

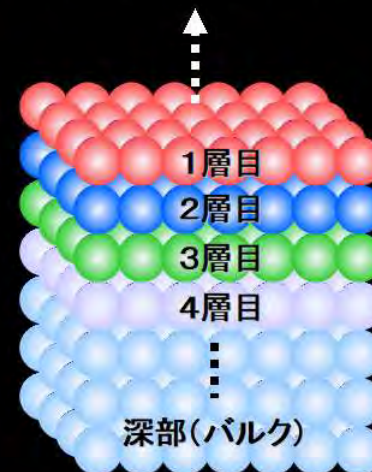
# 鉄の磁石の「表面の謎」を解明！

—原子層単位の深さ精度で磁性探査する新技術を開発—

## (内容)

1. 背景と目的
2. 測定法の紹介
3. 開発装置の紹介
4. 鉄表面の局所磁性探査
5. まとめと今後の展開

鉄の表面では一原子層  
毎に磁力が増減する！



原子磁石の磁力



# 1. 背景と目的

鉄の磁性について

磁石 → 鉄が思い浮かぶ！



鉄は地球に1番多く存在する金属

金属/物性科学  
鉄の科学  
応力腐食/溶接  
ナノ材料、超伝導体

宇宙/地球科学  
地球のコア物質  
隕石・鉱物の生成  
鉄と宇宙・地球の歴史



生命科学  
鉄タンパク質  
体内磁性  
生体鉱物合成 等

考古学/人文科学  
考古学試料分析  
工芸品/陶磁器分析 等

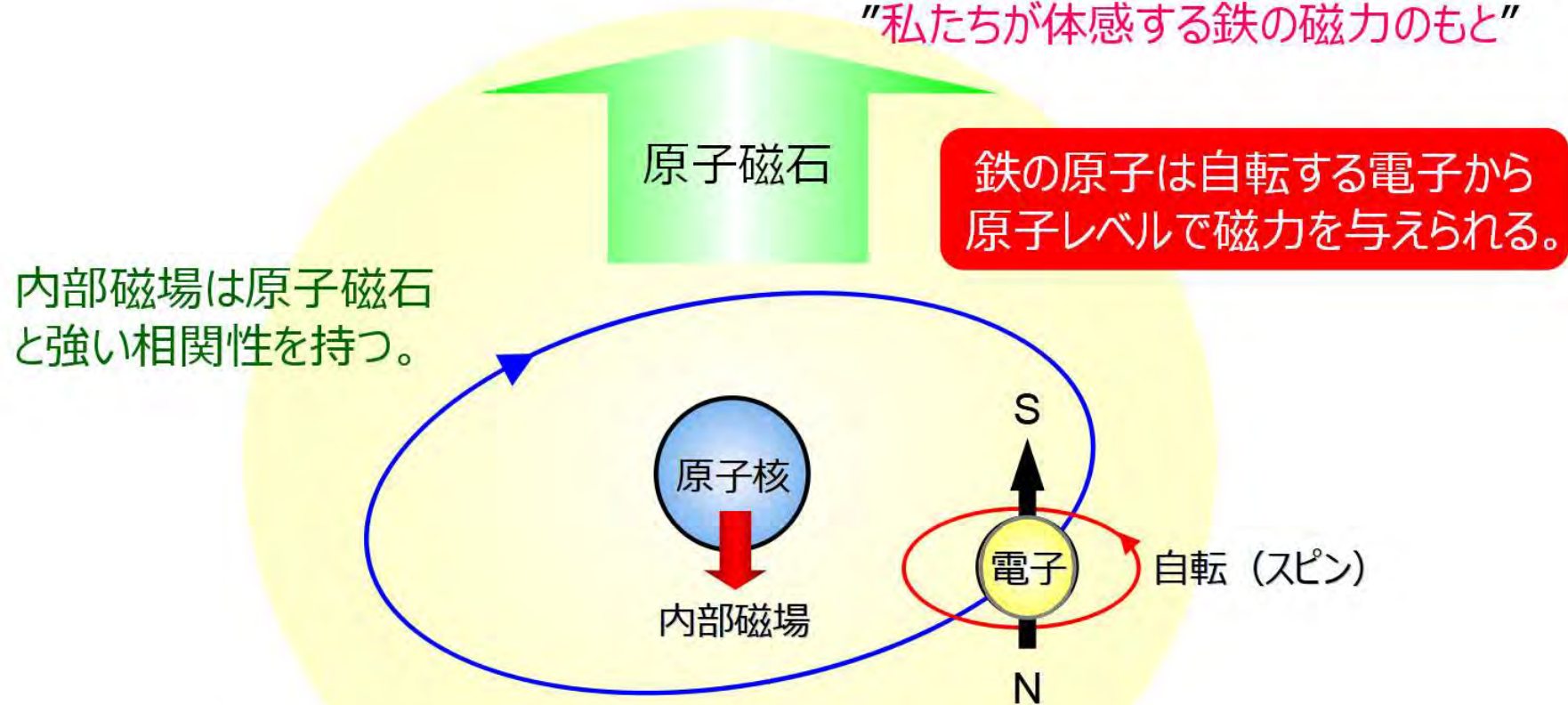
広い科学分野で取り上げられる磁性物質！



# 1. 背景と目的

なぜ鉄が磁力をもつか？

- ② 原子は磁力を与えられて原子磁石になる。  
“私たちが体感する鉄の磁力のもと”



