

短寿命核による核物性

2/04/04 大阪大学大学院理学研究科 南園 忠則

1. はじめに

核・素粒子物理 $\leftrightarrow$ (核)物性 研究
短寿命核探索子の位置付け
使用可能探索子; 30 核種 ($Z \leq 21$)

2. 短寿命核探索子の特徴

PAC、PAD、 μ SR、Mossbauer、 β -NM(Q)R

3. 超微細相互作用

Damages、植込位置、格子緩和、相互作用、

4. 最近のトピックス

5. 組織 (User)

6. まとめ

共同研究者:

阪大理: 超微細相互作用、核構造、 β 崩壊課程、偏極現象

南園忠則、松多健策、 福田光順、 三原基嗣、

南園啓 (TRIUMF)、炭竈聡之 (D3)、長友傑 (D2)、

小倉昌子 (D1)、

谷垣実 (京大熊取)、大坪隆 (新潟大)、泉川卓司 (新潟大)、

佐藤和則 (Jülich)、福田茂一 (若狭湾エネルギー研)、

その他博士と修士課程卒業生大勢

有史初期: 超微細相互作用、核構造、偏極現象

杉本健三、溝渕 明、中井浩二 (東理大)、松田耕自 (日新)

大阪・放医研・LBL 共同研究関係: 不安定核反応偏極現象、核モーメント

北川敦志 (放医研)、野尻洋一 (高工大)、百田佐多生 (高工大)、

G. Langouche (Leuven・大阪 共同)

5. 組織; 物質科学 (HFI-User)

学 内:

(β -NMR); 南園忠則 (理・教授), 下田正 (理・教授),
松多健策 (理・助教授), 福田光順 (理・助教授),
出水秀明 (理・助手), 三原基嗣 (理・助手),
南園啓 (TRIUMF: 海外特別研究員), 朱昇云 (北京 CIAE)
(電子バント理論); 赤井久純 (理・教授), K. Slevin (理・助教授)
吉田博 (産研・教授), 小谷岳生 (理・助手),
(メスバウアー、PAC); 那須三郎 (基礎工・教授),
森本正太郎 (基礎工・助手), 遠藤将一 (極限物質セ)
(NMR); 北岡良雄 (基礎工・教授)
(陽電子消滅); 斉藤直 (RIセ), 奥田修一 (産研), 白井泰治 (工)

関西から九州:

(β -NMR); 野尻洋一 (高知工大), 百田佐多生 (高知工大),
福田茂一 (若狭湾エネルギーセンター)
(PAC); 川瀬洋一 (京大原子炉), 大久保嘉高 (京大原子炉),
谷垣実 (京大原子炉) 定期核物性研究会! 年
(低温核整列/偏極); 大矢進 (新潟大理), 大坪隆 (新潟大理),
泉川卓司 (新潟大 RI センター)
(レーザー); 松本征史 (京大化研)
(メスバウアー); 多数 (工学系; 材料)

関東近辺:

(β -NMR); 旭耕一郎 (理研、東工大), 酒井健二 (理研),
小川博嗣 (理研), 上野秀樹 (理研), 北川敦志 (放医研)
(PAC); 佐藤渉 (理研), 浅井吉蔵 (電気通信大), 鳥山保 (武蔵工),
村松久和 (信大教育)
(On-Lineメスバウアー); 吉田 (静岡工大), 小林 (理研)
(メスバウアー); 多数 (工学系; 材料)

電気を通す、通さない
磁石にくっつく、つかない
固い、柔らかい
熱に強い、弱い
光をとおす、通さない

→ 理解と制御

↓
望ましい物質 の創製、への改良

起源（諸性質）：核を取り巻く電子

→ 原子を凝集させる電子状態
(原子核ではない)

研 究 ≡ 原子の配列 + 電子の状態

方法（古い）：

電場、磁場、力場の印可 ⇒ 応答を調べる

⇒ 電子状態解明困難

物質科学（最近）：構造材料、機能材料

基になる物質；

極微量不純物

格子欠陥

結晶粒界

表面、界面

→ 決め手！結晶の性質が決まる

これらの不連続点に電子が局在

超塑性セラミック、半導体、磁性材料

電子セラミック（バリスター）

酸化・硫化物光触媒（表面量子構造）

透明導電材料（不純物原子・点欠陥）

熱電変換材料・高性能2次電池電極

高度技術化社会の基盤

↓
特異な量子構造を形成

↓
共通性の高い括り方 ⇒ 局在量子構造

局在量子構造：粒界、空孔、不純物、に局在する
電子波動関数

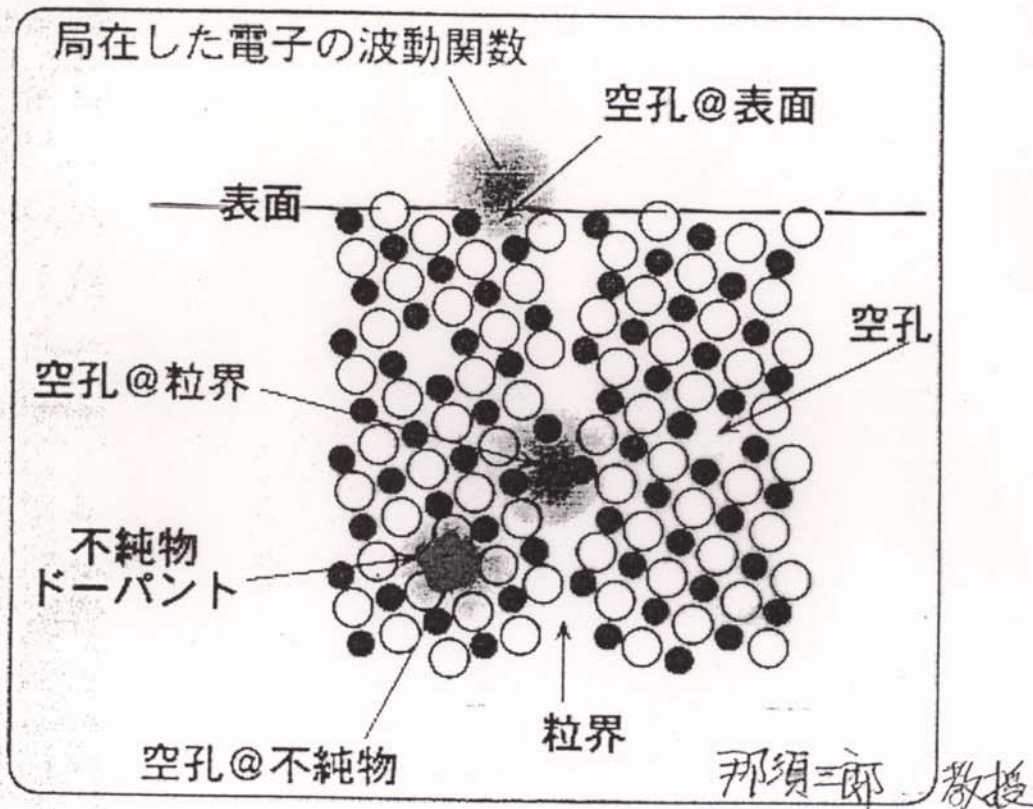


物質の機能発現
不純物や空孔を選択的に調べる



原子核を通じて
空孔と選択的相互作用

電子状態を選択的に調べる可
陽電子の崩壊
：核物性的研究手段

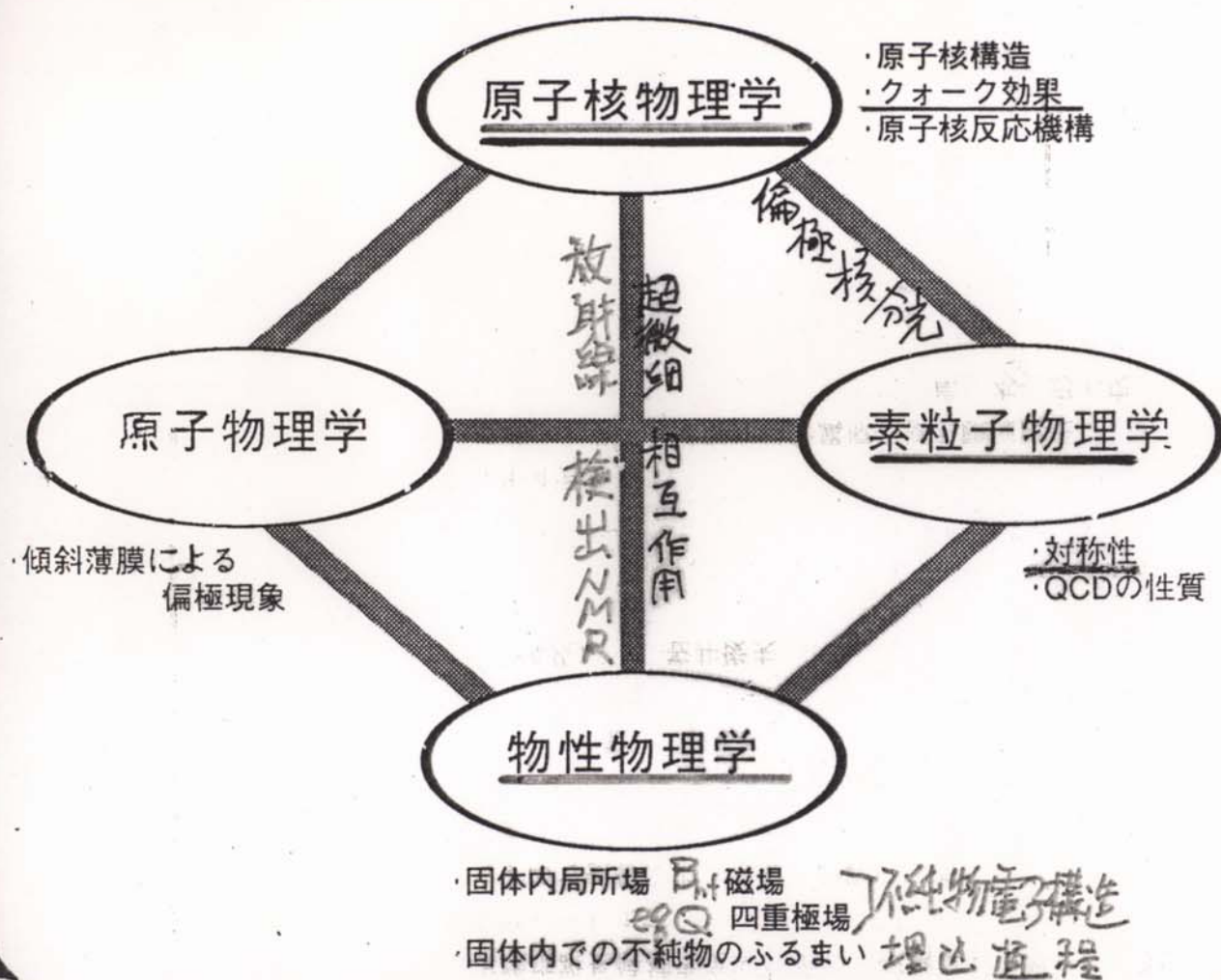


1. X線吸収分光法 放射線・放射性同位元素使用
2. NMR(核磁気共鳴法)
3. NQR(核四重極共鳴法)
4. PAC(摂動角相関法) 放射線・放射性同位元素使用
5. PAD(摂動角分布法)
6. μ SR(μ 粒子スピンの回転法) ←
7. PA(陽電子消滅法) 加速器不可欠
8. NMR-ON(核整列核磁気共鳴法) ↓
9. β -NMR, β -NQR(β 線核磁気共鳴法)

(9. は阪大が開発した方法)

