

GdとTi原子の 紫外の高分解能レーザー分光

量子エレクトロニクス

6406017 根本佳和

発表の流れ

- 🔊 研究背景
- 🔊 理論
- 🔊 実験装置
- 🔊 実験結果
- 🔊 Discussion
- 🔊 まとめと展望

研究背景

超微細構造

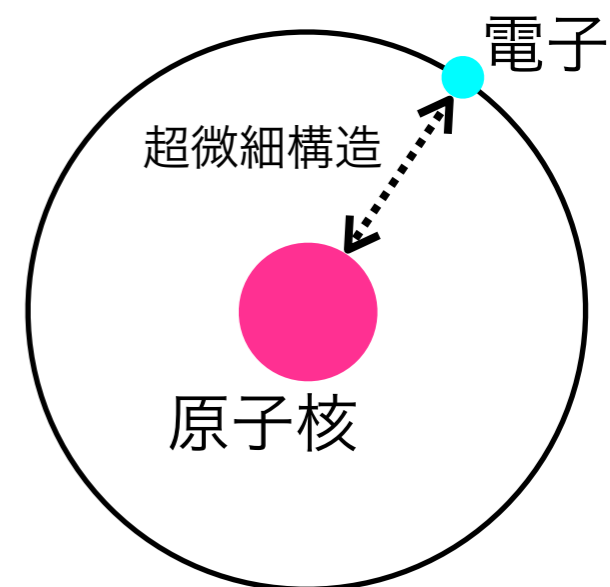
Configuration

磁気双極子モーメント
電気四重極モーメント

同位体シフト

電子密度

電子間相互作用(SMS)
核電荷半径



原子、原子核の性質

特殊質量シフト (Specific mass shift:SMS)

多電子系のハミルトニアン

$$H = \frac{1}{2\mu} \sum_{i=1}^N p_i^2 + \frac{1}{M} \sum_{i<j}^N p_i \cdot p_j - \sum_{i=1}^N \frac{Z}{r_i} + \sum_{i<j}^N \frac{1}{|r_i - r_j|} \quad (\text{Ref.1})$$