内部磁場は原子磁石と強い相関性を持つ。

- ③ 一部の中心部に軌道をもつ電子は原子核の位置に“私たちが体感できない内部磁場を発生させる。

- ① 電子は自転していて小さな磁石になっている！

# 1. 背景と目的

原子集団として鉄が磁石になっている状態

## 表面から深い所

原子磁石は同じ強さで平行整列

## 表面（原子の並びが寸断）

電子状態が変化して原子磁石の強さに異常が起きる可能性。

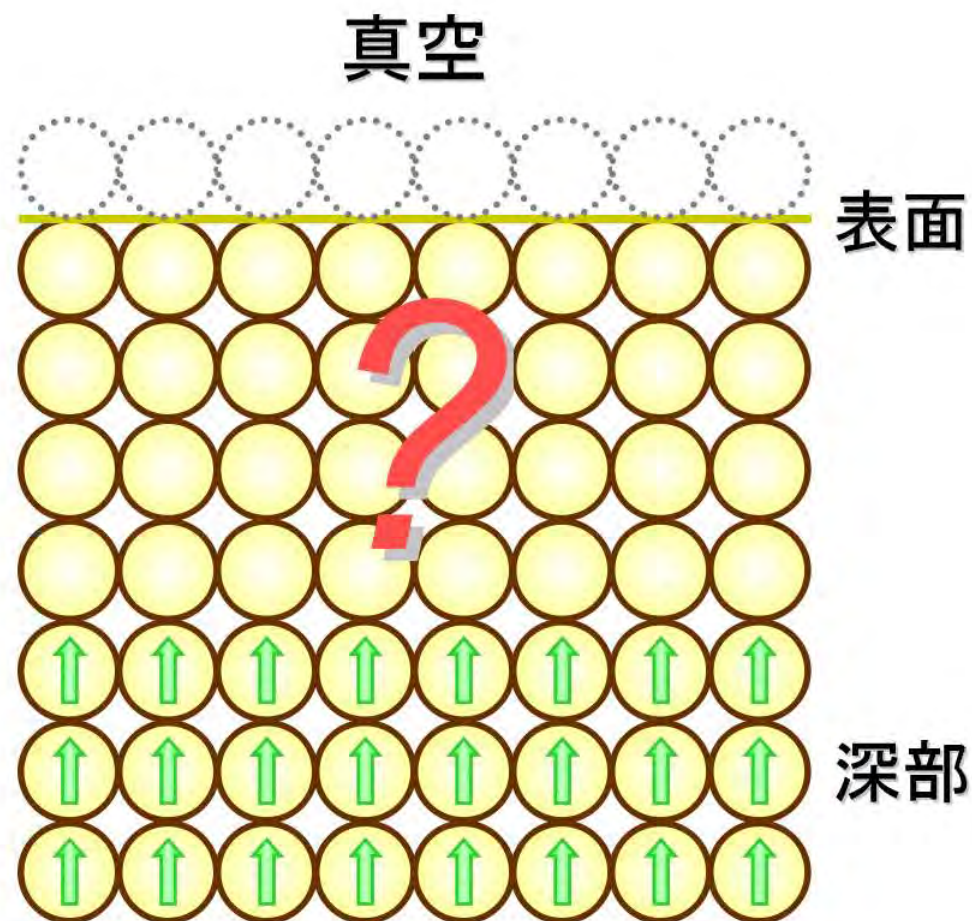
## 鉄の表面磁性

理論実験の両面で興味を持たれた。

## 40年前の有名な理論予測

表面では、原子磁石の強さが1層毎に振動的に変化する。

実験的には未検証で謎のまま！





# 1. 背景と目的

## 鉄表面の磁気フリーデル振動を観測できなかった理由

1. 鉄の最表面から深さ方向で原子一層毎に磁性の違いを識別しなくてはならない。