原子核実験

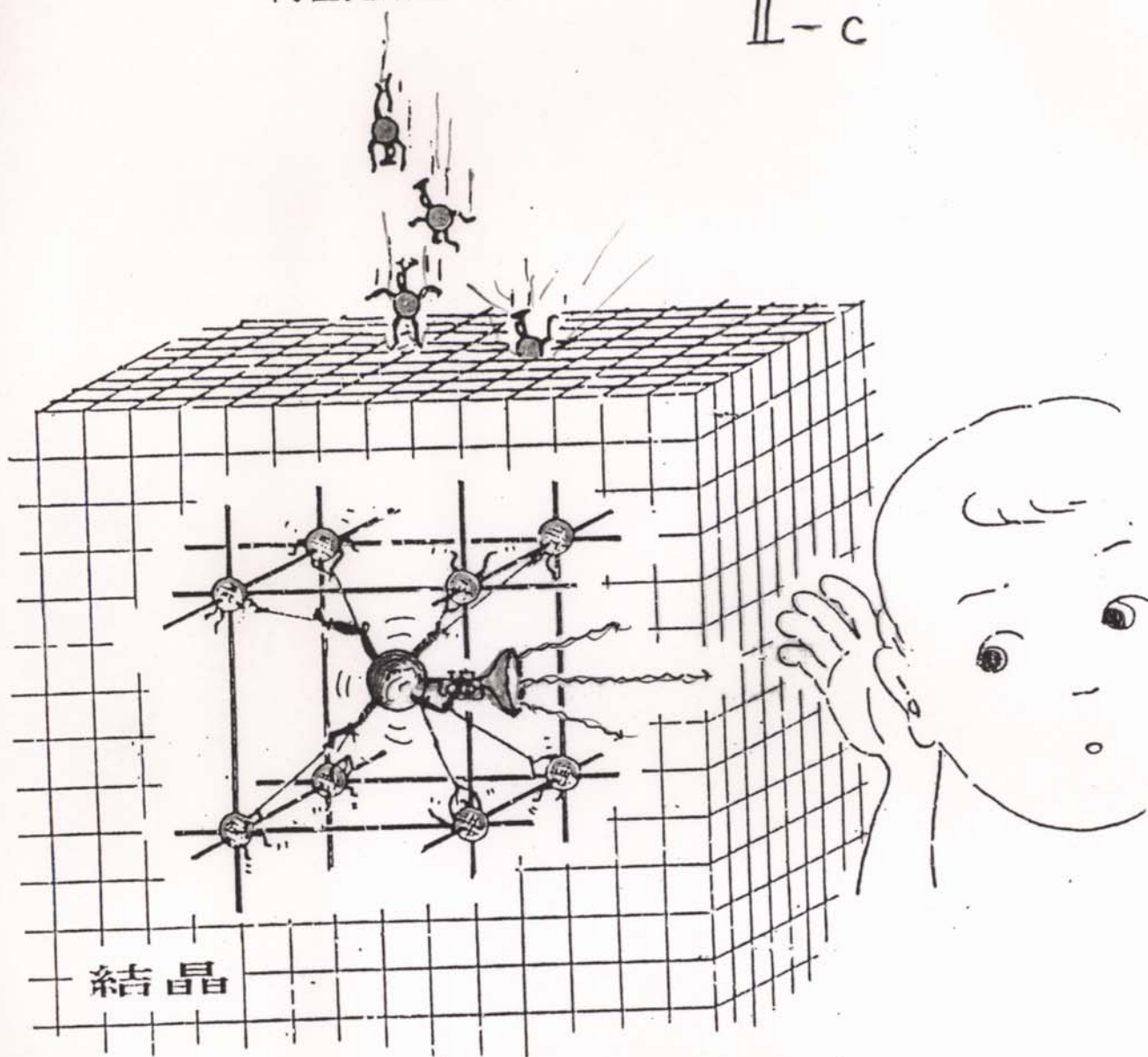
- * ベータ崩壊
- * ベータ線検出核磁気共鳴
- * 高エネルギー重イオン反応
- * 超微細構造相互作用



短寿命元素は結晶の中での「待遇」を放射線ですぐ知らせてくる。

同位元素ビーム

II-c



相互作用
不純物電子構造
物質構造(新物質)・解析的
不確定核トラップ



物

性

核

希薄核・
放射線検出
NMR

放射線
物質加工

不純物
電子構造

機能性
材料

オン・
物質
相互作用

新素材
開発

素材構造の
分析的
解明

放射化
微量分析

放射線損傷と
欠陥の
動的力学

超微細
相互作用

メゾスコピック
物理

放射線
バイオ

放射線検出
超微細
相互作用

半導体不純物の
超微細
相互作用

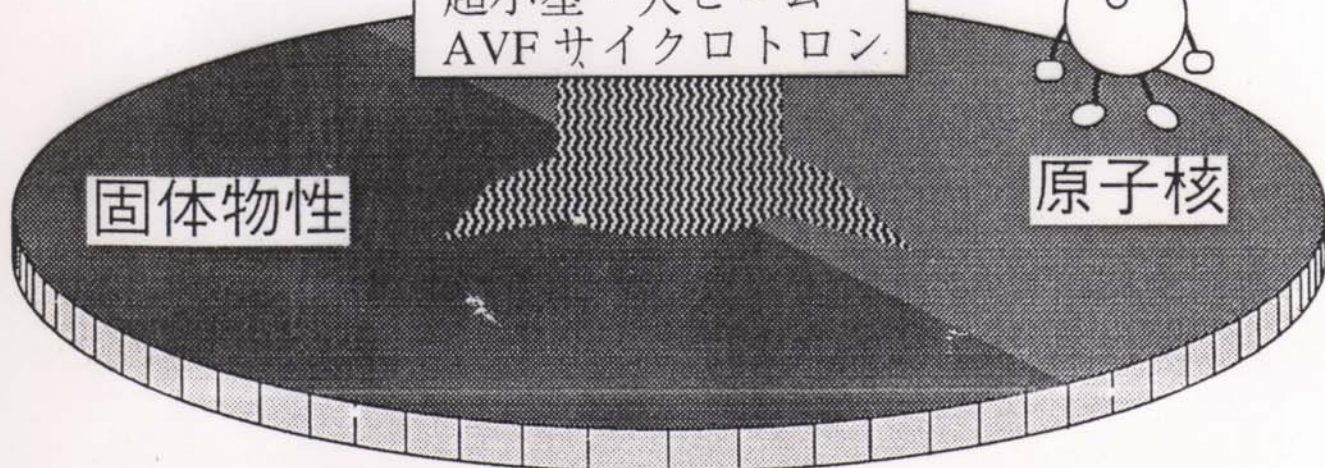
不安定核ビーム

超小型・大ビーム
AVFサイクロトロン

高エネルギー

固体物性

原子核



2. β -NMR & β -NQR β -Emitter で説明する

a β 線放射核の核反応による生成

b 反跳埋込み；結晶中へ

(標的からの引出し、ビーム化、格子間隙トラップ)

c スピン偏極生成、

$$\underline{P} = \sum (m p_m) / \sum p_m \cdot I$$

d 偏極の保持と検出、

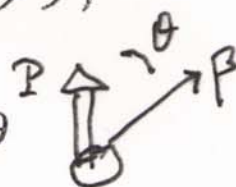
$$\underline{W}(\theta) = 1 + (v/c) A P \cos \theta$$

e 偏極の操作(NMR)、

偏極破壊法、

断熱的速い通過法、

新核四重極共鳴法、



実験装置 (模式図)

Time sequence program データの取方

結晶中 β 放射核の数(サイクル依存); $R = \frac{U}{D}$,

位置(サイクル毎); 8-AP モード、

違いを消去; $P = 0.1\%$ のレベルまで検出可

共鳴位置、幅、時間変化、

温度依存性、磁場依存性

; 物質の電子構造、

不純物の電子構造

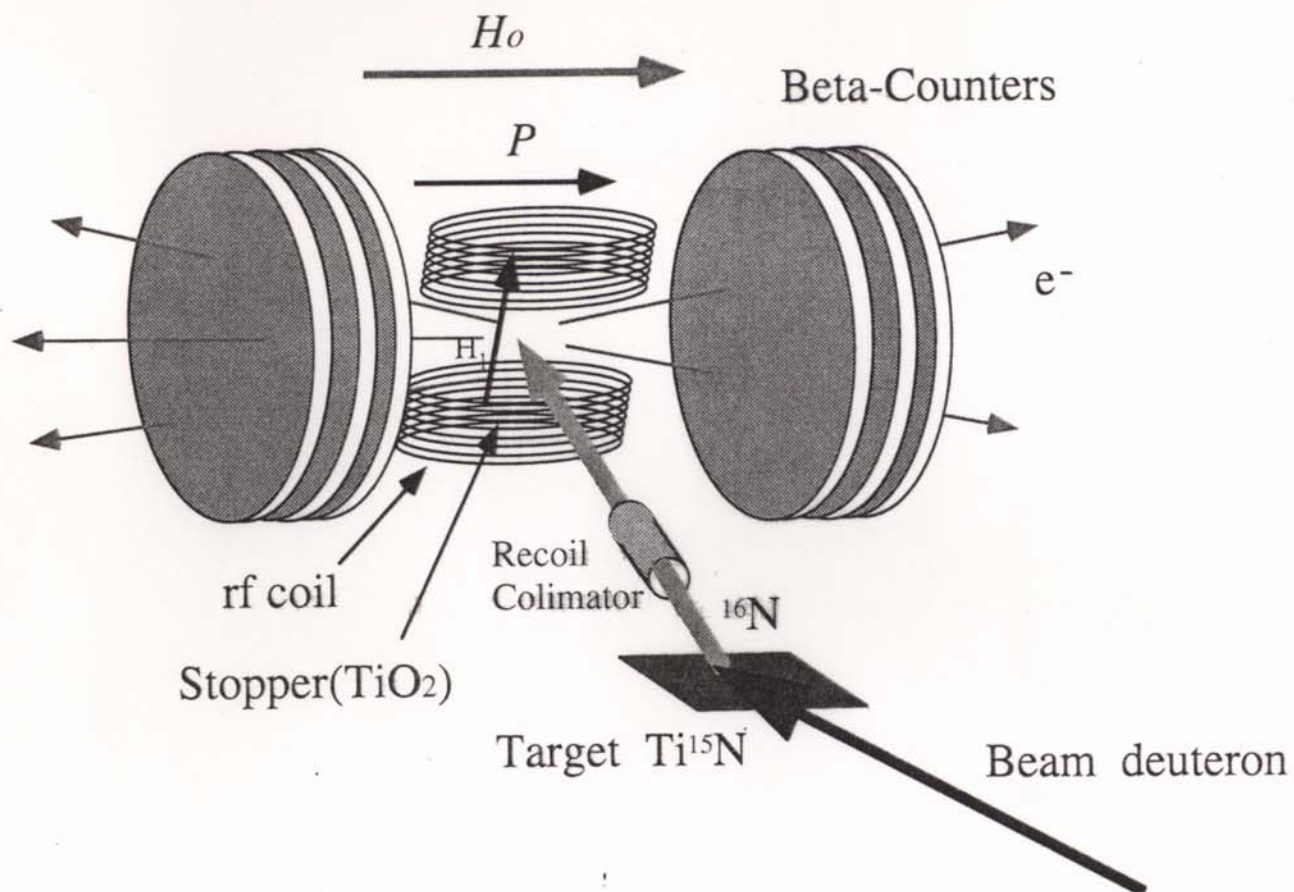
; 不純物の動的挙動

; 欠陥の動的挙動

実験概要

β -NMR 法

- 1) 偏極した不安定核の生成
- 2) 不安定核の植え込みと核偏極の保持
- 3) 核偏極の検出
- 4) 核スピン操作



実験条件

生成核 $^{16}\text{N} (I\pi=2^-, T_{1/2}=7.13(2)\text{sec})$

核反応 $^{15}\text{N}(d,p)^{16}\text{N}$

ビーム deuteron 2.5(MeV)

反跳角度 $30 \pm 8^\circ$

外部磁場 7(kOe)

