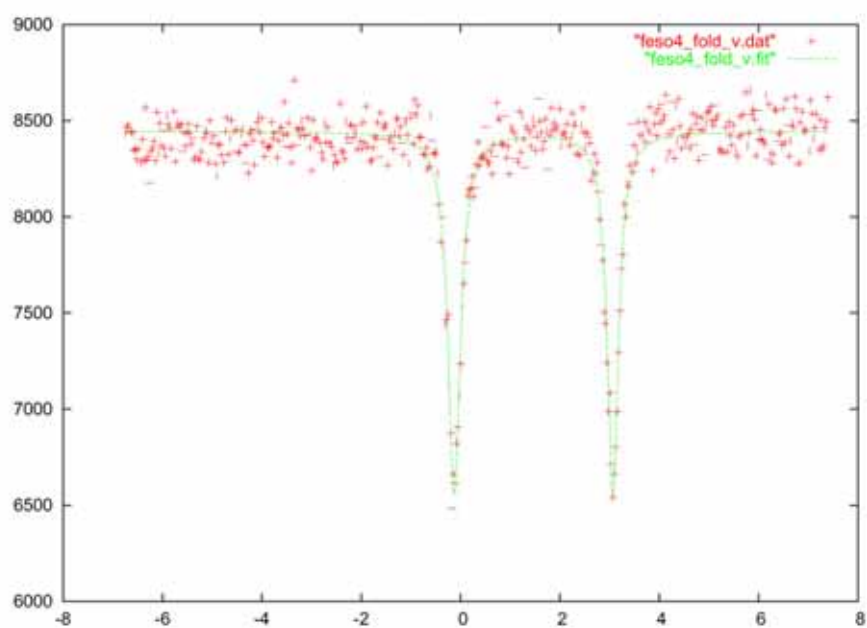
参考の為、トランスデューサー型の装置で得られている、ステンレス、硫酸第一鉄、鉄のメスバウアースペクトルの例を次ページ以降に示す。



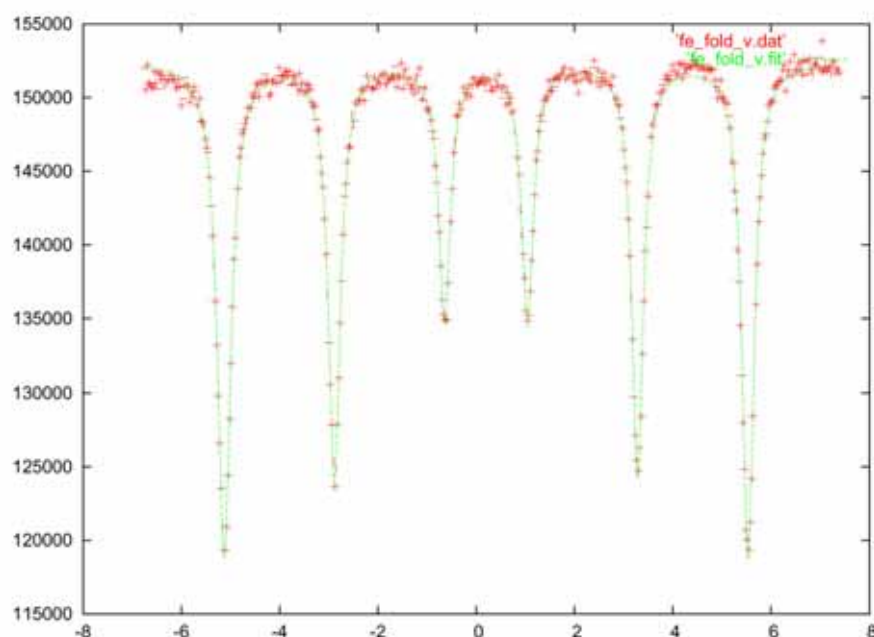
今回得た鉄のメスバウアースペクトル。



ステンレス試料のメスバウアースペクトル。トランスデューサー型装置での測定結果。



硫酸第一鉄試料のメスバウアースペクトル。トランスデューサー型装置での測定結果。



鉄試料のメスバウアースペクトル。トランスデューサー型装置での測定結果。

吸収スペクトルの分解能に関する考察：

γ 線の入射方向に垂直な平面から傾斜させて試料を回転させると、試料に γ 線方向の速度成分（ドップラー速度： v_D ）を持たせることができる。試料からみた γ 線のエネルギーはドップラー速度に応じて変化し、 γ 線エネルギーが試料中に存在する ^{57}Fe 原子核（同位体比 2.2%）の基底状態と第一励起状態のエネルギー間隔に一致した時に共鳴吸収が起きる。