X線・中性子 → 透過力が強すぎて表面が見えない！

電子 → 表面敏感すぎて内部が見えない！

2. 鉄の表面は非常に酸化しやすいため、超高真空中の清浄な表面を迅速に測定しなくてはならない。

これら問題を克服できる高性能磁気分析装置の開発に成功！

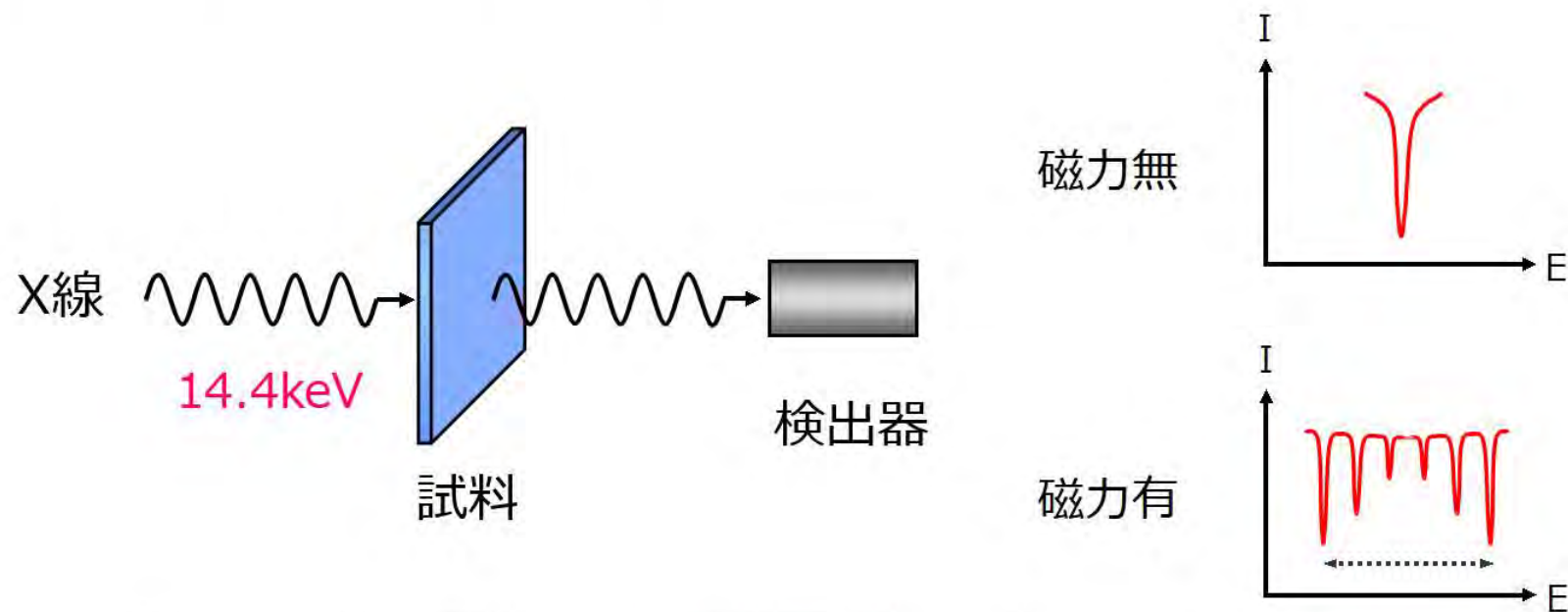
装置の高性能を実証 → 鉄表面の磁気フリーデル振動の観測に挑戦。

## 2. 測定法の紹介

### ベースにした磁気測定法

メスバウアー分光 → X線を特定の原子核に吸収させ、物質状態を探る。

鉄 (Fe) → 14.4keVのX線が $^{57}\text{Fe}$ (同位体)に共鳴する。



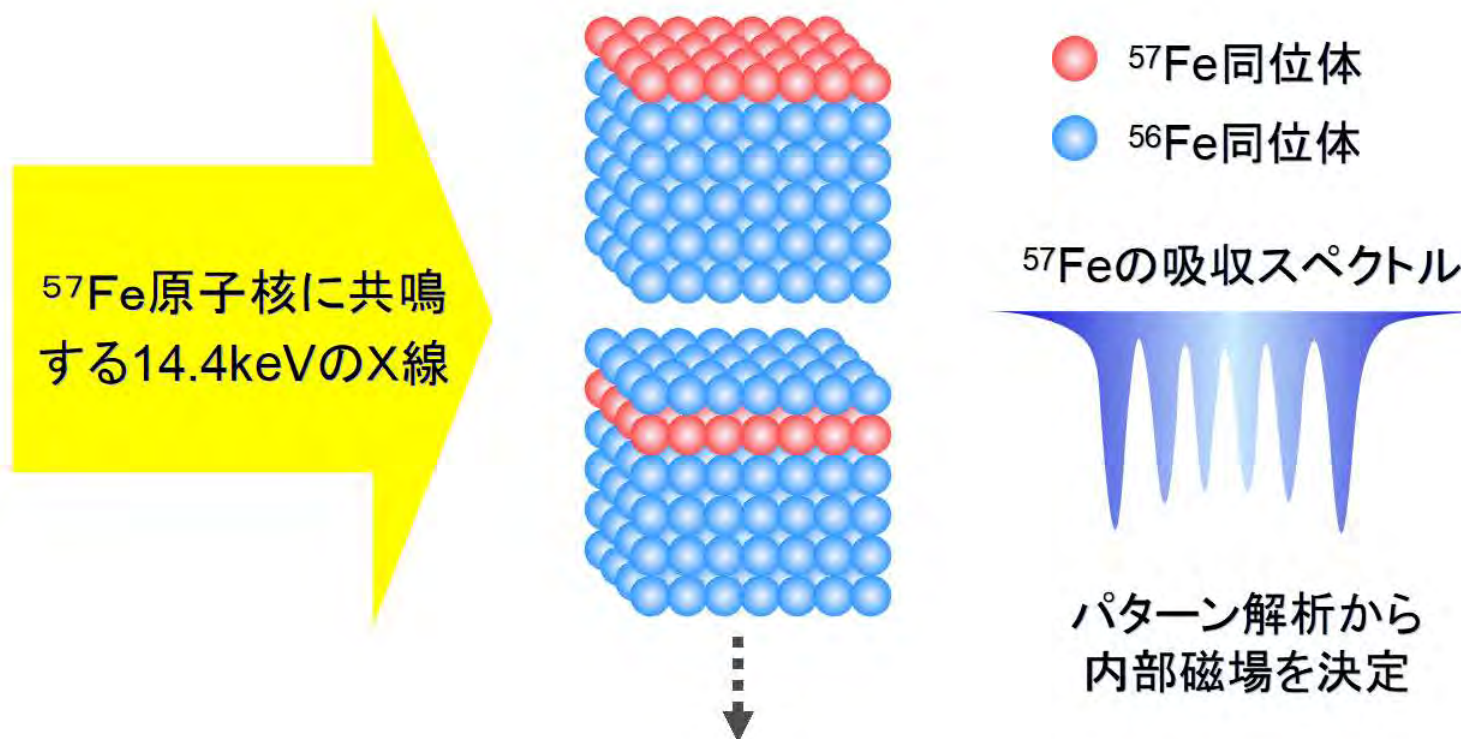
- 両端の吸収線の距離から内部磁場の強さを決定!
- 強い相関性を持つ原子磁石の強さを評価できる!