分離同位元素を使う特徴

核スピンと放射線 (γ , β 線) との相関を取る。

相関型の研究

その特長：

放射線で検出するから

感度が高い (Analyzing power 大きい ≈ 1): 稀薄な純物

検出が容易である。簡単に作れる。 $n < 10^{12}/\text{cm}^3$

強制極化: 不純物・Host 組合せ任意

放射線で偏極を検出するための核種への要求、

寿命: nano sec $\Leftrightarrow$ 1 μ sec: γ 線検出による。

寿命: mili sec $\Leftrightarrow$ 100 sec: β 線検出による。

↑

↑

摂動検出 スピン偏極保持

β 線エネルギー、数 MeV 以上、

偏極又は整列を生成できる; P , $A \approx$ 数% 以上。

植え込み深さ

$\sim 1 \text{ MeV/A}$ ($A < 40$) depth. $< 2 \mu\text{m}$

$\sim 50 \text{ keV/A}$ ($A < 40$) depth. $\sim 1500 \pm 700 \text{ Angstrom}$

$\sim 100 \text{ MeV/A}$ depth. $\sim 1 \text{ mm}$

ハンデ

Isolde

今回

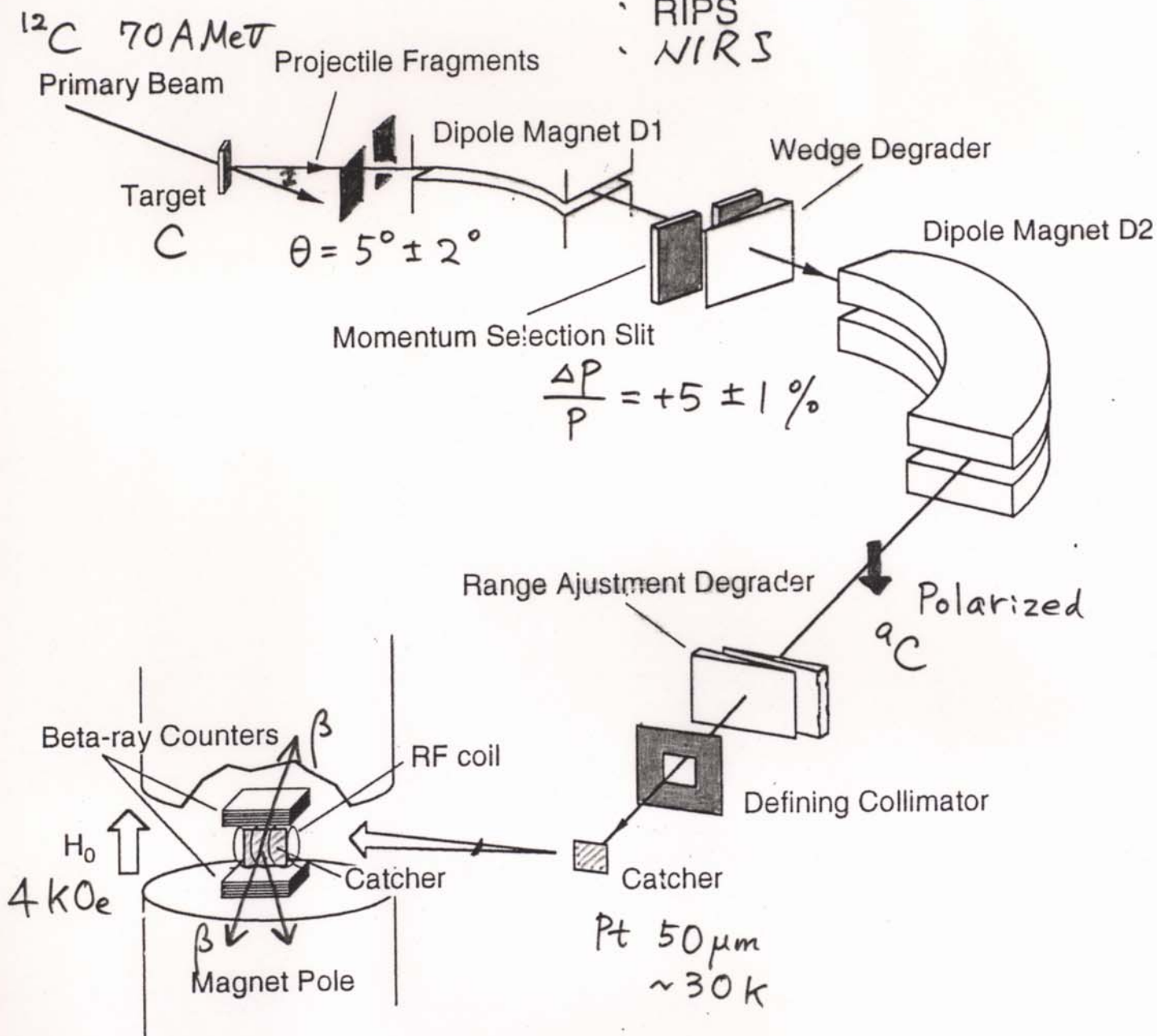
注意点: 結晶表面、真空、温度、

高電圧実験台 (H. V. Platform; 100 kV?) !

Deep Implantation 必要なとき

Deep Impl. に最適

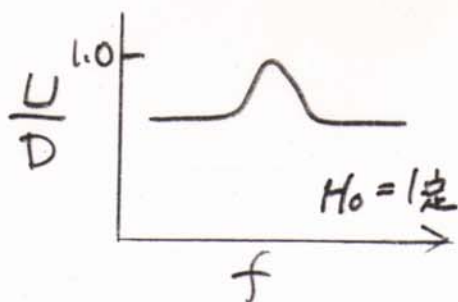
- BEVALAC
- RIPS
- NIRS



$$W(\theta) \propto 1 + AP \cos \theta$$

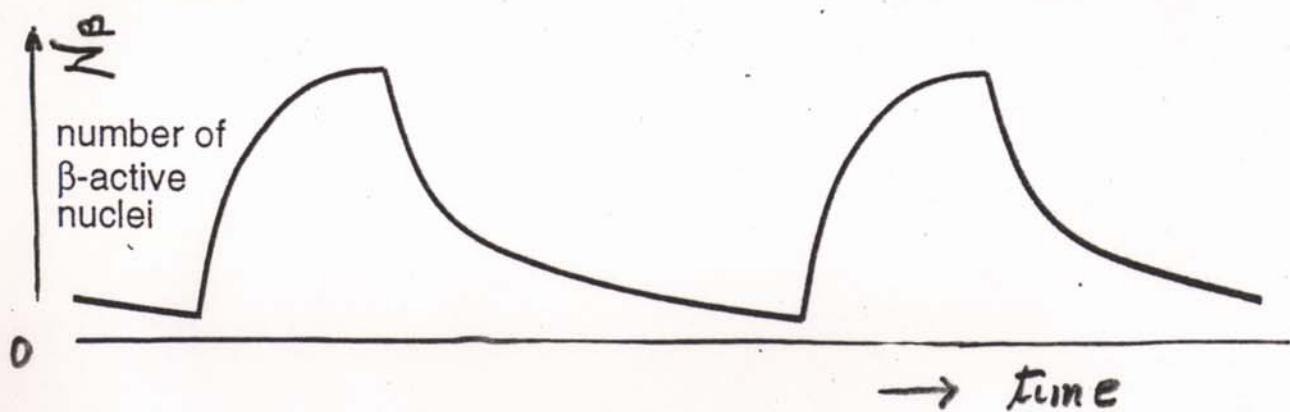
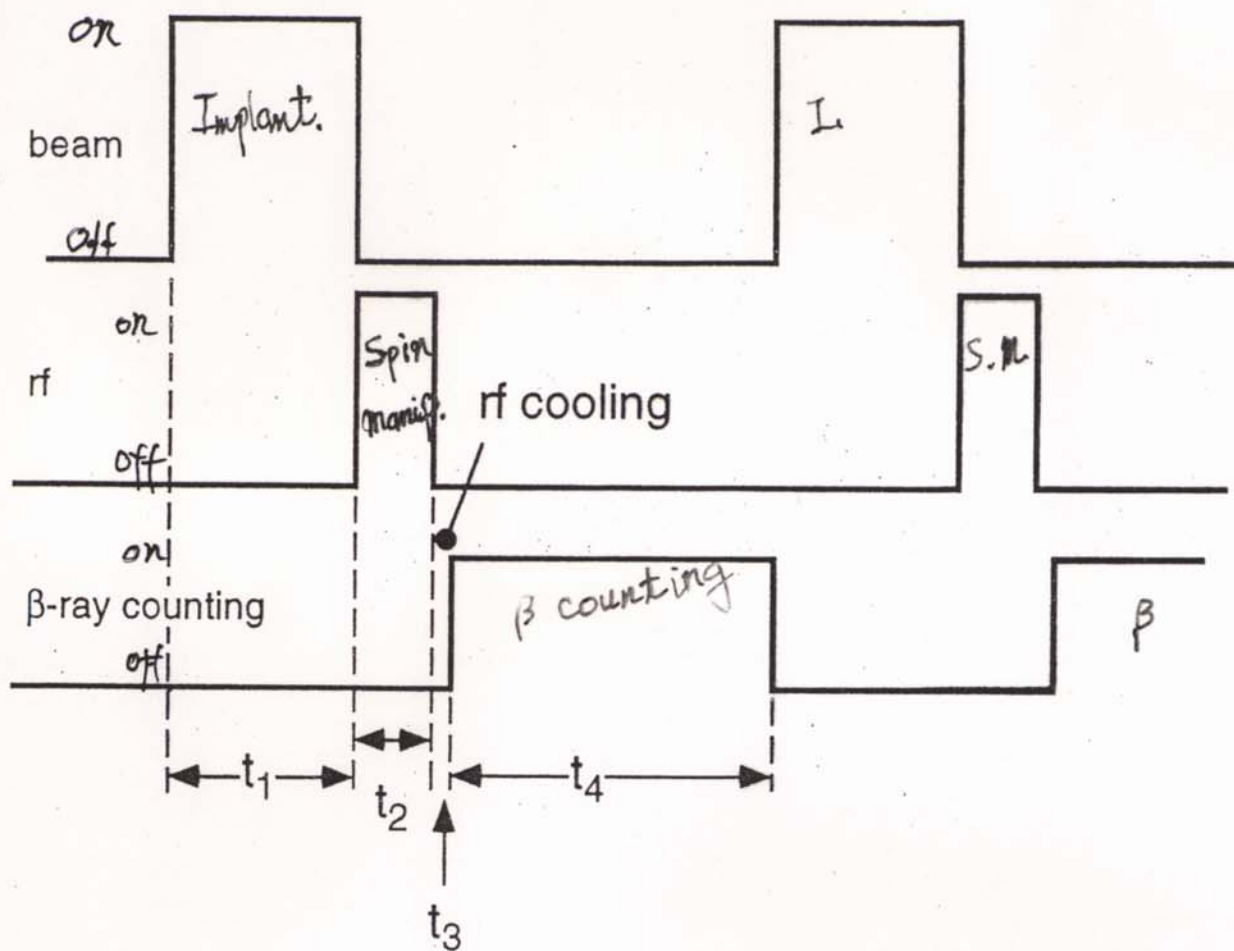
β -NMR

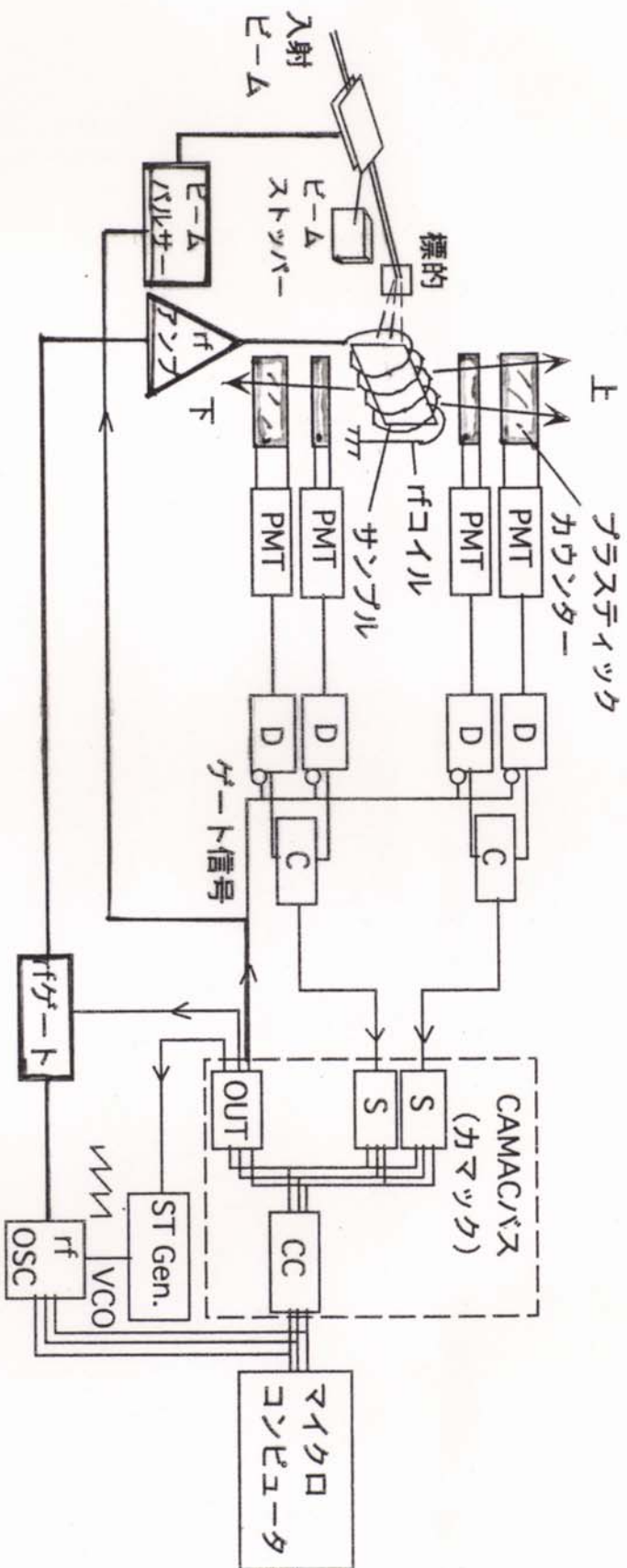
μ
 δ
 T_i



Pulsed Beam Technique

Time sequence program for the β -NMR detection.