Specific Mass Shift

多電子系は計算が困難

実験：
$$\begin{array}{l} ns^2 - nsnp \\ ns - np \end{array}$$
 無視出来る

他の遷移については未知

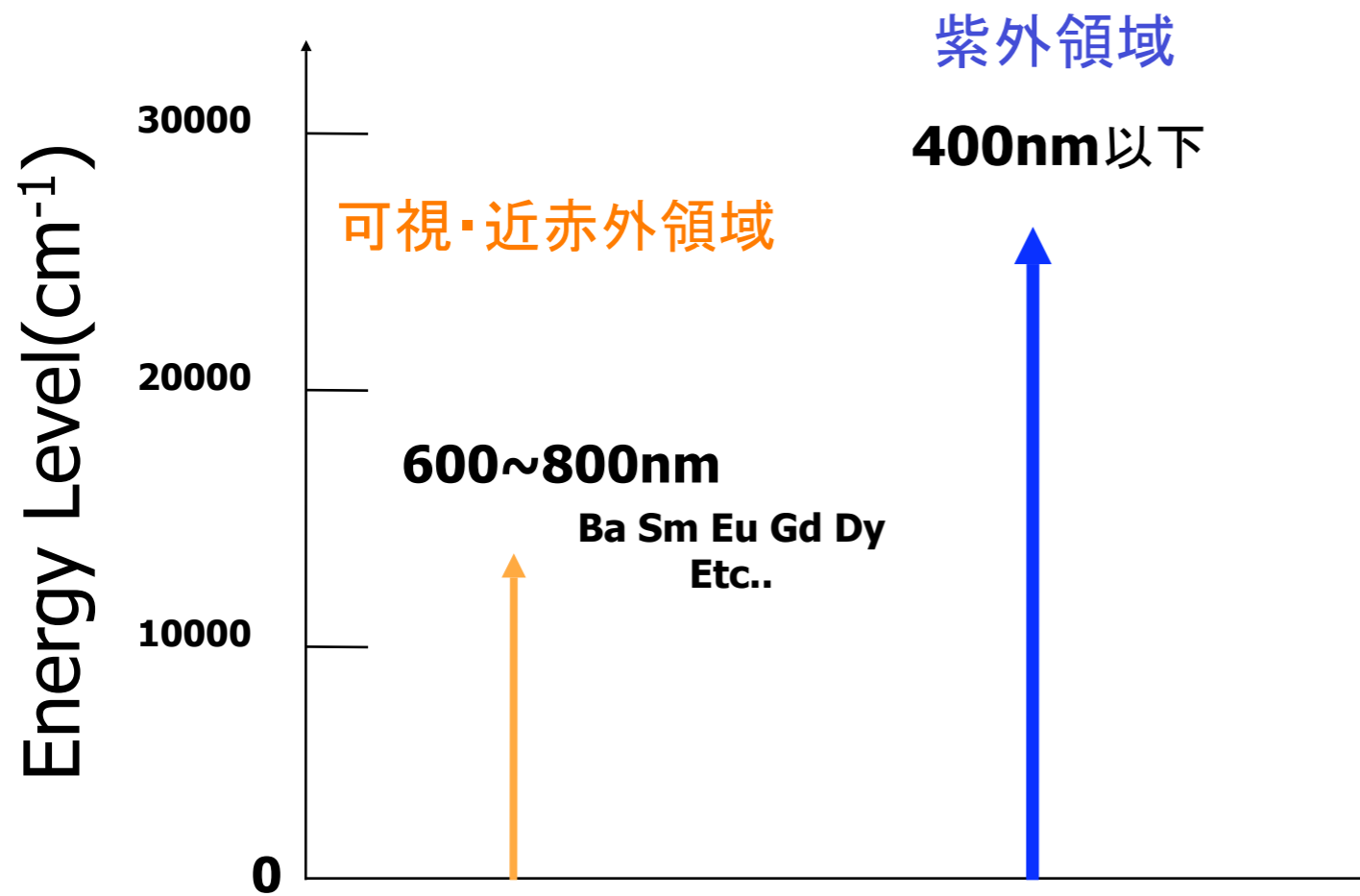
様々な遷移についての実験

これまでの研究領域
可視・近赤外領域における
希土類元素の研究

電子配置が複雑
Shape transition領域

遷移の種類が少ない

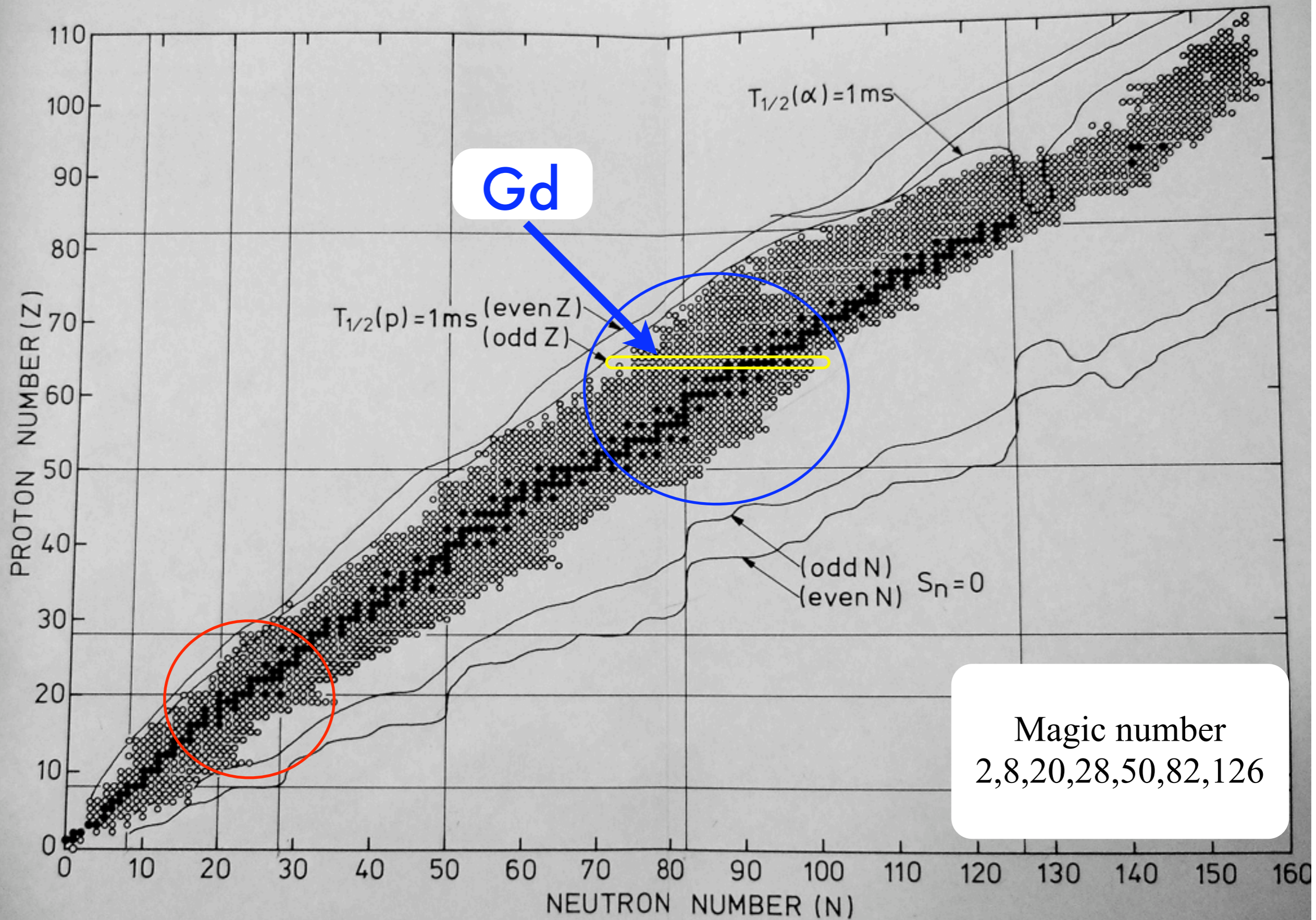
より多くのSMSの理論計算との比較が難しい



超微細構造定数
同位体シフト
Configuration

高励起準位・・・様々な遷移が存在

SMSの系統的な
研究が可能

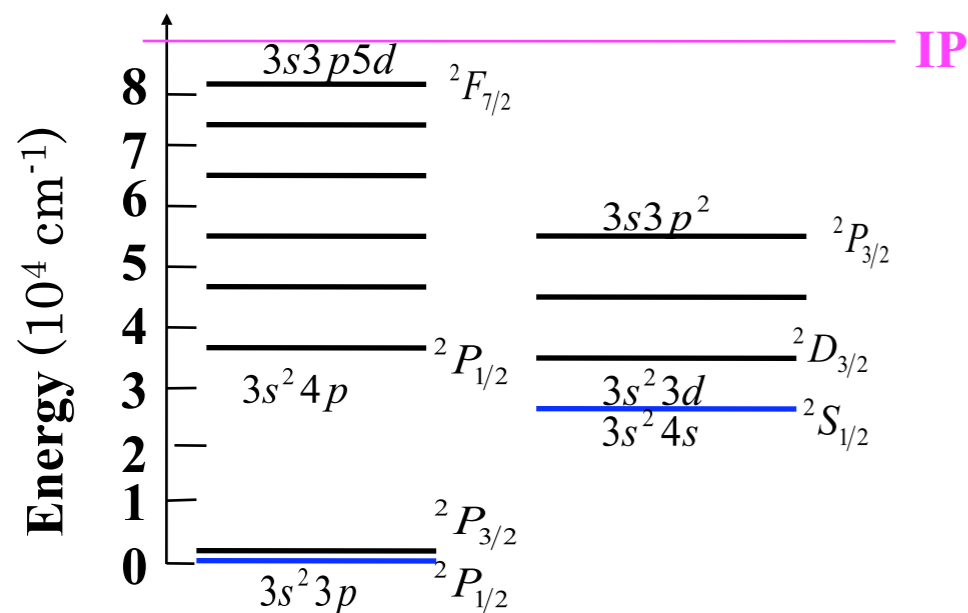


これまでの研究領域の拡張

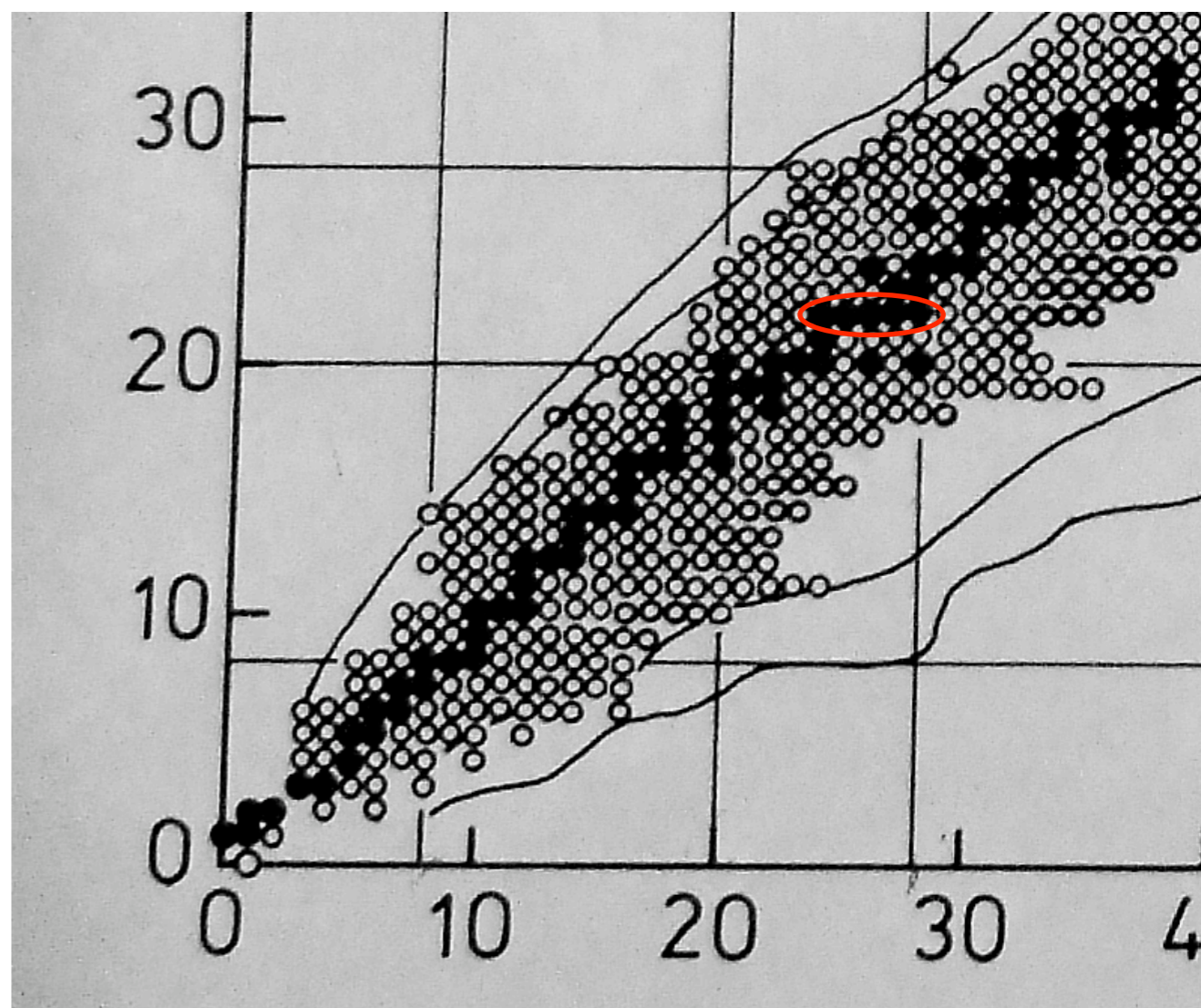
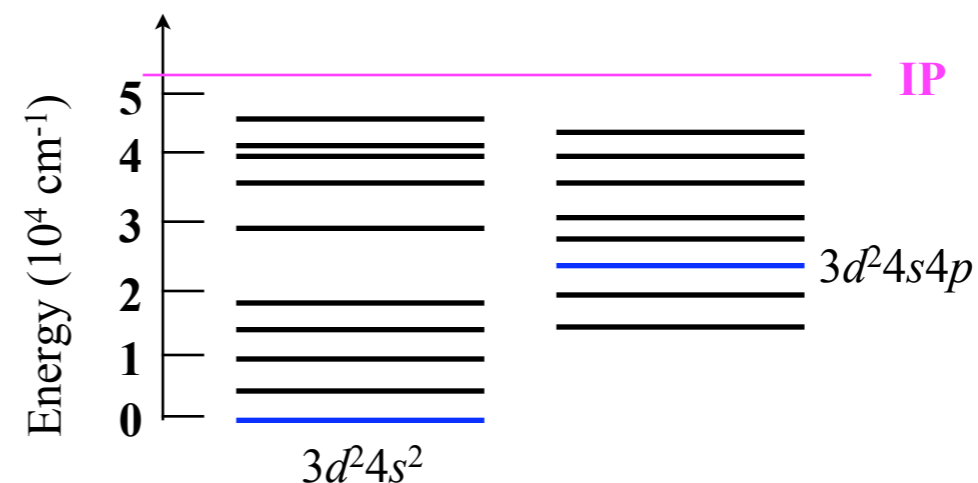
軽い元素

遷移波長はほぼ紫外領域

例：Al原子



本実験ではTi原子を用いた
高融点元素



理論

超微細構造(HFS)

$$E_{\text{hfs}} = E_{\text{hfs}}^{\text{d}} + E_{\text{hfs}}^{\text{q}} = \frac{1}{2}AC + \frac{B}{4} \frac{\frac{3}{2}C(C+1) - 2I(I+1)J(J+1)}{I(2I-1)J(2J-1)}$$