## 2. 測定法の紹介

鉄のメスバウアー分光 → X線は $^{57}\text{Fe}$ に吸収されるが、 $^{56}\text{Fe}$ には吸収されない。

【PET検査で用いるアイソトープ・マーカの役割に似ている。】 【同位体選択性】

同位体置換試料



$^{56}\text{Fe}$ で作製した鉄の表面の**見たい一層に $^{57}\text{Fe}$ のマーカ層を埋め込んだ試料**を幾つか用意して**スペクトルを測定**すれば一原子層単位での磁性を評価できる。

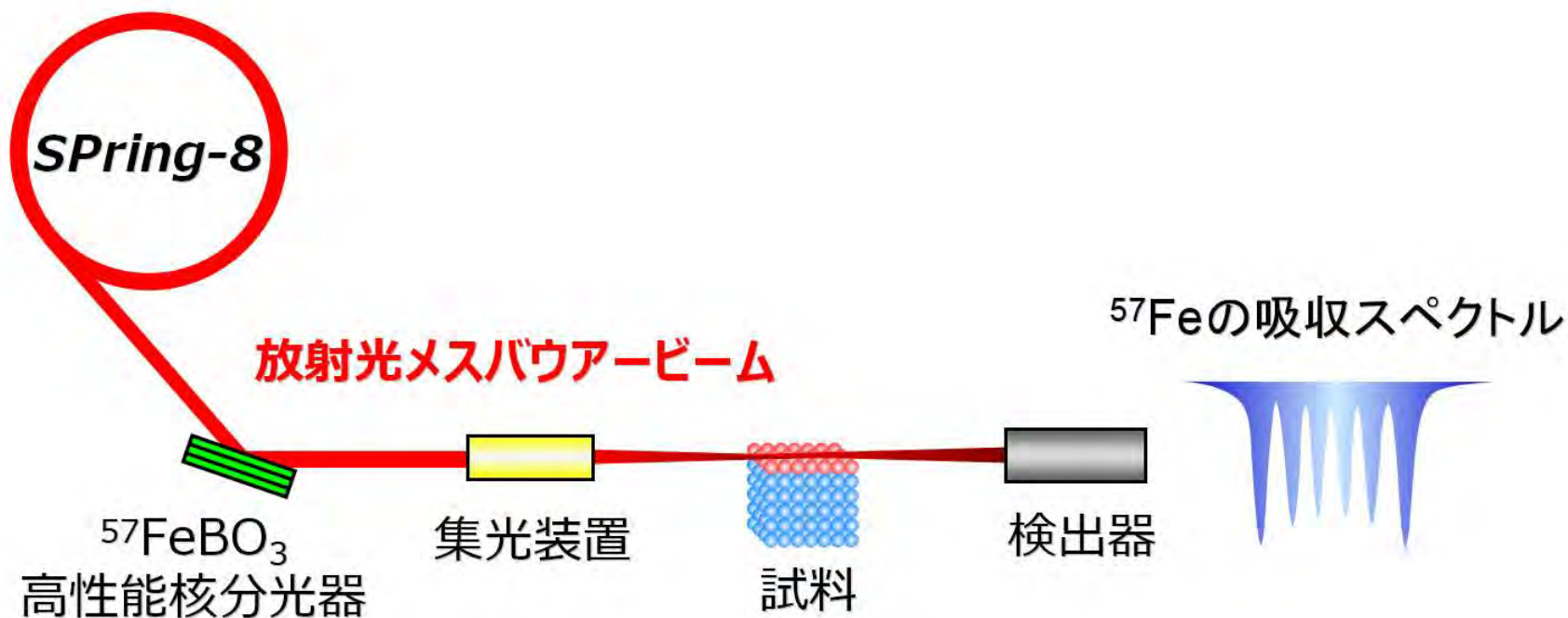