PMT: 光電子増倍管 D: デイスクリミネータ C: コインシデンス
 S: スケーラー OUT: ビット出力ポート CC: CAMACコントローラ
 ST Gen.: 鋸歯状波発生器 rf OSC: 高周波発振器

表 1. β -Emitters used for β -NMR

I^π	$T_{1/2}$	Reaction	$\mu(\mu_N)$ & $Q(\text{mb})$	Sample
^8Li 2^+	0.84s	$^7\text{Li}(\text{d,p}), ^7\text{Li}(\text{d,p})$	$\mu = +1.65335, Q = 32.7(6)$	Li, LiF, LiIO ₃ , LiNbO ₃ , LiIO ₃
^8B 2^+	0.56s	$^6\text{Li}(\tau, n)$	$\mu = 1.0355(3), Q = 68.3(21)$	Pt, Mg(x), BN(X)
^{12}B 1^+	21ms	$^{11}\text{B}(\text{d,p})$ $^{11}\text{B}(\vec{d}, p)$	$\mu = 1.00306(15), Q = 13.20(25)$	Pt, Mg(X), BN(X), fcc & bcc M.
^{12}C $3/2^-$	126 ms	$^{12}\text{C}(\text{p.f.})$	$\mu = 1.3914(5), Q =$	Pt,
^{12}N 1^+	11ms	$^{10}\text{B}(\tau, n)$	$\mu = 0.4573(5), Q = 10.3(7)$	Pt, Mg(x), BN(X), fcc & bcc M., GaN
^{16}N 2^-	7.1s	$^{15}\text{N}(\text{d,p})$	$\mu = 2.049(6), Q = 20(3)$	TiO ₂ , GaN, TiO ₂
^{13}O $3/2^-$	8.6ms	$^{16}\text{O}(\text{p.f.})$	$\mu = 1.3891(3), Q = 11.0(1.3)$	Pt, TiO ₂
^{15}O $1/2^-$	122s	$^{14}\text{N}(\text{d,n})$	$\mu = 0.71951(12)$	TiO ₂
^{19}O $5/2^+$	27s	$^{18}\text{O}(\text{d,p})$	$\mu = 1.53195(7), Q = 3.7(4)$	Pt, TiO ₂
^{17}F $5/2^+$	66s	$^{16}\text{O}(\text{d,n})$	$\mu = 4.72130(25), Q = 100(20)$	NaF(X), CaF ₂ (X), MgF ₂ (X)
^{20}F 2^+	11.0s	$^{19}\text{F}(\text{d,p})$	$\mu = +2.0935(9), Q = 64(2)$	NaF(X), CaF ₂ (X), MgF ₂ (X)
^{21}F $5/2^+$	4.158s	$^{22}\text{Ne}(\text{p.f.})$	$\mu = 3.9304(30), Q = 178(10)$	NaF(X), CaF ₂ (X), MgF ₂ (X)
^{23}Mg $3/2^+$	11s	$^{24}\text{Mg}(\text{p.f.})$	$\mu = 0.5364(3), Q =$	Pt, MgF ₂ (X)
^{25}Al $5/2^+$	4.8s	$^{28}\text{Si}(\vec{p}, \alpha)$	$\mu = 3.6455(12), Q =$	Si(X)
^{28}Al 3^+	134s	$^{27}\text{Al}(\vec{n}, \gamma), ^{27}\text{Al}(\text{d,p})$	$\mu = 2.791(1), Q =$	AlP(X), Li(dynamic pol.)
^{27}Si $5/2^+$	4.1s	$^{27}\text{Al}(\vec{p}, n), ^{28}\text{Si}(\text{p.f.})$	$\mu = 0.8653(3), Q = 63(14)$	Pt, Sapphire(X)
^{29}P $1/2^+$	4.2s	$^{28}\text{Si}(\text{d}\&\text{d}, n)$	$\mu = 1.2349(3)$	Si(X), Red P
^{31}S $1/2^+$	2.6s	$^{31}\text{P}(\vec{p}, n)$	$\mu = 0.48793(8)$	Red P, P ₄ S ₇
^{35}Ar $3/2^+$	1.775s	$^{40}\text{Ca}(\text{p.f.})$	$\mu = +0.6331(6), Q =$	KBr
^{37}K $7/2^-$	1.23s	$^{40}\text{Ca}(\text{p.f.})$	$\mu = +0.20321(6), Q =$	KBr
^{39}Ca $3/2^+$	0.6s	$^{39}\text{K}(\vec{p}, n), ^{40}\text{Ca}(\text{p.f.})$	$\mu = 1.02168(12), Q = 36(7)$	KBr, KCaBr ₃ , CaCO ₃
^{41}Sc $7/2^-$	0.54s	$^{40}\text{Ca}(\text{d,n})$	$\mu = 0.54305(18), Q = 150(1)$	CaO(X), Pt(4.2K), TiO ₂
^{43}Ti $7/2^-$	0.85s	$^{46}\text{Ti}(\text{p.f.})$	$\mu = 0.85(2), Q =$	Pt

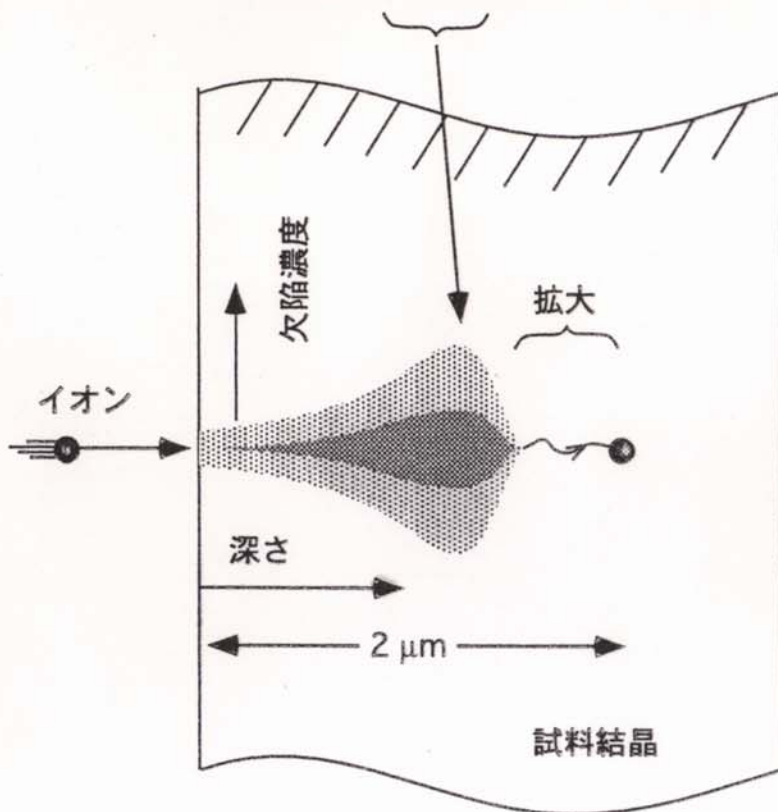
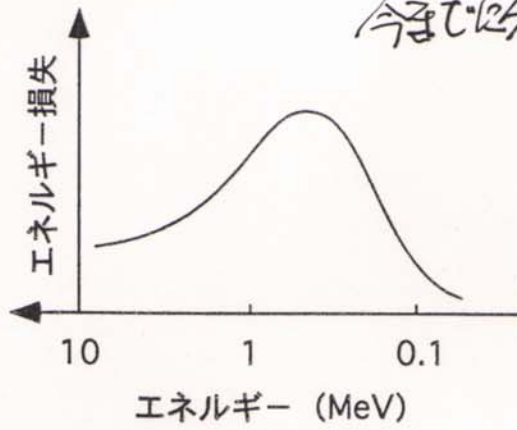
→ pol. beams

Projectile Fragmentation processTISOL at TRIUMF } : TARGET FRAGMENTS
E-ARENA+
LASER Ind. Spin Pol.

有用: 主に元素

↓ Fe, Ni までは欲しい!