$$C = F(F+1) - I(I+1) - J(J+1)$$

A : 磁気双極子相互作用定数

B : 電気四重極相互作用定数

$$A = \mu_I \frac{H_e}{IJ}$$

$$B = eQ_s \left\langle \frac{\partial^2 V}{\partial Z^2} \right\rangle$$

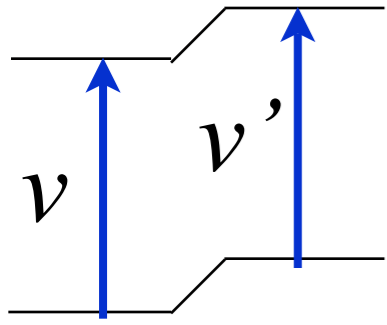
H_e : 磁場

$\frac{\partial^2 V}{\partial Z^2}$: 電場勾配

μ_I : 磁気双極子モーメント

Q_s : 電気四重極モーメント

同位体シフト (IS)



$$\delta\nu' = \nu' - \nu$$

Mass Shift

$$\delta\nu_{IS}^{AA'} = \delta\nu_{MS}^{AA'} + \delta\nu_{FS}^{AA'}$$

$$\delta\nu_{MS}^{AA'} = \delta\nu_{NMS}^{AA'} + \delta\nu_{SMS}^{AA'}$$

$$\delta\nu_{NMS}^{AA'} = \frac{\nu^{tf}}{1836.15} \frac{A - A'}{AA'} = N \frac{A - A'}{AA'} \quad \text{:Normal Mass Shift}$$