### 3. 開発装置の紹介

この方法で、超高真空下の薄膜を短時間測定できる機器の開発を行った。

#### 機器開発のポイント

- ① 放射光から高性能分光器で $^{57}\text{Fe}$ 同位体に共鳴する高輝度X線の生成を実現。
- ② 集光装置で $\mu$ ビーム化して、鉄の表面を集中的に観察できるようにした。



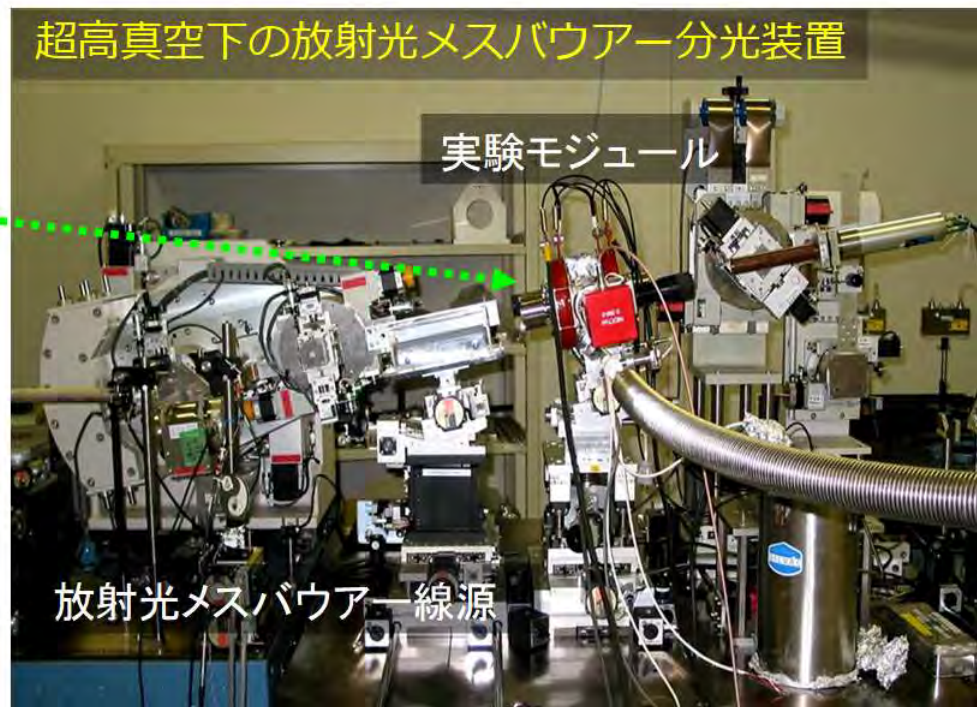
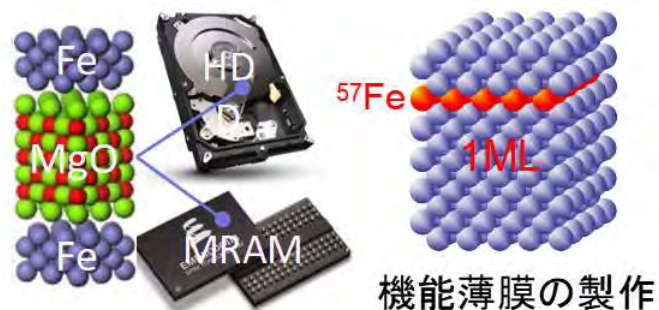
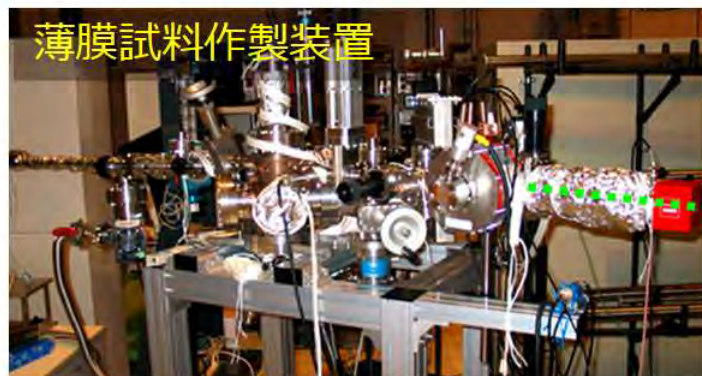