今更に分、止事・停止位置近傍の振舞い。



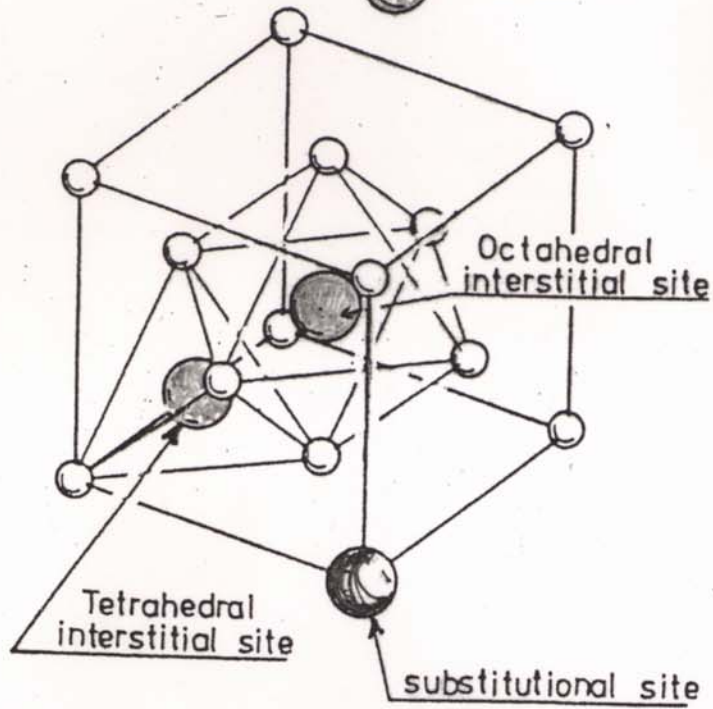
核 スピンで見る。

μHe^+ , μH_f , e^+Q
 $g_L + g_d$

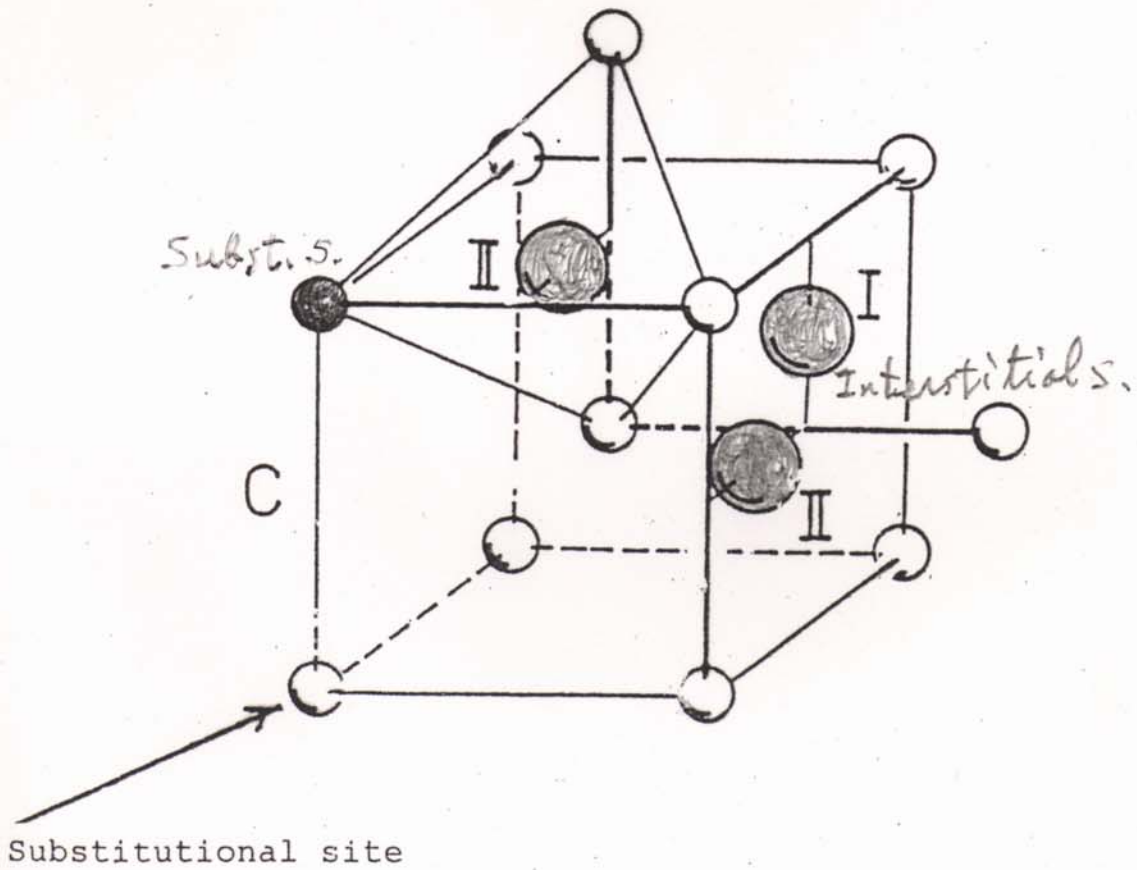
ポテンシャル最深の位置に
fcc Metal

○ : Host
● : Impurity

結晶



bcc Metal

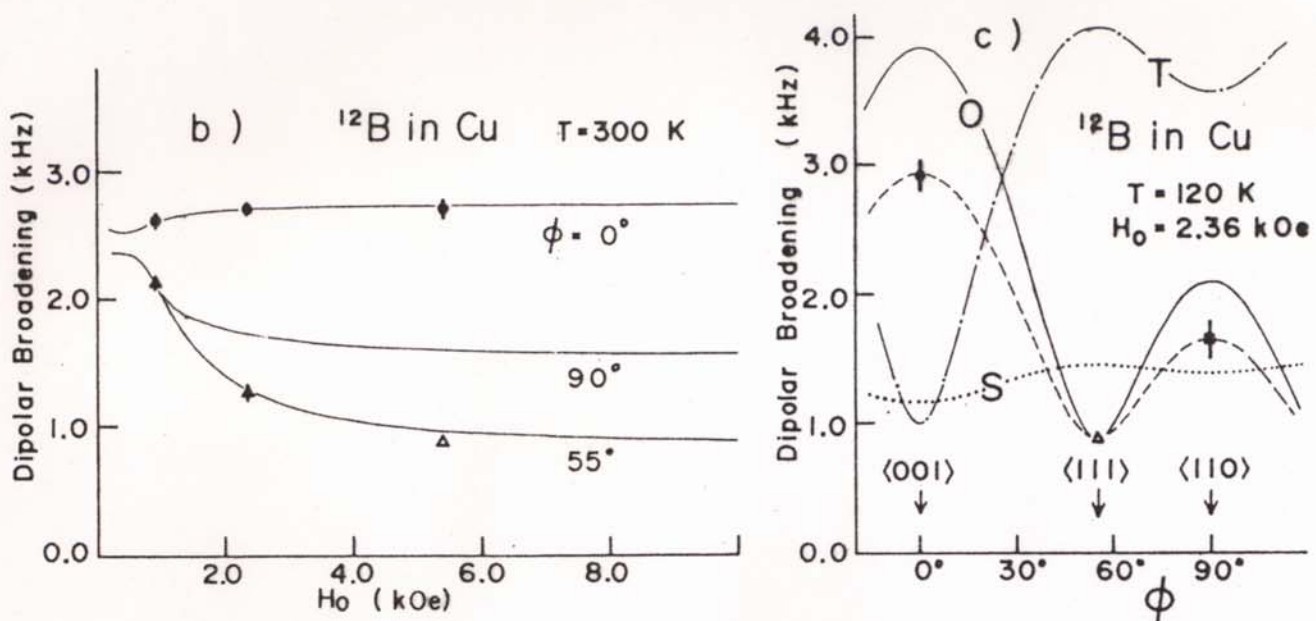


117-
25
92

決定方法：・・・双極子幅 $f(H \angle c \text{ axis}, H) \propto \delta(\theta, H)$

・・・核四重極分離 $f(H \angle q)$ と双極子幅(二量子吸収) $\nu_q(\theta)$

双極子相互作用、 $(2\pi\sigma_{VV})^2 = \gamma_I^2 \gamma_S^2 \hbar^2 S(S+1) \sum_i (3 \cos^2 \alpha_i - 1)^2 / 3r_i^6$,



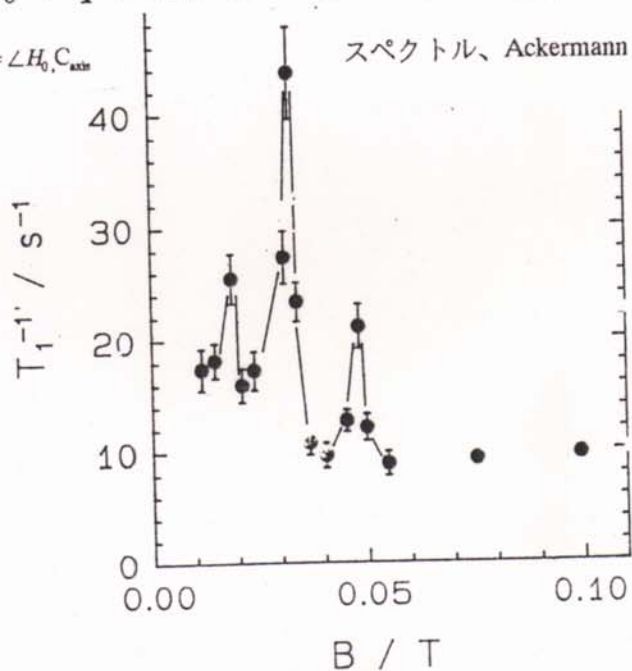
・・・Spin diffusion 法

H_0 と埋込核による $q_{\text{host}} \Rightarrow$ host 核のエネルギー順位と

$\downarrow \uparrow$ 等しい時スピン交換

埋込核自身の $H_0 + q$ によるエネルギー順位

観測； $P^{\text{AV}}(H_0, \theta)$ 、 $\theta = \angle H_0, C_{\text{axis}}$



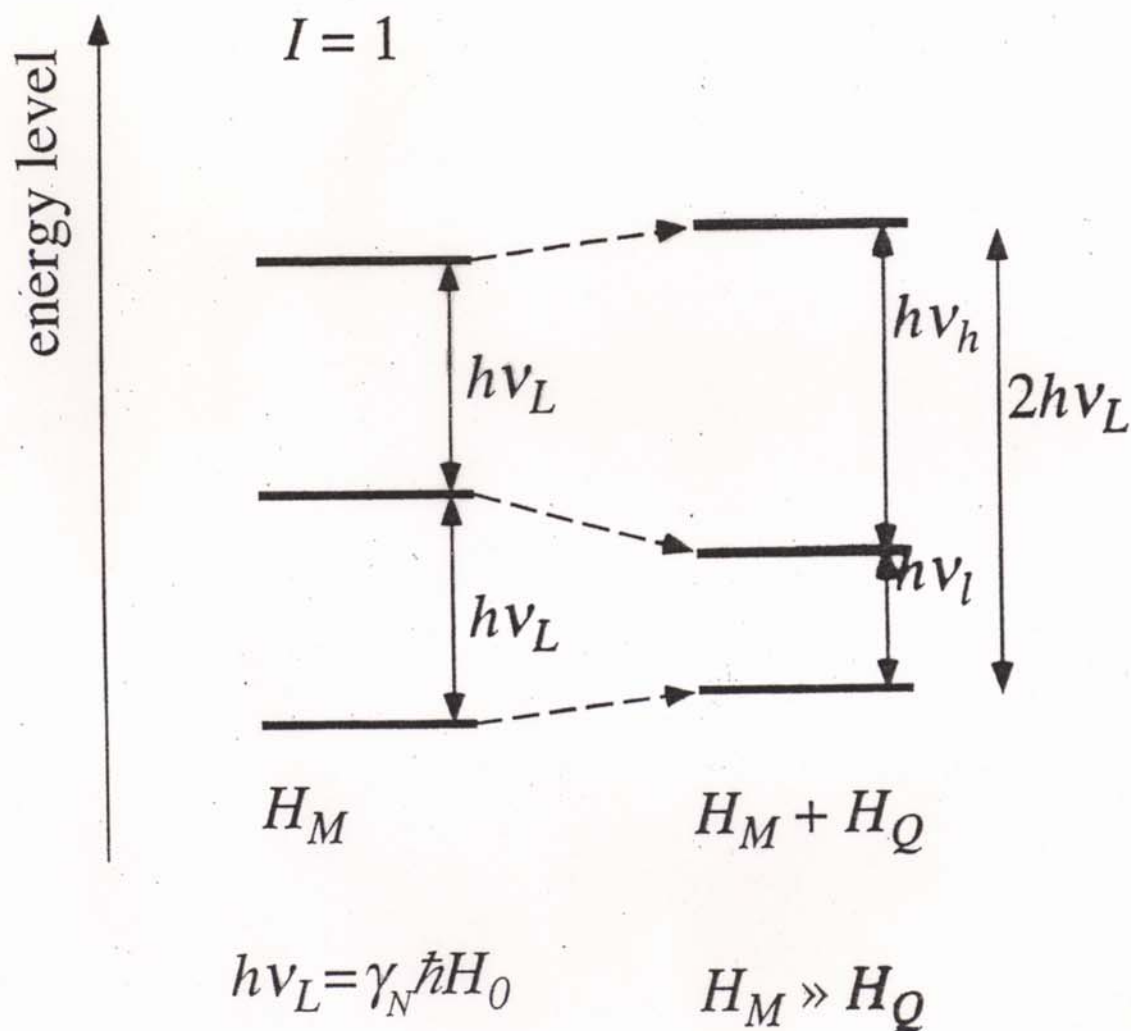
NMR (nuclear magnetic resonance)