電子と原子核の換算質量の変化

$$\delta\nu_{SMS}^{AA'} = S \frac{A - A'}{AA'}$$

電子間の相互作用

:Specific Mass Shift

- 多電子系は計算が困難
- 実験データが少ない

Field Shift

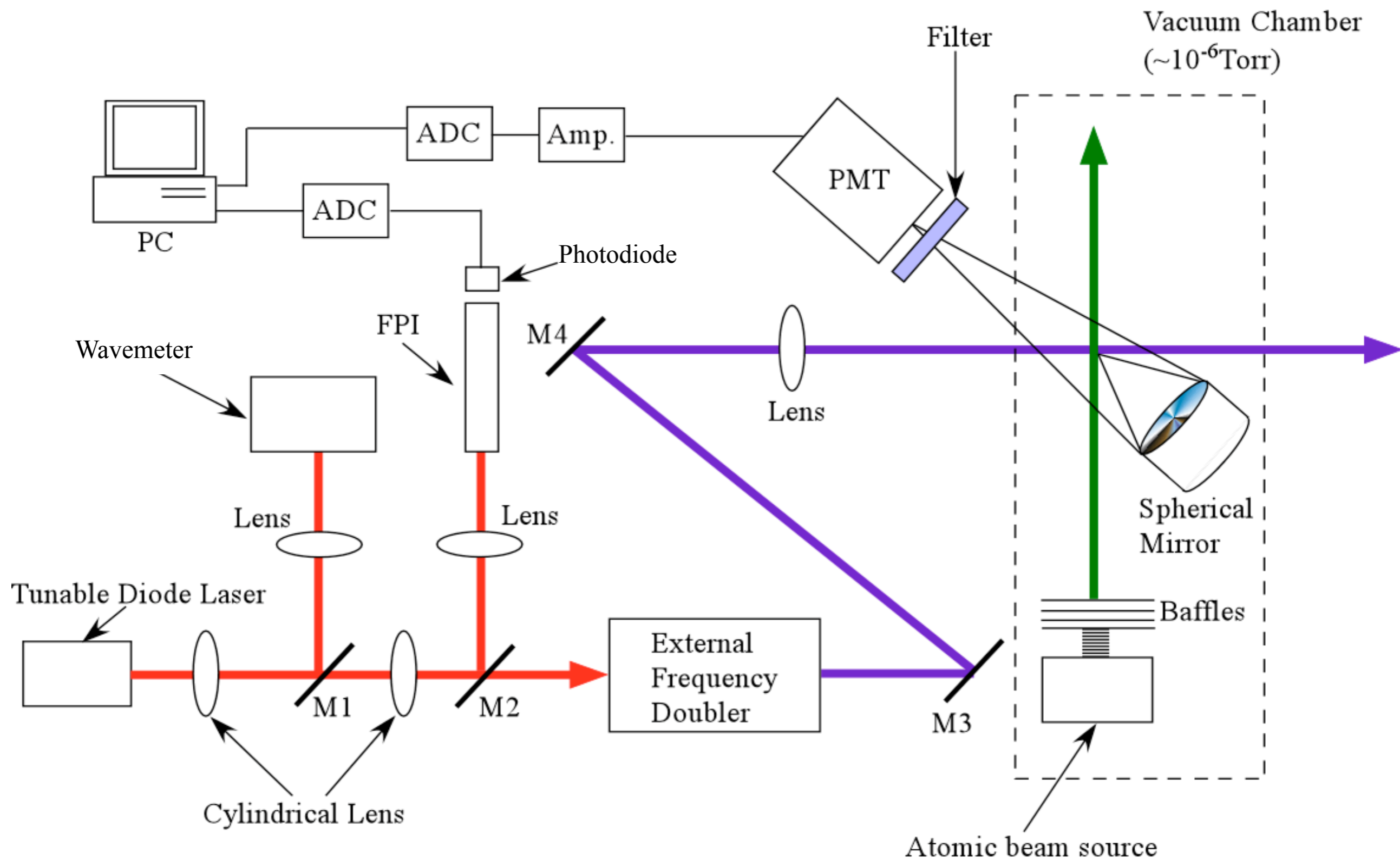
$$\delta\nu_{FS}^{AA'} = \frac{\pi a_0^3}{Z} \Delta |\Psi_S(0)|^2 f(Z) \delta \langle r^2 \rangle^{AA'}$$

a_0 : ボーア半径 $\Delta |\Psi_S(0)|^2$: 原子核の位置の波動関数

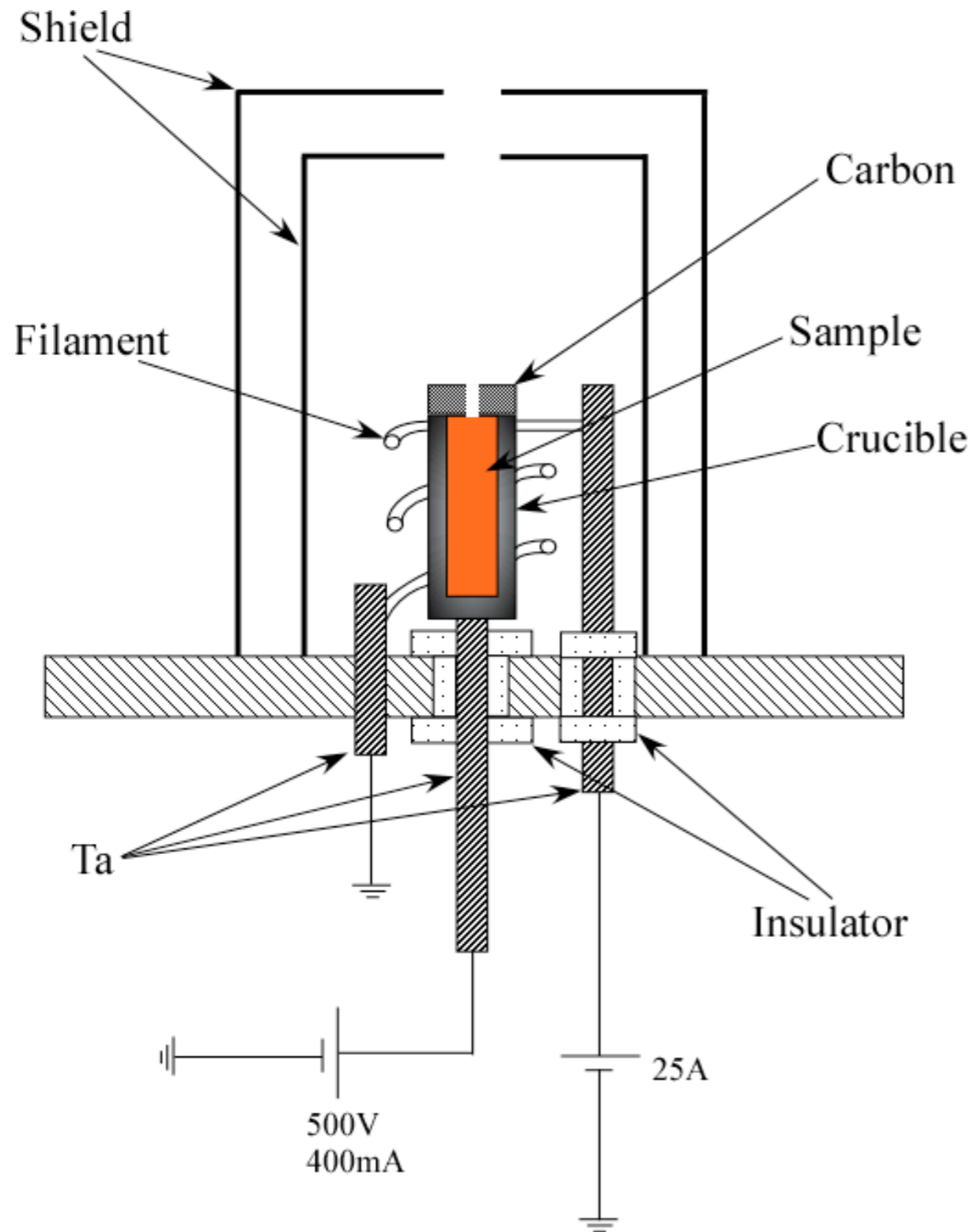
$f(Z)$: 相対論的補正関数 $\delta \langle r^2 \rangle$: 平均二乗核電荷半径の差