### 3. 開発装置の紹介

この方法で、超高真空下の薄膜を短時間測定できる機器の開発を行った。

#### 機器開発のポイント

③ 超高真空下で製作した薄膜試料の清浄表面を測定できるモジュールを開発。

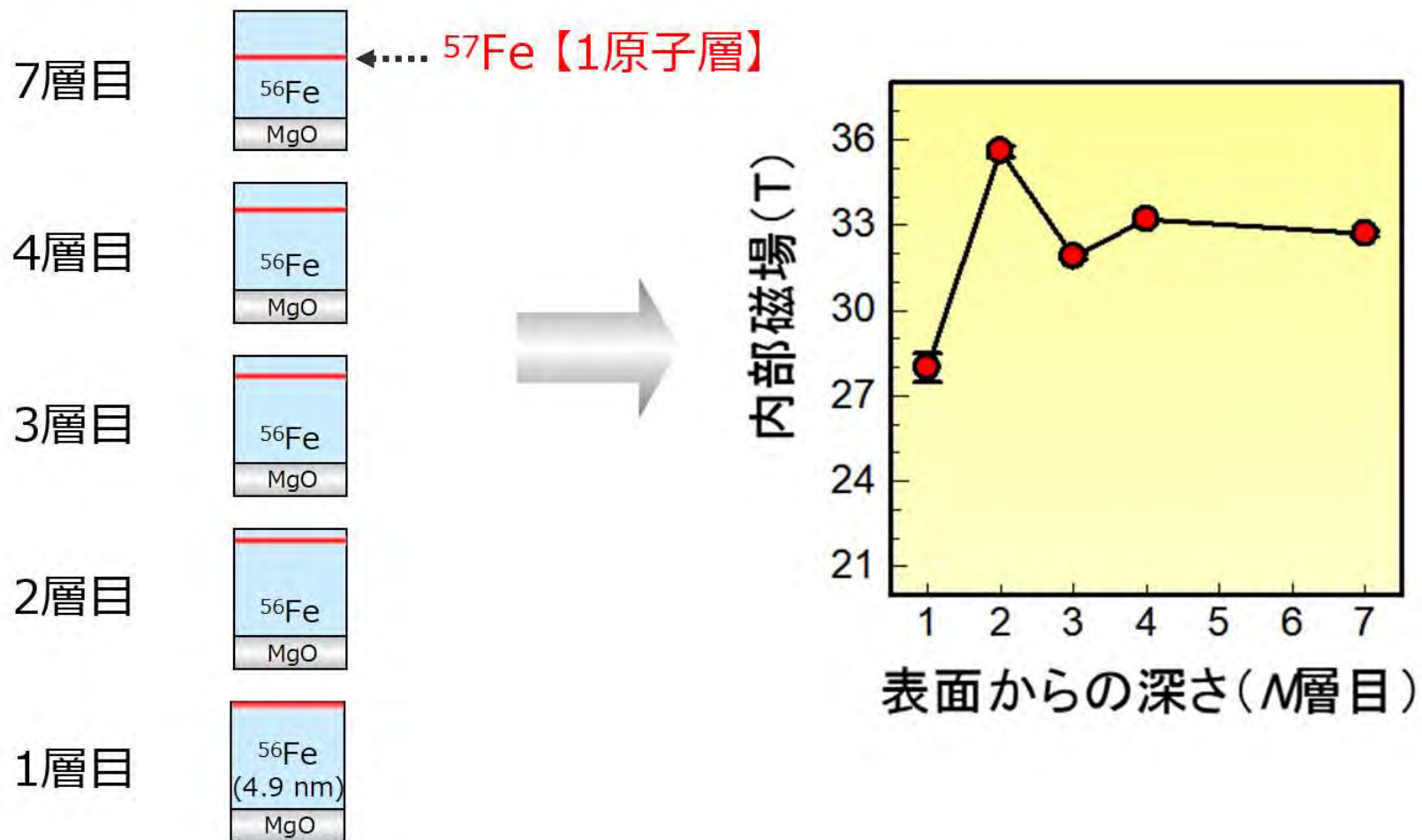


鉄の薄膜に埋め込んだ1原子層の $^{57}\text{Fe}$ マーカ層を短時間測定できる！