magnetic interaction

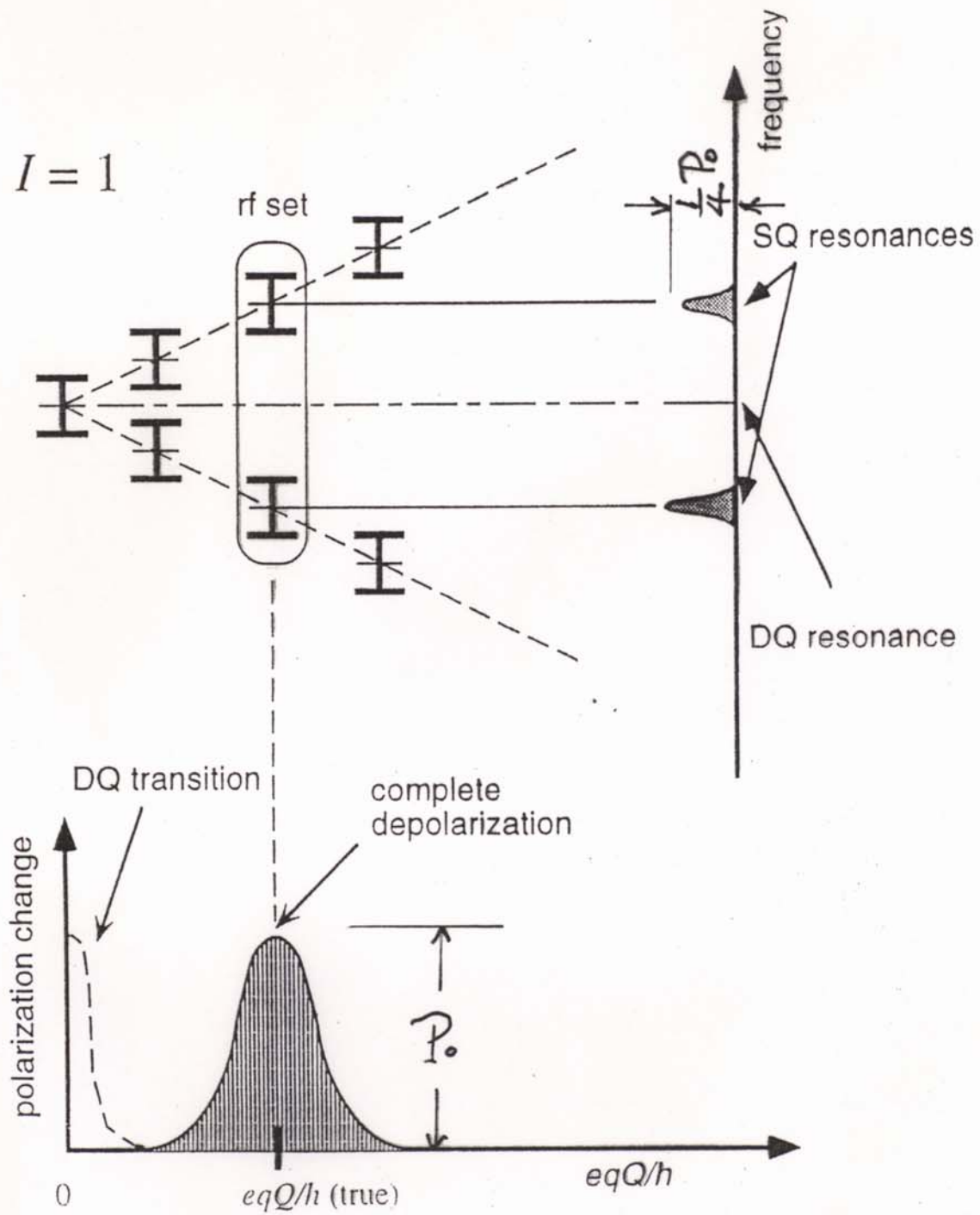
$$H_M = -\vec{\mu} \cdot \vec{H}_0$$

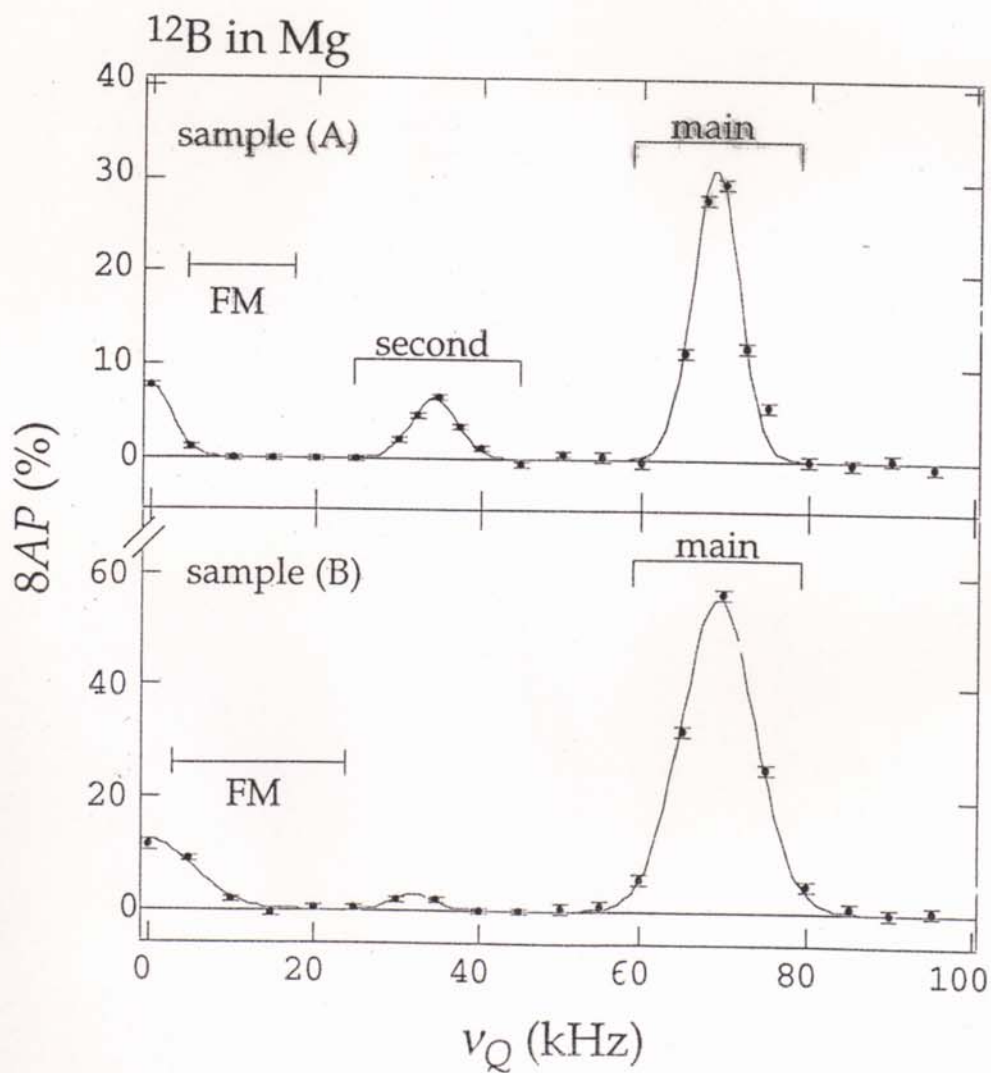
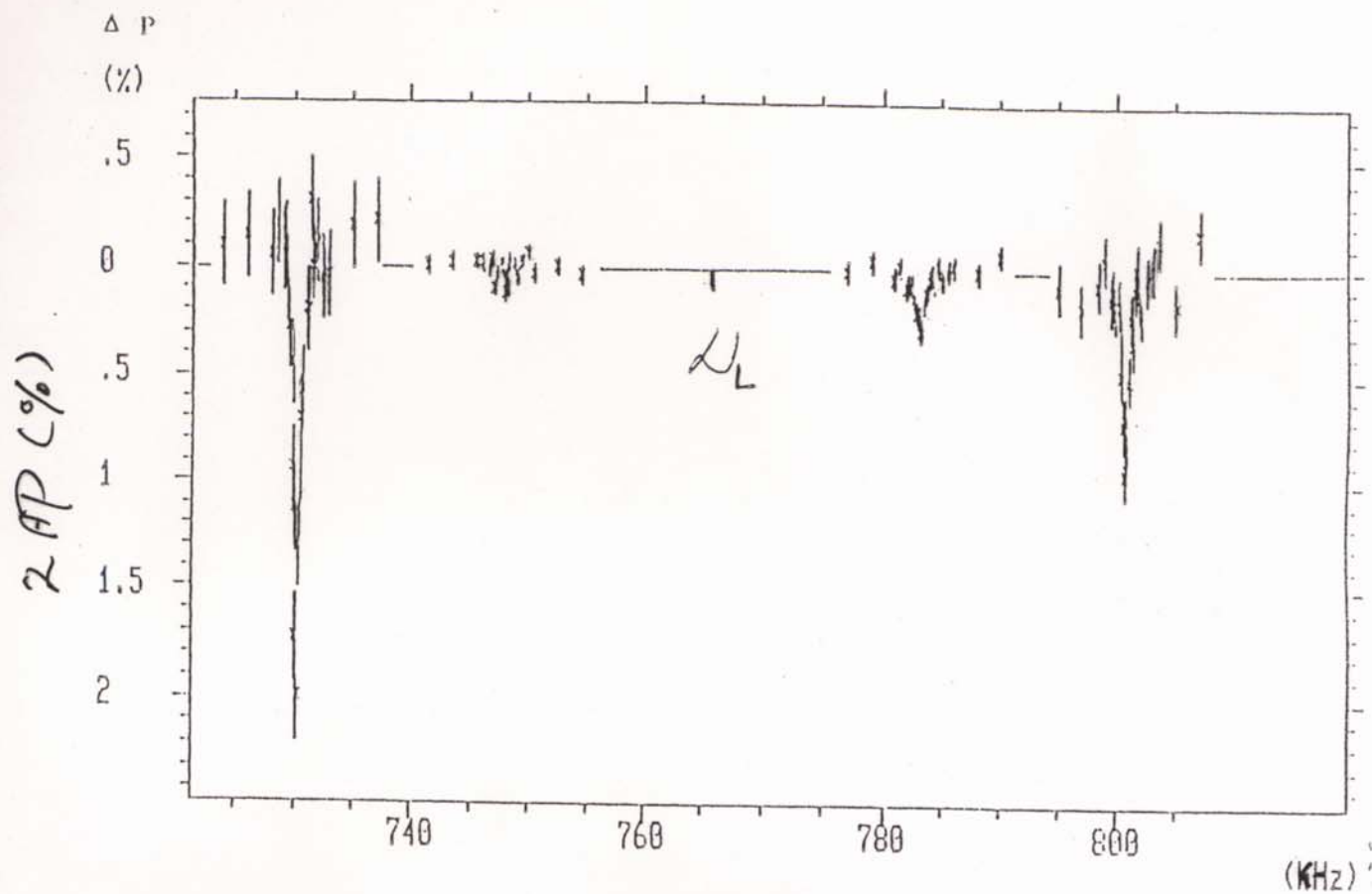
electric quadrupole interaction

$$H_Q = \frac{eqQ}{4I(2I-1)} \left\{ 3I_z^2 - I(I+1) + \frac{\eta}{2}(I_+^2 + I_-^2) \right\}$$



^{β} NNQR (^{β} New Nuclear Quadrupole Resonance) method





New Nuclear
Quadrupole Res.

Location of ^{12}B and ^{12}N in Metal Crystals

Host	Location	^{12}B		^{12}N	
		Popul.	($\Delta a/a$)	Popul.	($\Delta a/a$)
Cu (fcc)	Interstitial Octah.	85 %	<u>0.11(2)</u>	100	<u>0.13(6)</u>
	Tetrah.	≤ 1		≤ 1	
	Substitutional	15	<u>0.00(3)</u>	≤ 1	<u>0.00(5)</u>
Ni (fcc)	Interstitial Octah.	85 %		100	Compr. with theor.
	Tetrah.	≤ 1		≤ 1	
	Substitutional	15		≤ 1	
V (bcc)	Interstitial Octah.	$\leq 1\%$		≤ 1	
	Tetrah.	75	<u>0.21(4)</u>	100	<u>0.50(20)</u>
	Substitutional	25	<u>0.00(5)</u>	≤ 1	<u>0.00(5)</u>
Ta (bcc)	Interstitial Octah.				
	Tetrah.	75			
	Substitutional	25			
Fe (bcc)	Interstitial Octah.				From ^{12}B in V
	Tetrah.	80		**	Two Loc. Found
	Substitutional	20		**	
Mg (hcp)	Interstitial				
	Center of Prism	100(5)		100(5)	
	Substitutional	≤ 1		≤ 1	