実験装置

実験装置全体図



原子線源



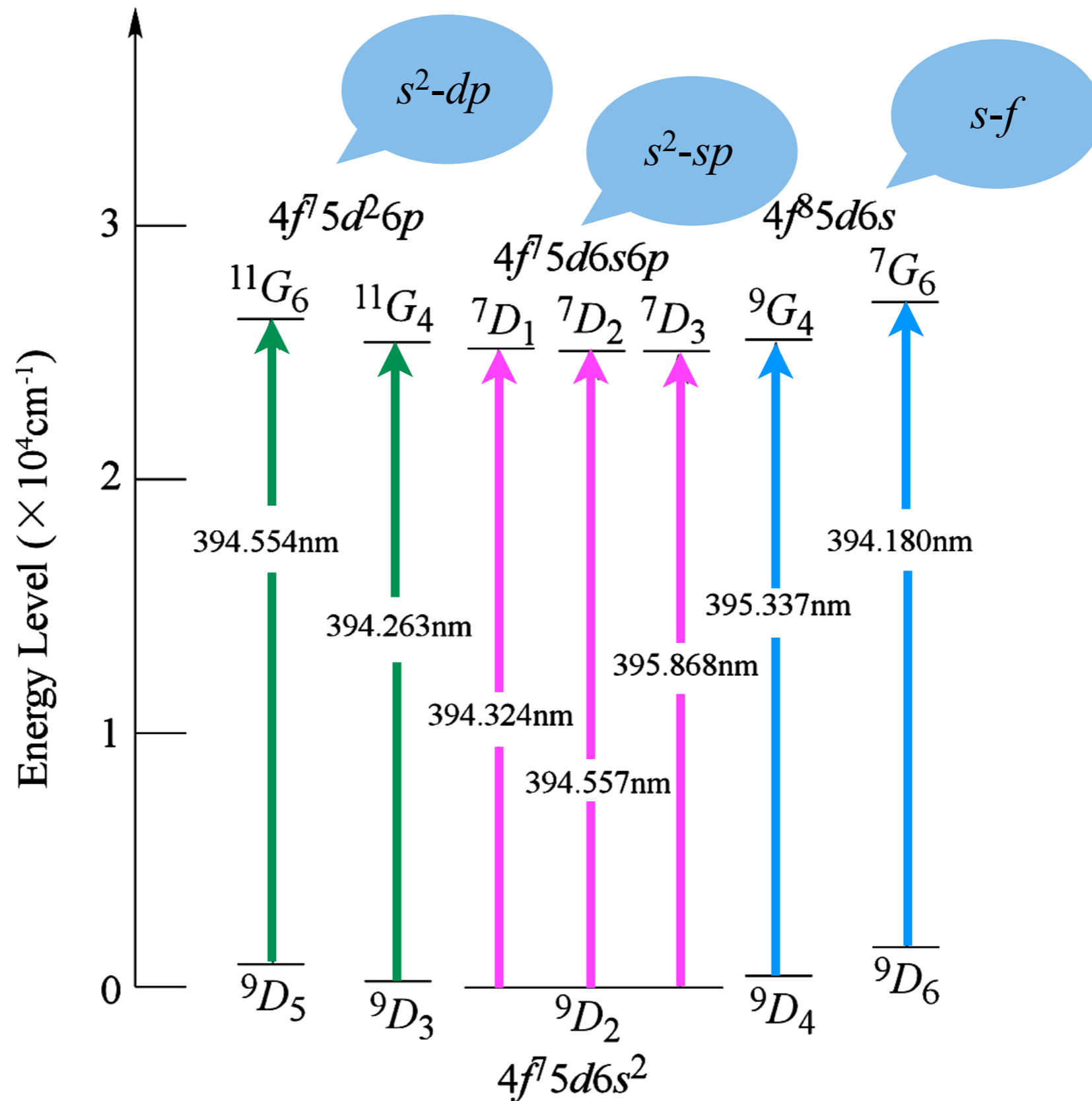
Crucible: Mo

Filament: Ta

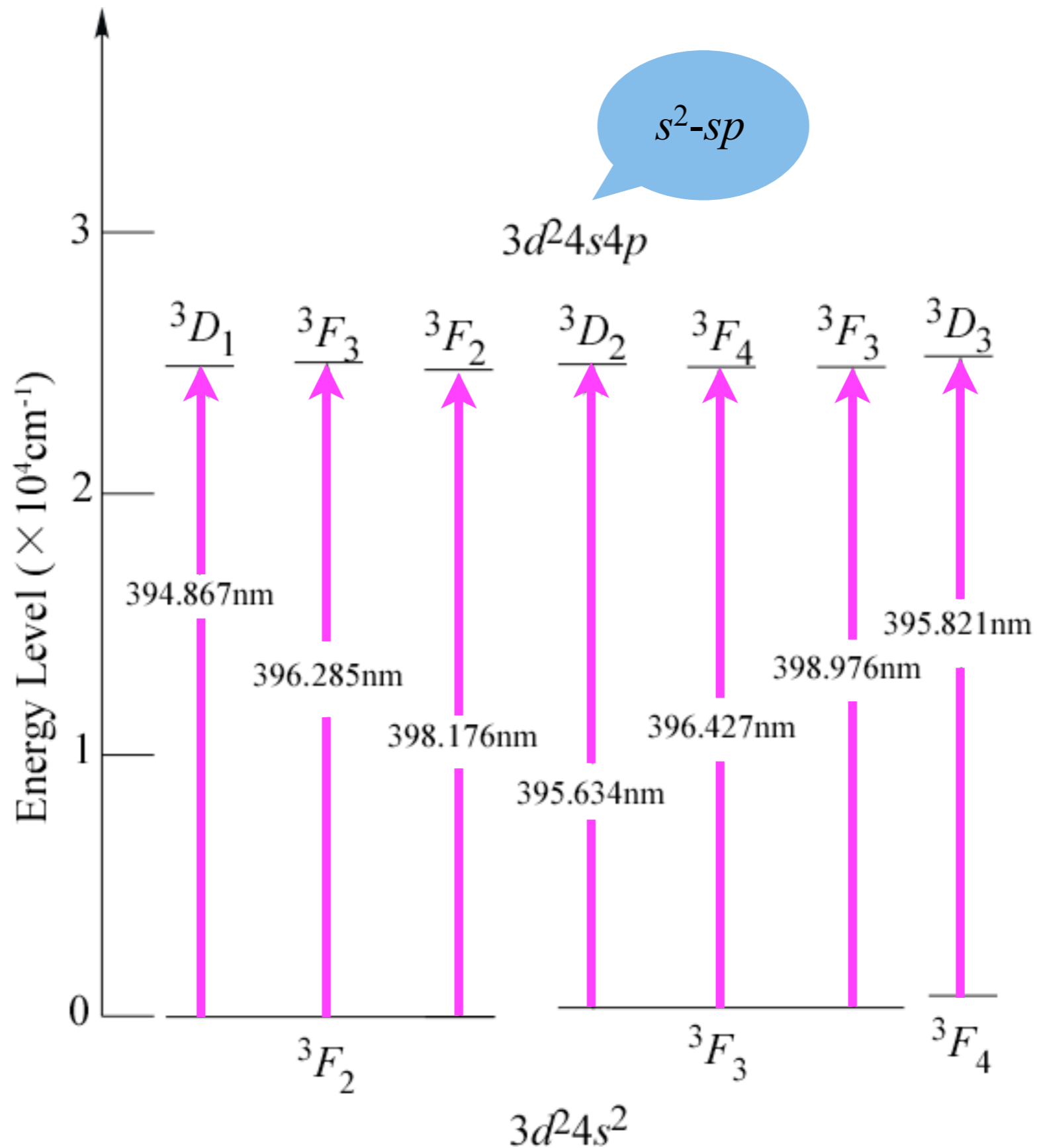
Shield: Mo

実験結果

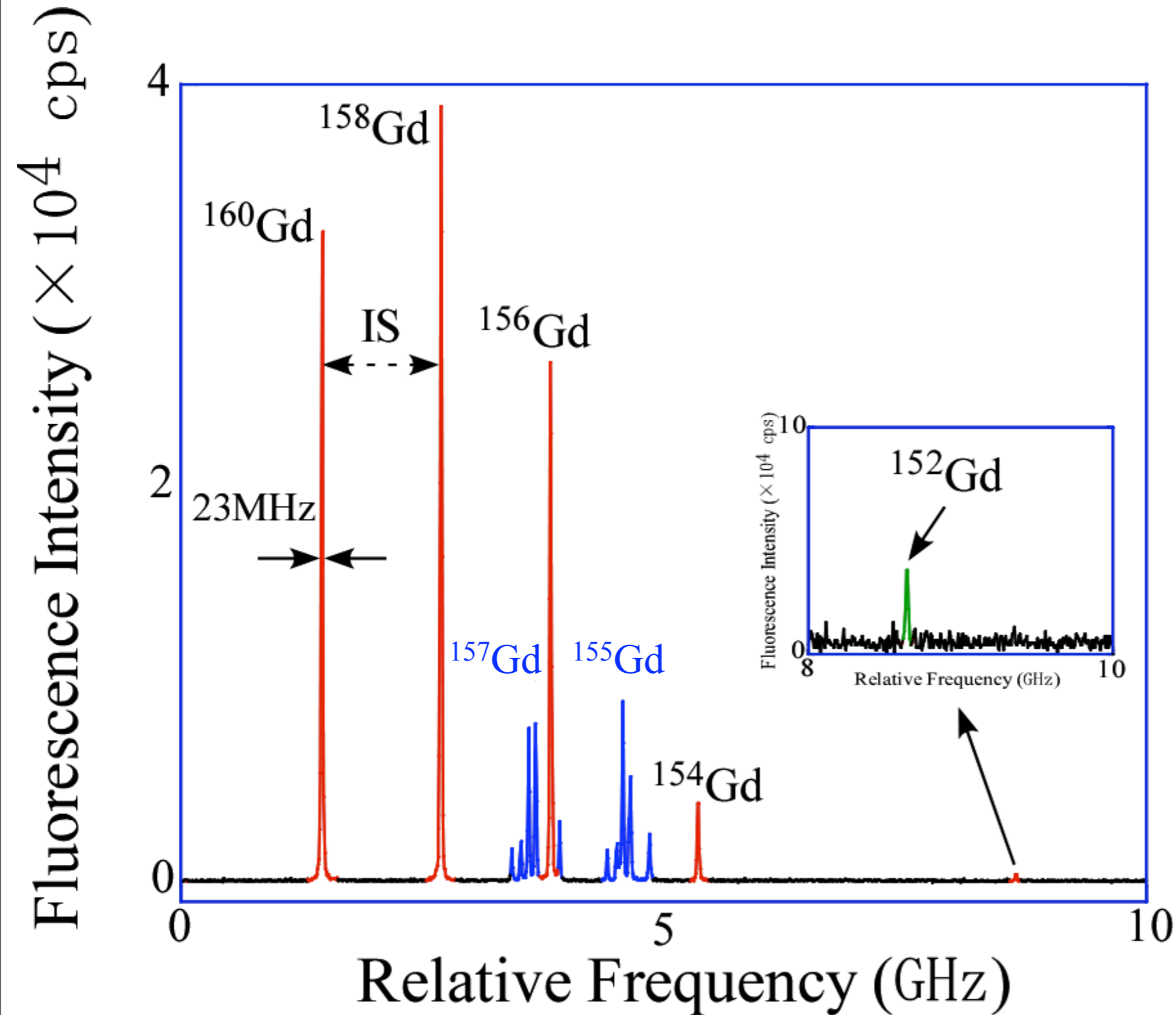
Gd原子の測定遷移



Ti原子の測定遷移

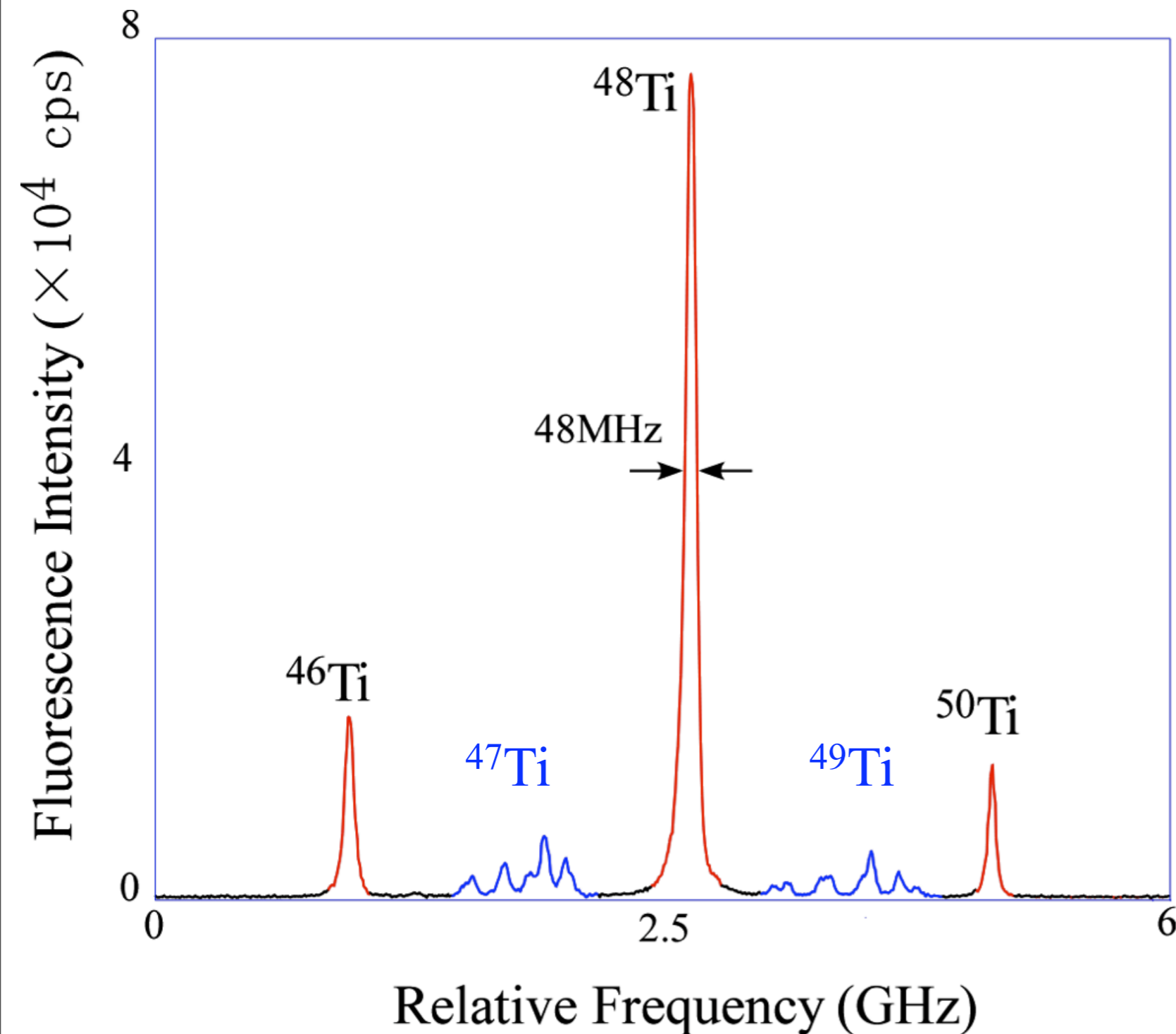


Gd原子の超微細構造スペクトル(394.324nm)



安定同位体	存在比(%)	核スピン
^{152}Gd	0.2	0
^{154}Gd	2.2	0
^{155}Gd	14.8	3/2
^{156}Gd	20.5	0
^{157}Gd	15.7	3/2
^{158}Gd	24.8	0
^{160}Gd	21.9	0

Ti原子の超微細構造スペクトル(394.867nm)



安定同位体	存在比(%)	核スピン
^{46}Ti	8.0	0
^{47}Ti	7.3	7/2
^{48}Ti	73.8	0
^{49}Ti	5.5	5/2
^{50}Ti	5.4	0

結果

Gd原子の超微細構造定数

Isotope	^{157}Gd		^{155}Gd	
	A (MHz)	B (MHz)	A (MHz)	B (MHz)
Energy Level (cm^{-1})				
25254	101.0(3)	-3.6(4)	83.0(3)	-6.4(3)
25572	-68.2(5)	-842.7(17)	-62.2(4)	-770.0(38)