いま、回転盤の角速度を ω 、回転盤上の試料の動径位置を r 、回転平面の法線と γ 線入射方向のなす角度を Θ とすると上記ドップラー速度は次で与えられる。

$$v_D = \omega \cdot r \cdot \Theta$$

これより、ドップラー速度の不定性は次で計算できる。

$$\Delta v_D = v_D \sqrt{\left(\frac{\Delta \omega}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \Theta}{\Theta}\right)^2} \quad (1)$$

この他にドップラー速度に広がりを持たせる要因としては、 γ 線が試料に入射する際の水平面内の角度広がり（ $\Delta \theta$ ）がある。これに起因する不定性は次で与えられる。

$$\Delta v_D = v \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

ここで v は γ 線照射位置での試料の回転速度で $v = \omega \cdot r$ である。

試作一号機の各種パラメータの不定性は次の通り。

$\Delta\omega: \pm 4 \times 0.005 \text{ rpm}$ 以下*

$\Delta r: \pm 0.24 \text{ cm}$

$\Delta\Theta: \pm 1/60^\circ$

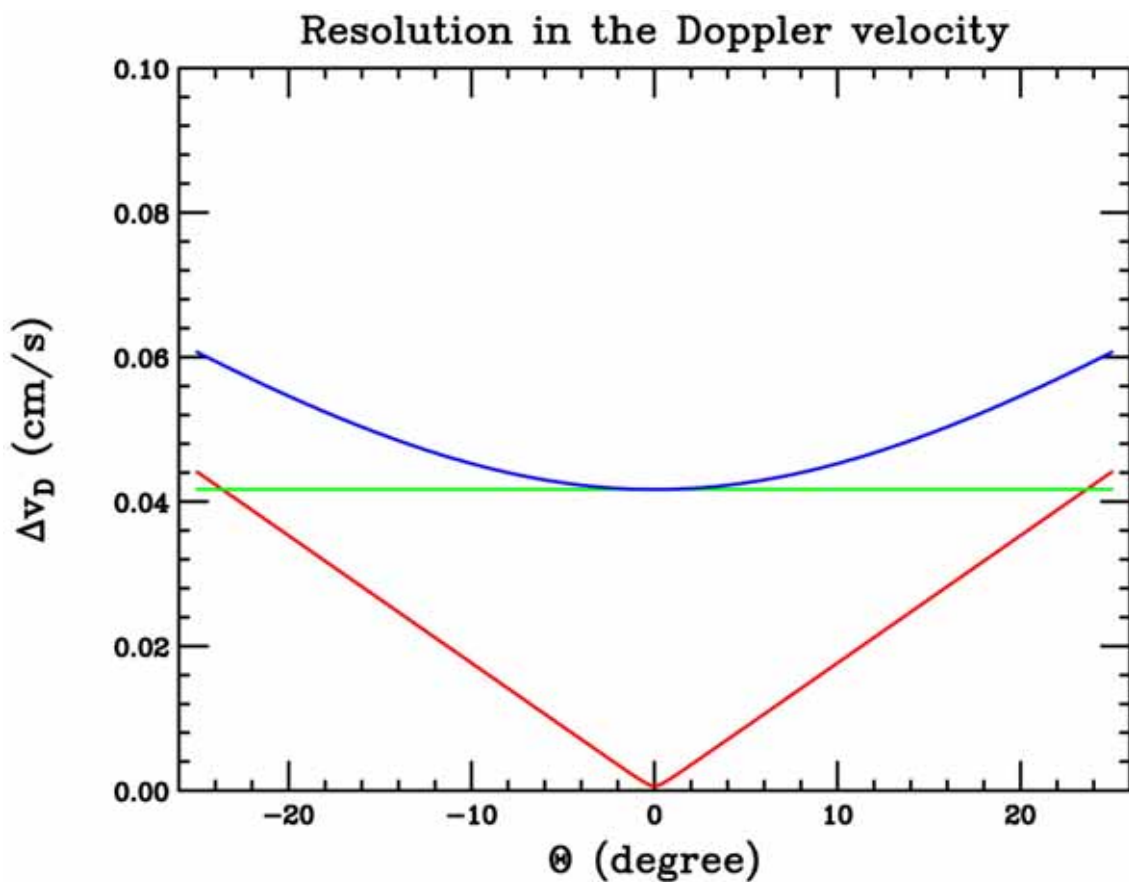
$\Delta\theta: \pm 1.14^\circ$

*試料の回転に用いるモーターは毎分4回転の回転速度をもつシンクロナスモーターである。このモーターは電源周波数(50 Hz)に同期して回転し、負荷が変動しても回転速度が変わらない特徴がある。通常 $\pm 0.5\%$ 以内の精度がある。

下図に、ドップラー速度の不定性 Δv_D を回転盤の傾斜角度 Θ の関数として計算した結果を示す。二倍の Δv_D が全幅に相当する。図中赤線が式(1)の不定性を、緑線が式(2)の不定性を表す。青線はこれらの二乗平均である。

ドップラー速度に最も大きな不定性を与える要因は図から明らかなように試料に入射する γ 線の角度広がりである。この不定性は試料の傾斜角度 Θ によらず一定で、半値半幅で0.04 cm/s程度の値となる。コリメータの立体角を小さくすればこの不定性を減少させることができるが、統計精度を保つために長時間の測定が必要となる。あるいは、試料の回転速度を小さくすることでもこの不定性を減少させることができる。しかし、ドップラー速度をある程度広い範囲(例えば - 0.8 ~ 0.8 cm/s)でスキャンする必要がある場合は試料の回転速度はあまり小さくしすぎるわけにもいかない。