3. Dynamics of Implanted Light Ions in Crystals

- ^{12}B in Si Crystal -

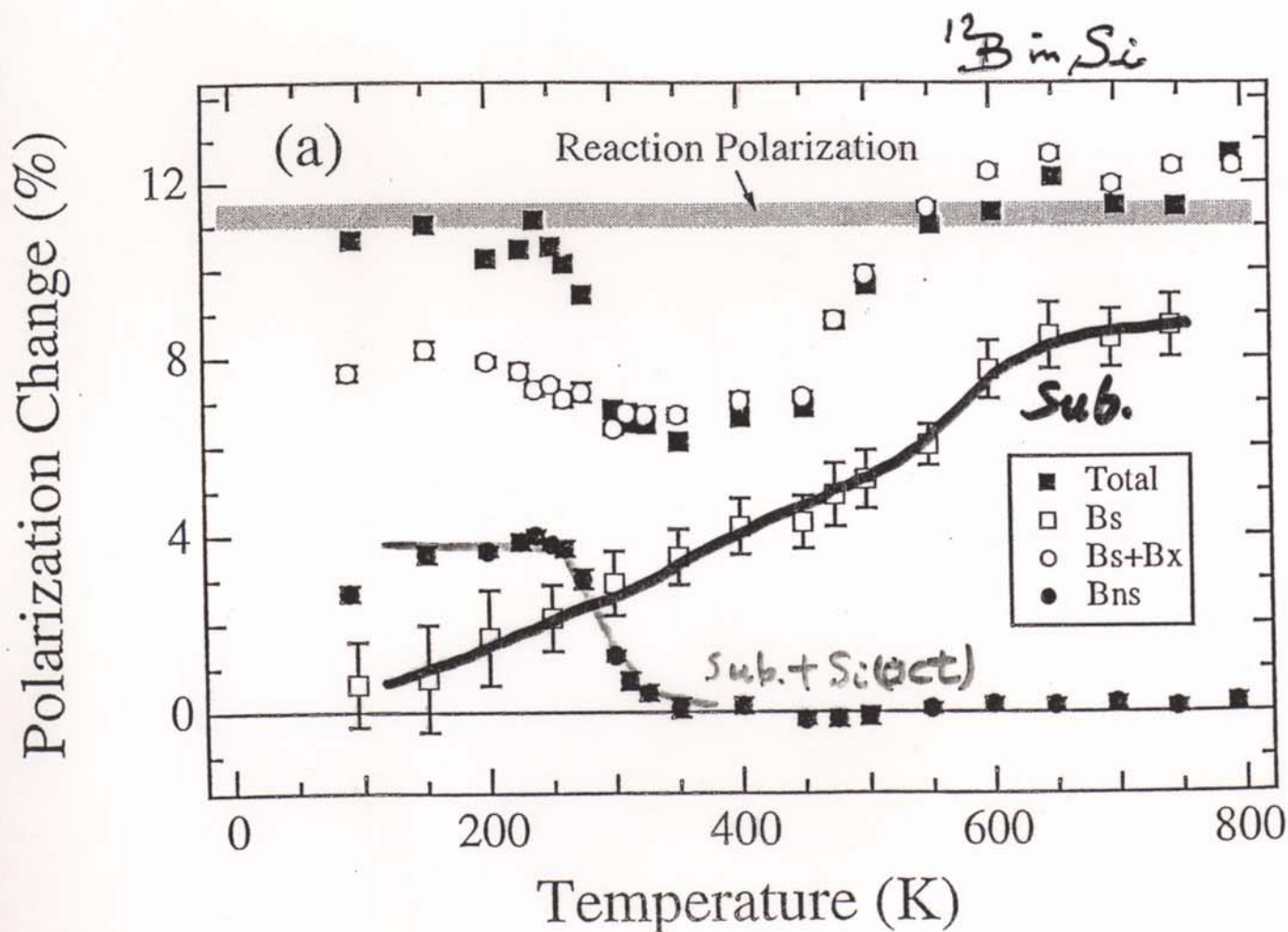
T. Izumikawa; Thesis, March 1999 (Osaka U.)

Location: Interstitial

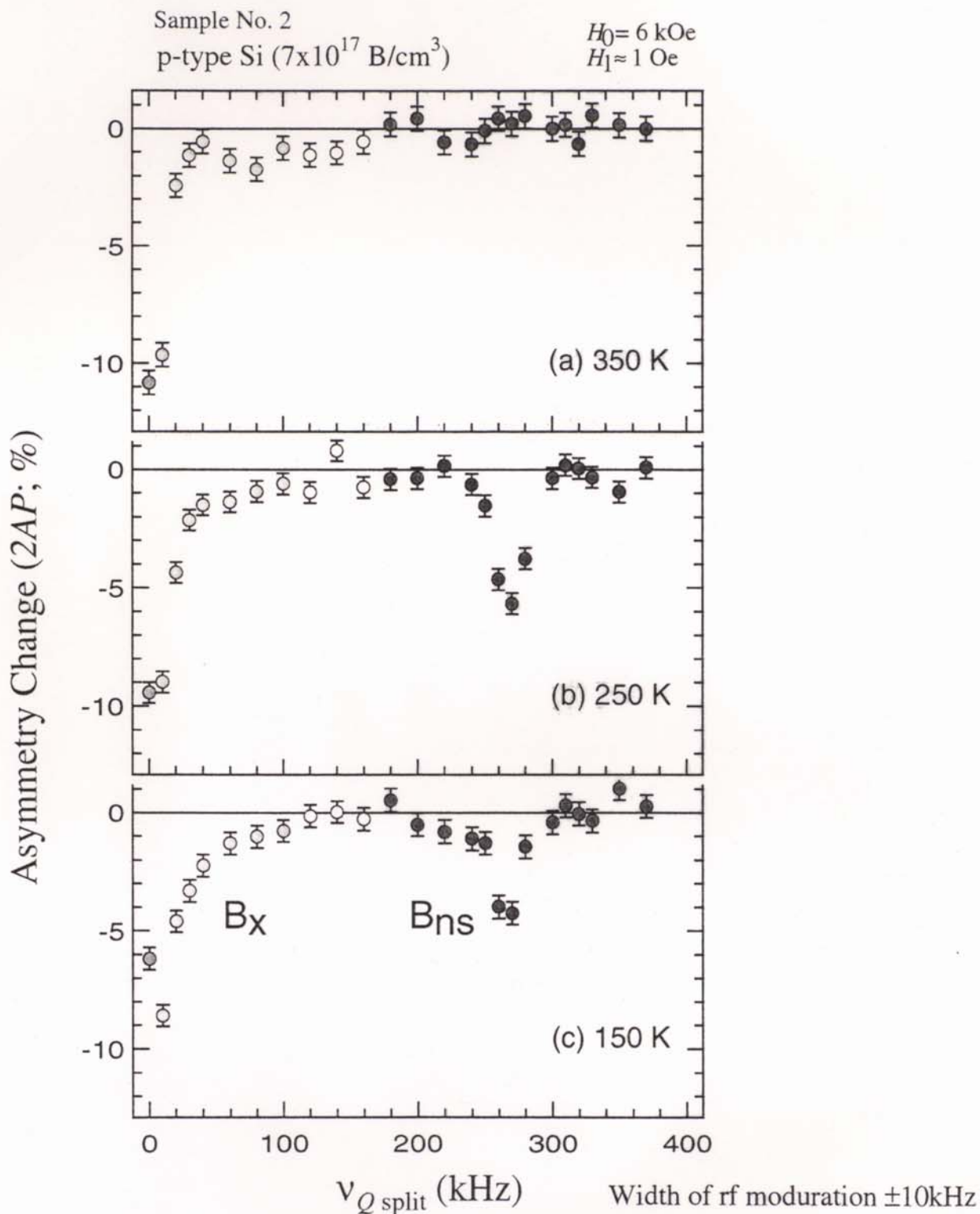
Substitutional

Other?

偏極緩和現象と ^{12}B の運動



β -NQR Spectrum



3 resonance were observed

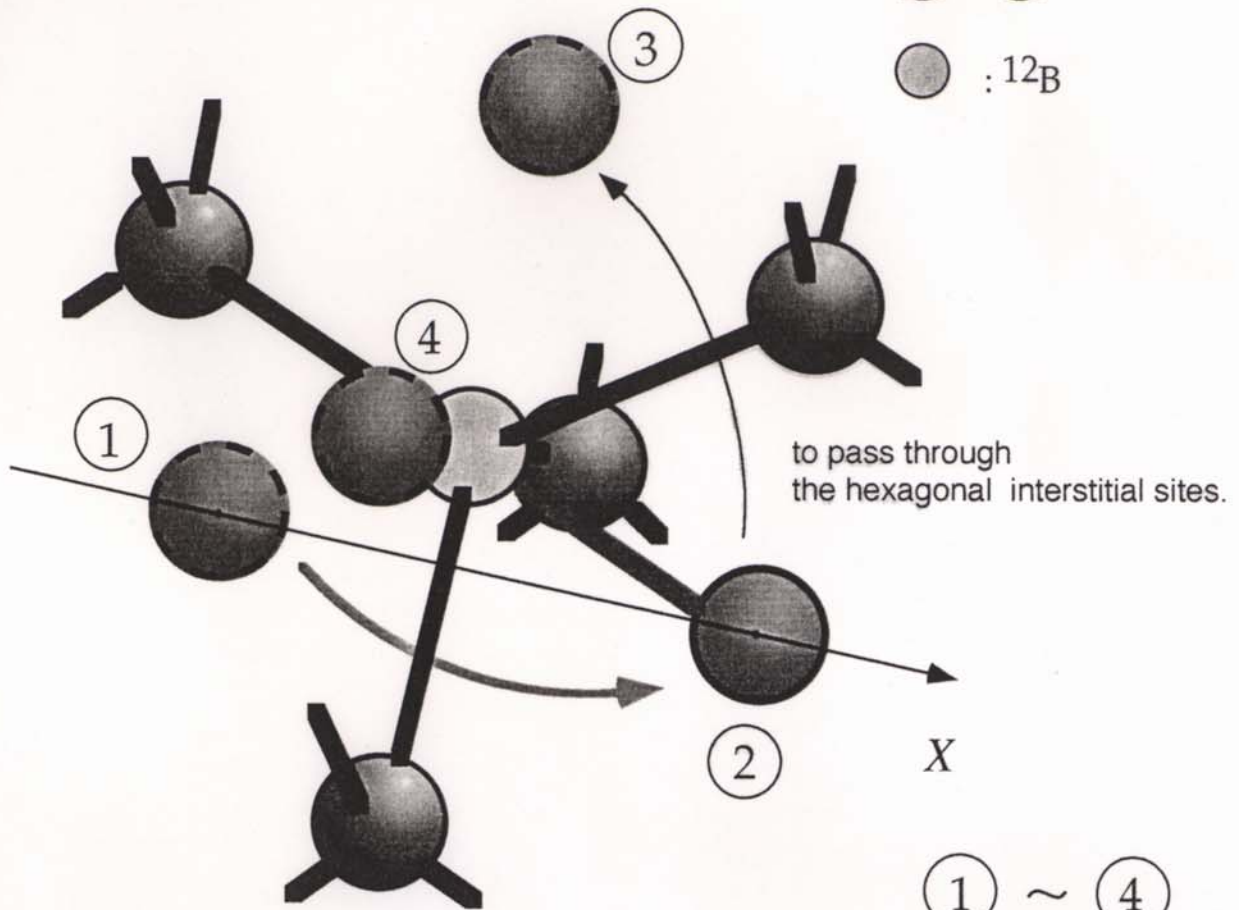
- 1 eqQ split resonance at $\nu_{Q \text{ split}} = 270$ kHz (B_{ns})
- 2 Sharp resonance at ν_L (B_s) $\delta \sim 0.1$ kHz
- 3 Broad resonance at ν_L (B_x) ~ 40 kHz

看
2000
B
SS

The Atomic Jump of B_{ns}

18

● ● Si
● : ¹²B



$$\text{Jumping Rate } \nu = \nu_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right)$$

① ~ ④
identical sites

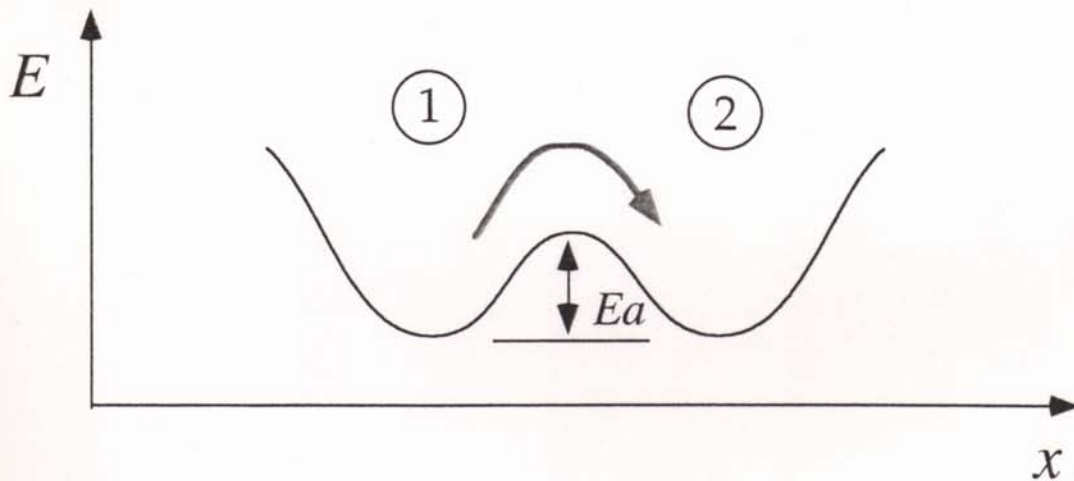


Table 1 Hyperfine magnetic fields in Fe detected by ^{12}B

Location	Theory*		Experiment**				B_{dip}
	$B_{\text{hf}}, T_1 \cdot T$		$B_{\text{hf}}(\text{kG})$	$T_1 \cdot T(\text{Ks})$	$T(\text{K})$		
Substitutional	-0.56	<u>430</u> B_{dip}	$-(6.86 \pm 0.01)$	<u>86</u> ± 5	103		
Tetrahedral	-50.7	<u>1200</u> $\sim 2\text{kG}$	$-(46.82 \pm 0.01)$	<u>43</u> ± 2	92		$< 0.1\text{kG}$
Octahedral	-40.5						

* M.Akai, H.Akai and J.Kanamori; J. Phys.Soc. Japan 54(1985)4246; ibid. 54(1985)4257.