Gd原子の同位体シフト

Wavelength(nm)	Transition	Isotope Shift(MHz)			
		160-158	158-156	156-154	154-152
394.324	s^2-sp	-1209.5(13)	-1151.8(13)	-1569.7(13)	-3572.4(27)
394.557	s^2-sp	-1398.6(15)	-1320.1(19)	-1799.4(25)	-4132.4(45)
395.868	s^2-sp	-1375.7(14)	-1310.4(13)	-1765.5(21)	
394.263	s^2-dp	-2247.3(12)	-2175.1(17)	-2953.5(22)	-6807.4(60)
394.554	s^2-dp	-2391.0(13)	-2287.0(18)	-3086.8(27)	
394.180	$s-f$	-1987.8(11)	-1913.7(15)	-2667.1(19)	
395.337	$s-f$	-1967.2(12)	-1882.4(13)	-2612.2(23)	

Ti原子の超微細構造定数

Isotope		^{47}Ti		^{49}Ti	
Energy level (cm^{-1})	Wavelength (nm)	A (MHz)	B (MHz)	A (MHz)	B (MHz)
25107	398.176	-84.91(5)	6.92(34)	-85.67(4)	3.41(44)
25227	396.285	-46.17(19)	-22.0(25)	-46.35(9)	-11.7(17)
25318	394.867	-135.27(30)	1.59(90)	-135.47(19)	7.89(71)
25439	395.634	-76.96(7)	10.71(47)	-77.23(9)	14.3(12)
25644	395.821	-17.94(9)	33.5(13)	-13.66(5)	13.14(99)

Ti原子の同位体シフト

Wavelength(nm)	Transition	Isotope Shift(MHz)	
		46-48	48-50
394.867	<i>s-p</i>	1745.0(9)	1631.4(11)
395.634	<i>s-p</i>	1487.4(7)	1403.0(8)
395.821	<i>s-p</i>	1780.5(8)	1667.2(9)
396.285	<i>s-p</i>	1303.3(6)	1216.8(9)
396.427	<i>s-p</i>	1261.0(7)	1195.7(9)
398.176	<i>s-p</i>	1241.7(6)	1172.2(7)
398.976	<i>s-p</i>	1334.3(5)	1215.6(6)

Discussion

Discussion 1

Gd原子のSMS

King Plot

他のエネルギー遷移のISのデータを用いてSMSを求める

Modified isotope shift

$$\delta\nu_i^{\text{mod}} = (\delta\nu_i - \delta\nu_i^{\text{NMS}}) \frac{AA'}{A - A'}$$