式(2)に起因するドップラー速度の不定性は $\Theta=0^\circ$ では寄与しないが、傾斜角度が大きくなるにつれて増大する。 $\Theta=23^\circ$ (ドップラー速度 $v_D=0.84 \text{ cm/s}$)で $\Delta v_D=\pm 0.04 \text{ cm/s}$ 程度となる。 γ 線の角度広がりによる効果と合わせると分解能は $\Delta v_D=\pm 0.06 \text{ cm/s}$ 程度となり、鉄の場合 $\pm 0.6 \text{ cm/s}$ の範囲に六本の吸収線が現れることを加味すると、必ずしも良い分解能が得られている訳ではないことが分かる。



検討事項・必要物品

☐ ^{57}Co 線

一般にメスバウアー効果測定用の ^{57}Fe 線源には、マトリックスとしてロジウム、パラジウム、白金などに ^{57}Co を電着したものが用いられる。さらに、不完全な位置に原子が入り込んでは無反跳にならないので、合金等を作った後に適当な処理をしなければならない場合がある。

(アイソトープ協会のホームページにある ^{57}Co 線源がこうした条件に適合している訳ではないようです。メスバウアー用線源はロシアのRitverc 社からの取り寄せになるそうです。従って、価格が45万円程度に跳ね上がる可能性があります。現在3.7 MBqと370 MBqのメスバウアー用線源について見積もりを依頼しています。なおこの4月から ^{57}Co 線源に関し、管理区域の設定が必要にならない強度の上限値が1 MBqに変更になるとのことです。3.7 MBqのものを仮に今注文したとすると納入はぎりぎり3月中になりそうとのことです。)

☐ 回転盤

シンクロナスモーター部分、線源を貼り付ける円盤、 γ 線コリメータ部分に分かれる。

□ 検出器

可能なものをテストしてみる。検出器に応じてプレアンプや高圧電源を選定する。

□ 線源、回転盤、検出器の支えと、それらの位置合わせのための機構

レール上に部品を並べることを考えている。

□ 試料

ステンレス、硫酸第一鉄 ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) を第一候補とする。鉄は難しいので行わない方針とする。

□ ADC, MCA

一セッターチャンネルなので、最低限、学生実験用の波高分析インターフェース程度の簡単なものがあればよい。解析は gnuplot が使用できる程度で十分だった。