## 4. 鉄表面の局所磁性探査

表面から1~4、7層目に $^{57}\text{Fe}$ を1層だけ埋め込んだ鉄薄膜を用意して測定

- 表面から第4層目までに明瞭な内部磁場の振動パターンを観測できた。

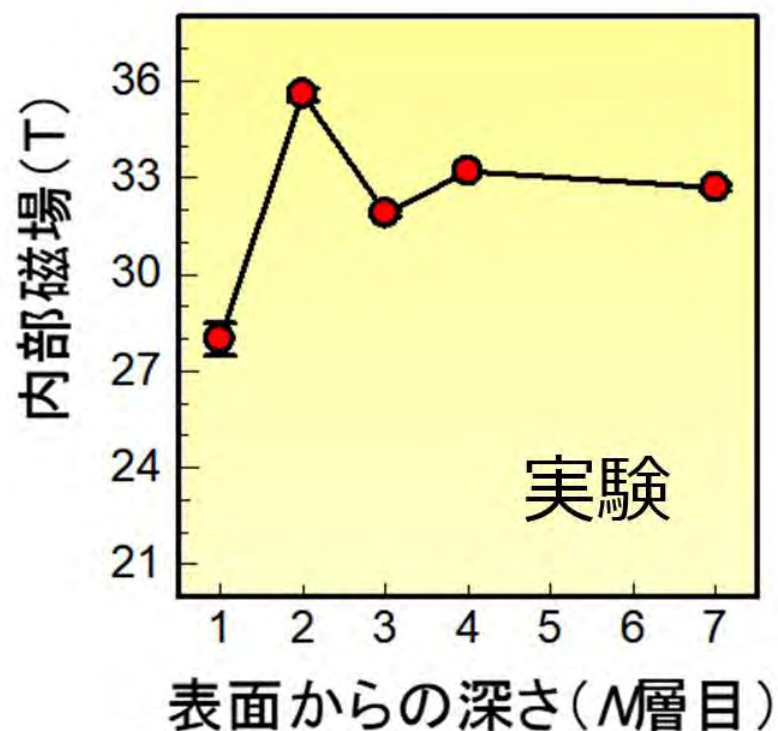
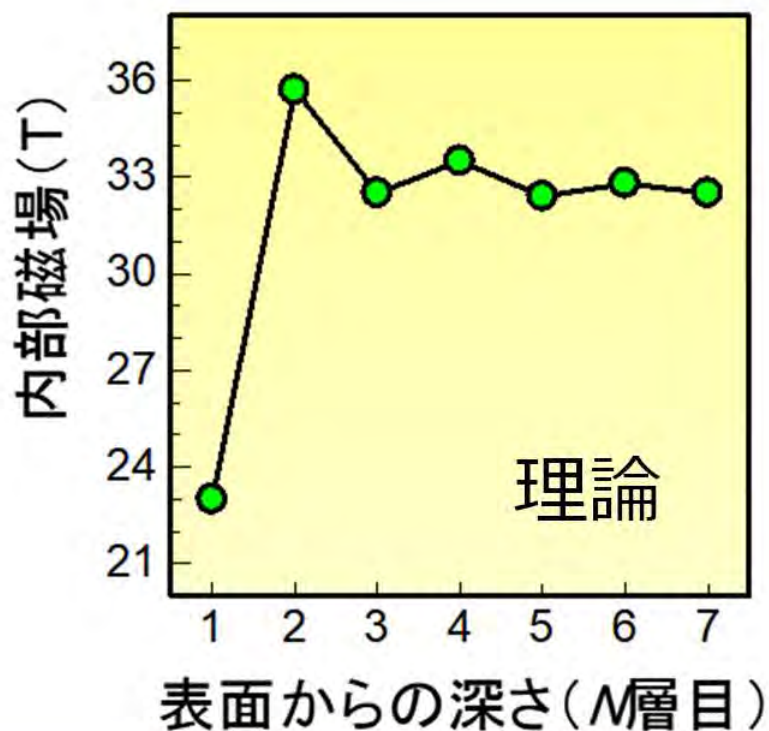