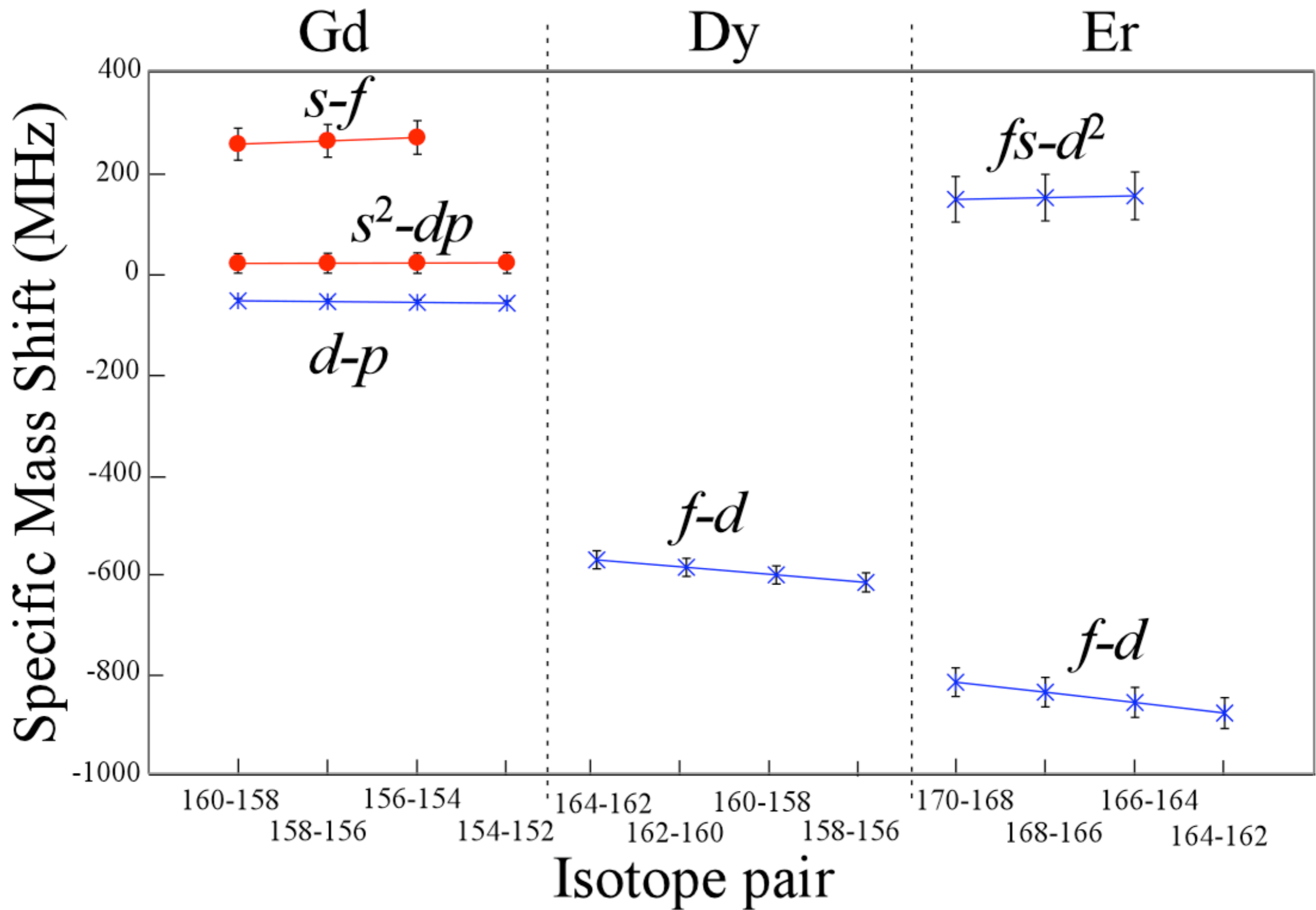
2つの遷移*i,j*を考える

$$\delta\nu_i^{\text{mod}} = \frac{E_i}{E_j} \delta\nu_j^{\text{mod}} + \left(M_i^{\text{SMS}} - \frac{E_i}{E_j} M_j^{\text{SMS}} \right) \cdot \frac{A - A'}{AA'}$$

E_i/E_j : Electronic Factorの比

$$\text{ns}^2\text{-nsnp遷移} \quad \delta_{\text{SMS}}^{AA'} = (0.0 \pm 0.5) \delta\nu_{\text{NMS}}^{AA'}$$

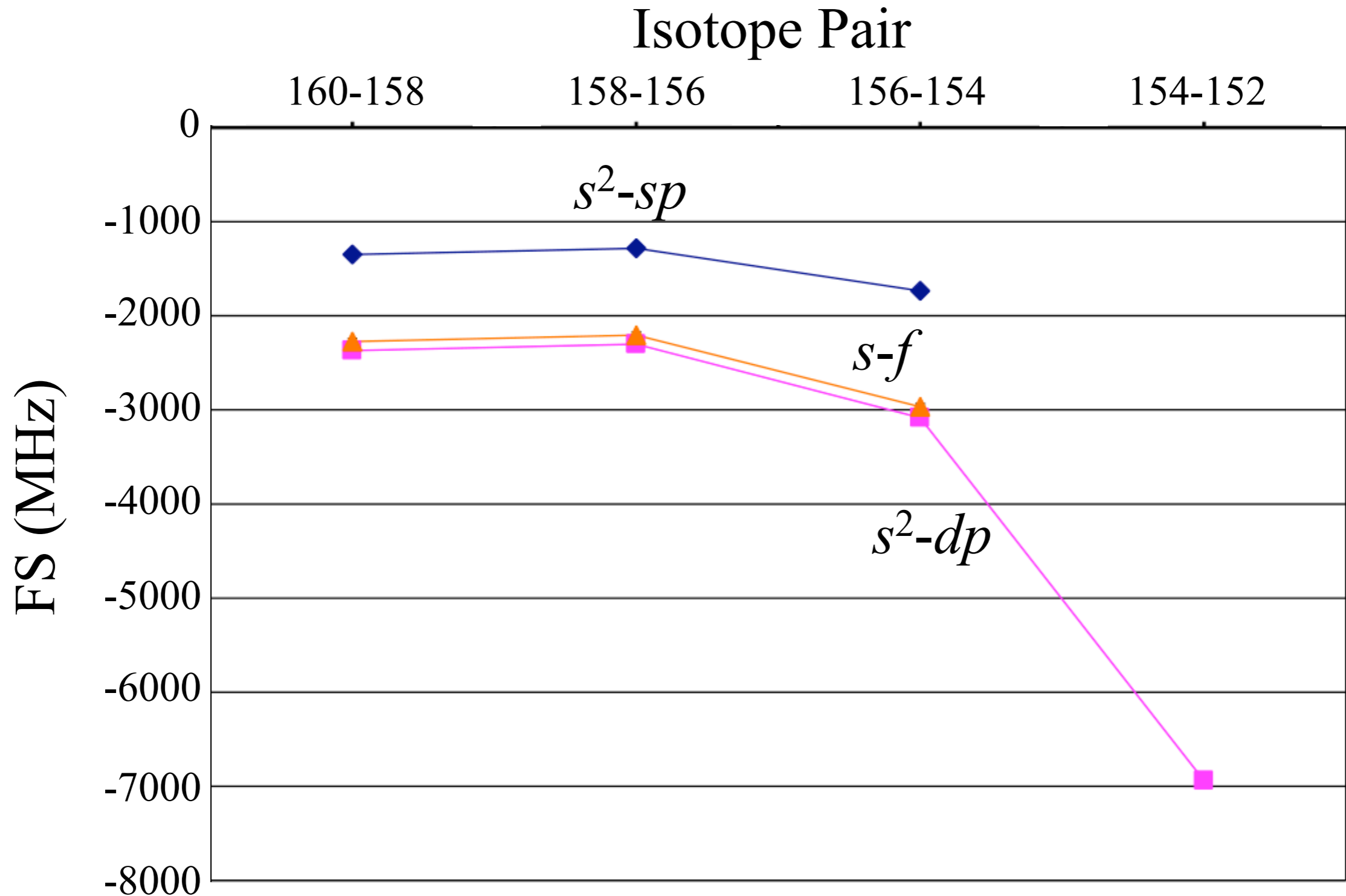
各元素におけるSMSの比較



Discussion 2

Gd原子のFS

$$\delta\nu_{\text{FS}}^{AA'} = \frac{\pi a_0^3}{Z} \Delta |\Psi_S(0)|^2 f(Z) \delta \langle r^2 \rangle^{AA'}$$



まとめと今後の展望

まとめ

- 超微細構造定数 A 、 B の決定
- 同位体シフトを測定
- 希土類元素についてのSMSを計算
- SMSの系統性について検討
- 得られた同位体シフトからFSの値を計算

今後の展望

- 未解析である遷移についての解析
- ^{26}Fe 原子の紫外領域における実験

Stable Isotope	^{58}Fe	^{57}Fe	^{56}Fe	^{54}Fe
Isotopic Abundance	0.28	2.2	91.72	5.8
Nuclear Spin	0	1/2	0	0

Fin.