## 4. 鉄表面の局所磁性探査

表面から1~4、7層目に $^{57}\text{Fe}$ を1層だけ埋め込んだ鉄薄膜を用意して測定

- ・ 表面から第4層目までに明瞭な内部磁場の振動パターンを観測できた。
- ・ 実験条件を考慮して計算した内部磁場の振動パターンと定性的によく一致。

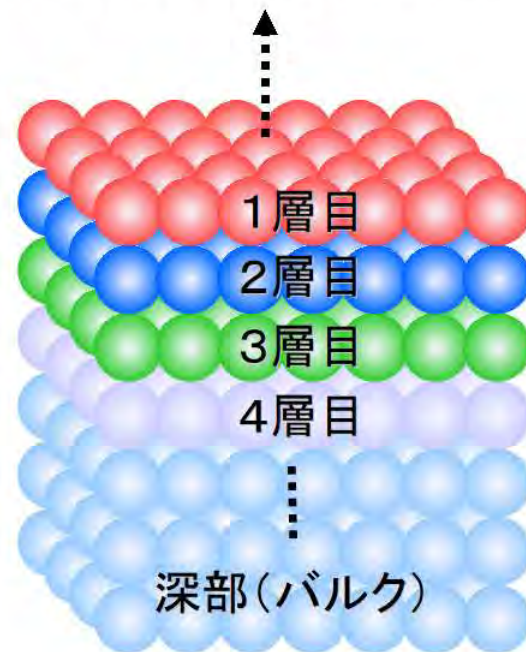


鉄表面の「磁気フリーデル振動」の存在を初めて実験的に証明できた。

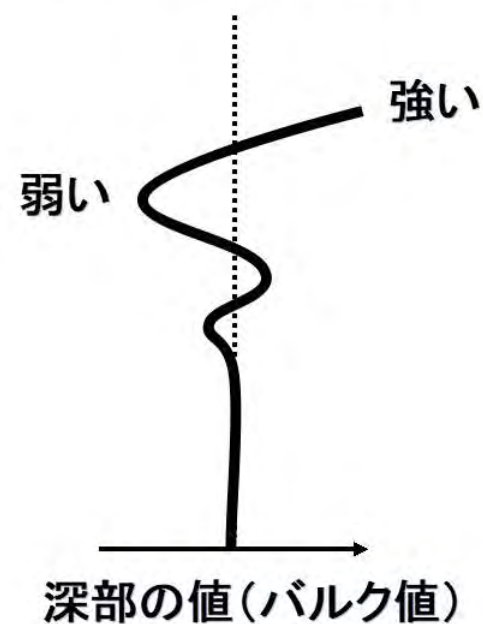
## 5. まとめ

詳細な理論考察 → **体感できる原子磁石は内部磁場と逆に振動する！**

鉄の表面では一原子層  
毎に磁力が増減する！



原子磁石の磁力



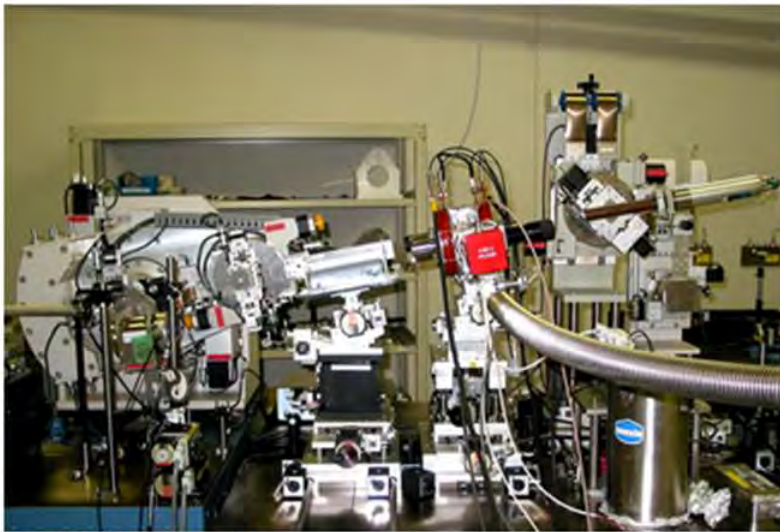
現実の鉄の磁石の強さは、表面では深部より強く、2層目では弱くなり、一原子層毎に磁力を増減させながら通常の鉄の磁力に回復してゆく。



## 5. まとめ

### Scientists Observe Long-Predicted Magnetic Friedel Oscillations

*Milestone reached in contemporary magnetism research*



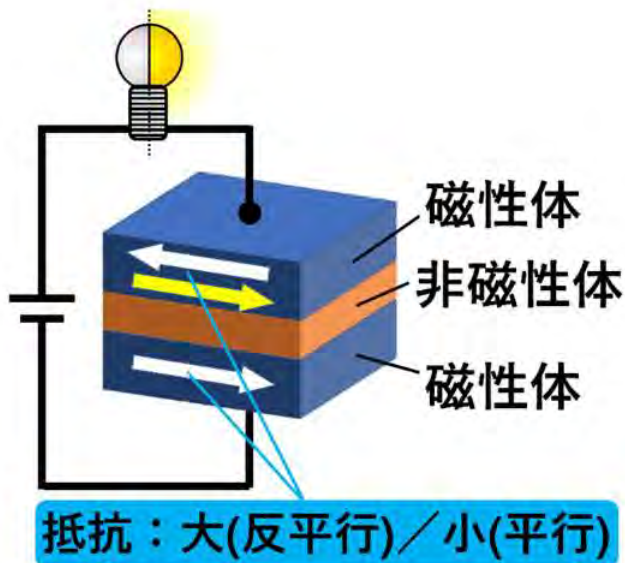
Credit: Takaya Mitsui

Physical Review Letters 誌に掲載され、  
同時にEditors' Suggestionに選ばれ、APS  
のOnline magazine「Physics Magazine」  
に掲載予定 (12/3)

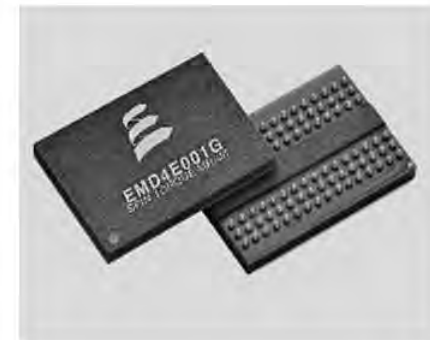
磁性科学における  
マイルストーン研究

## 5. 今後の展開

一原子層毎に金属薄膜を磁気構造解析できる計測技術を、磁気デバイスやスピントロニクスデバイス用の多層膜磁性材料の表面・界面の局所磁性の分析に活用したい。



ハードディスク



MRAM

超高密度磁気メモリ

磁気抵抗素子  
(磁気メモリの心臓部)



MRAM用磁気抵抗素子  
厚さ1nm以下の鉄(鉄合金)  
と酸化マグネシウムを積層

出典:IEDM2019/IBM