** Locations were inferred from a comparison of the results of ^{12}B in V crystal with the present populations to respective locations.

$$B_{\text{obs}} = B_{\text{ext}} + B_L + B_{\text{DM}} + B_{\text{hf}} + B_{\text{dip}} + \omega_Q/7$$

Table I NMR of ^{12}N in Fe and $(B_{\text{hf}} + B_{\text{dip}})$ values.

NMR was performed at $B_0 = 7\text{ kG}$ and 120 K .

	Center freq. (MHz)	$(B_{\text{hf}} + B_{\text{dip}})(\text{kG})$	Sign of B_{obs}	ω_Q/h kHz	B_{dip}
$B_0 // \langle 001 \rangle$	1.50 ± 0.02	$-(9.32 \pm 0.06)$	Positive	~ 400	~ 0
	1.93 ± 0.02				
	4.76 ± 0.05	$-(27.88 \pm 0.17)$ $-(0.60 \pm 0.17)$	Assumed negative Assumed positive		$\sim 22\text{ kG}$
$B_0 // \langle 011 \rangle$	1.40 ± 0.05	$-(9.50 \pm 0.11)$	Positive		
	1.90 ± 0.05				
	3.78 ± 0.04	$-(25.09 \pm 0.14)$ $-(3.39 \pm 0.14)$	Assumed negative Assumed positive		

Theory

B_{hf}	Octahedral } Tetrahedral }	-75 kG	No Lattice expansion
	Substitutional	+50 kG	

Two locations : strange!

1. $B_{\text{dip}} \sim 20$ $\omega_Q = 400\text{ kHz}$
2. $B_{\text{dip}} \neq 0$ $\neq 0$

Hyperfine field Bert * Spin Lattice Relaxation time

J. Kanumori, K. Terakura & H. Yoshida

$$H_{hf} = (8\pi/3)\mu_B (\bar{P}_s^{\uparrow} - \bar{P}_s^{\downarrow}) = 5.242 \times 10^2 (\bar{P}_s^{\uparrow} - \bar{P}_s^{\downarrow}) \text{ kG}$$

$$\bar{P}_s^{\sigma} = \int^{E_F} P_s^{\sigma}(0, E)$$

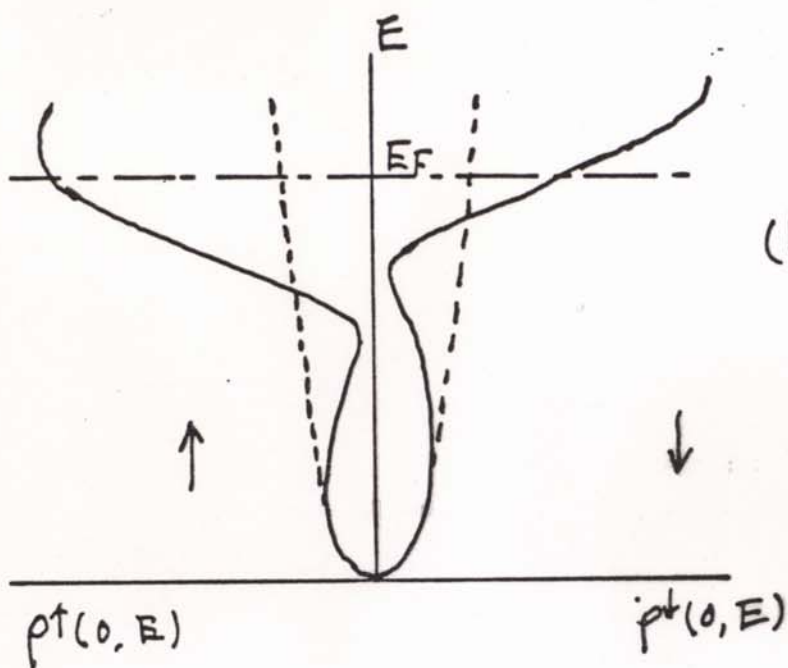
$$T_1 \cdot T = (64\pi^3 k / 9\hbar) (e\hbar / 4\pi m) (\hbar^2)^2 P_s^{\uparrow}(0, E_F) P_s^{\downarrow}(0, E_F)$$

$$= 2.432 \times 10^{-2} (\mu_B)^2 P_s^{\uparrow}(0, E_F) P_s^{\downarrow}(0, E_F) \text{ sec. deg.}$$

J. Phys. Soc. Japan 46 (1979) 822

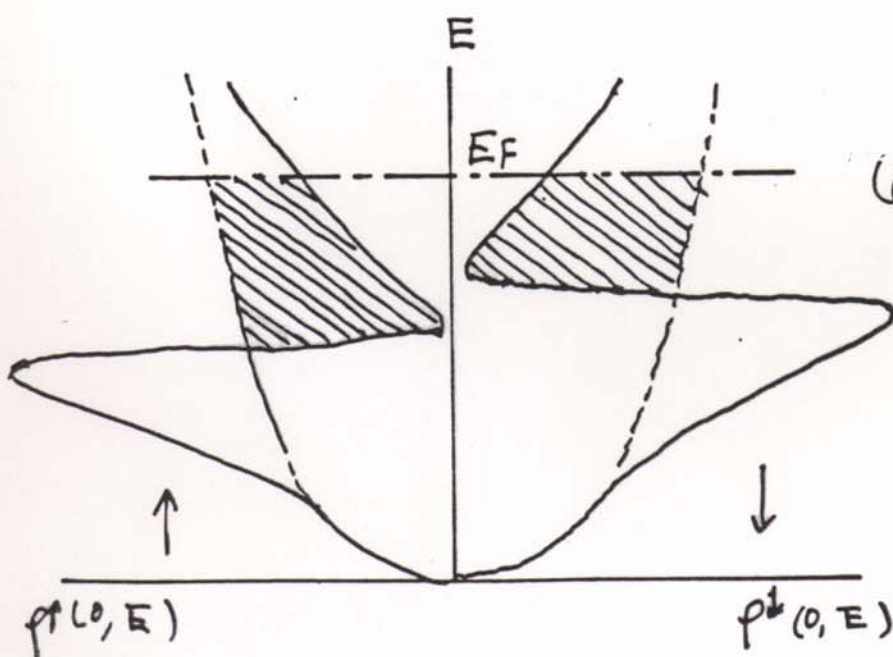
by K. Terakura
ISSP SerA 965

(b) 1979
Shallow impurity



ESSENTIAL 12

S-d Mixing 重要
これを Trigger Ltr!

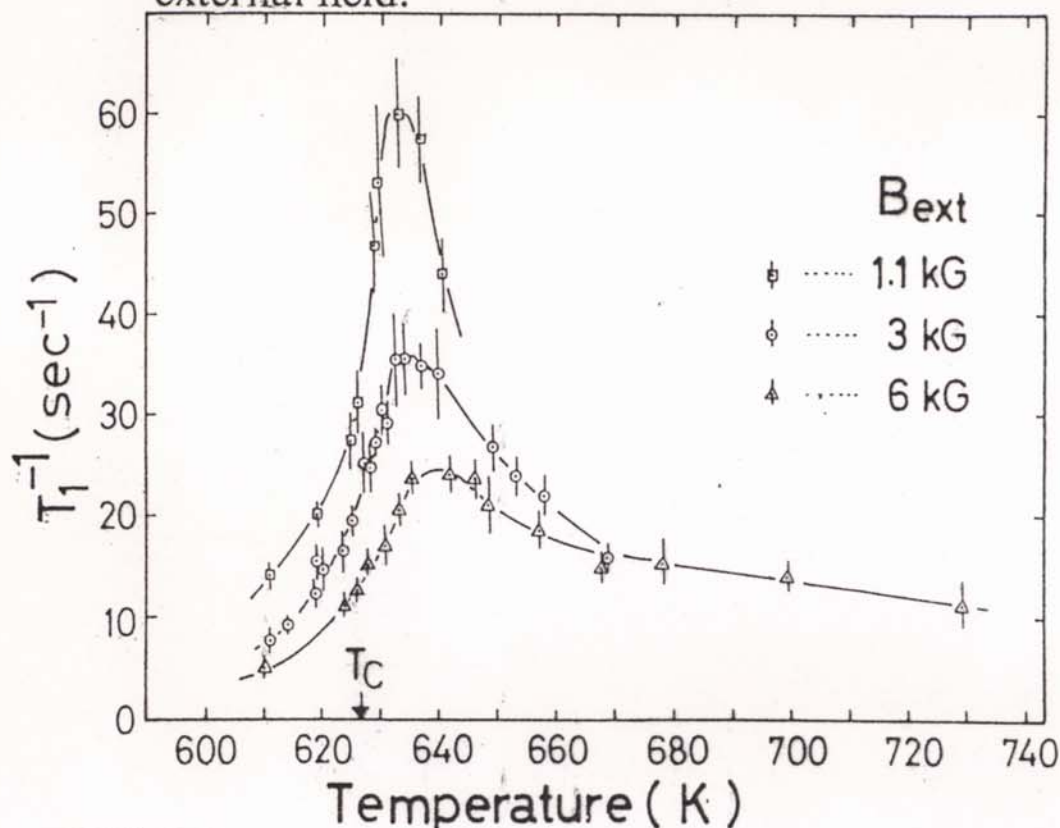


(a) deep impurity

Cf. ^{12}B in Ni; Proof for the Electron itinerancy

Critical Phenomena; $T_1^{-1}(T)$ at T_C with Octah. Location(T) of ^{12}B ;
H. Hamagaki, Y. Nojiri, K. Sugimoto, & K. Nakai; J.P.S.J 47 (1979) 1806

Fig. 10. Spin-lattice relaxation times of ^{12}B at the S^- site around T_C with three different settings of the external field.



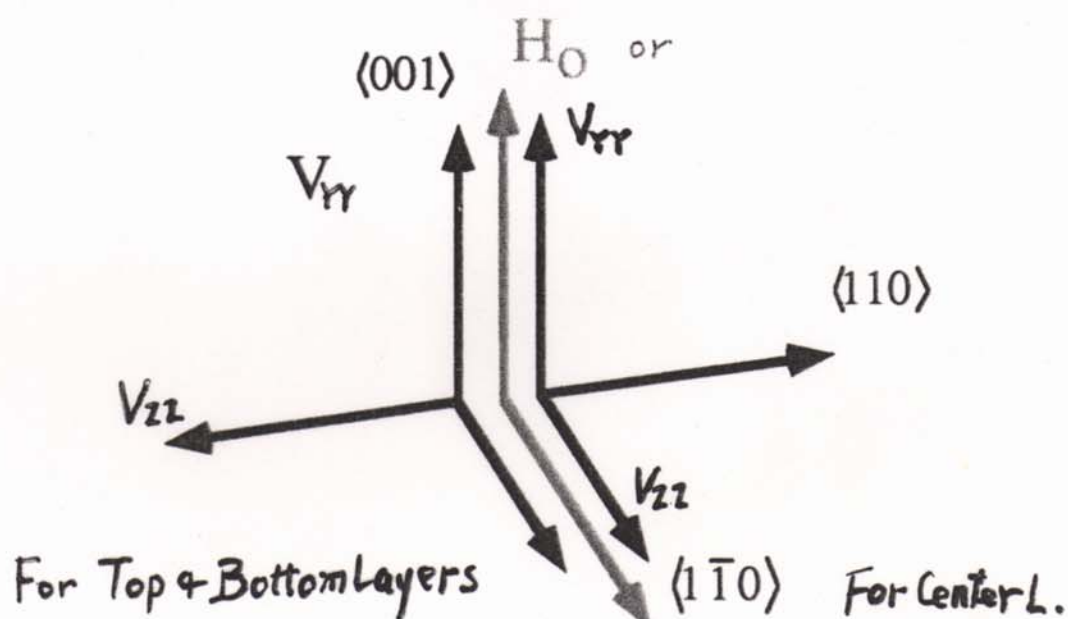
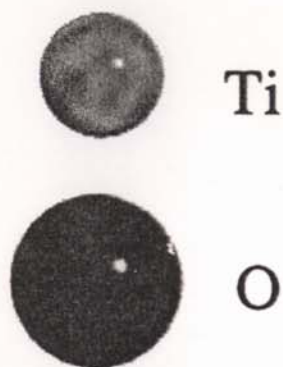
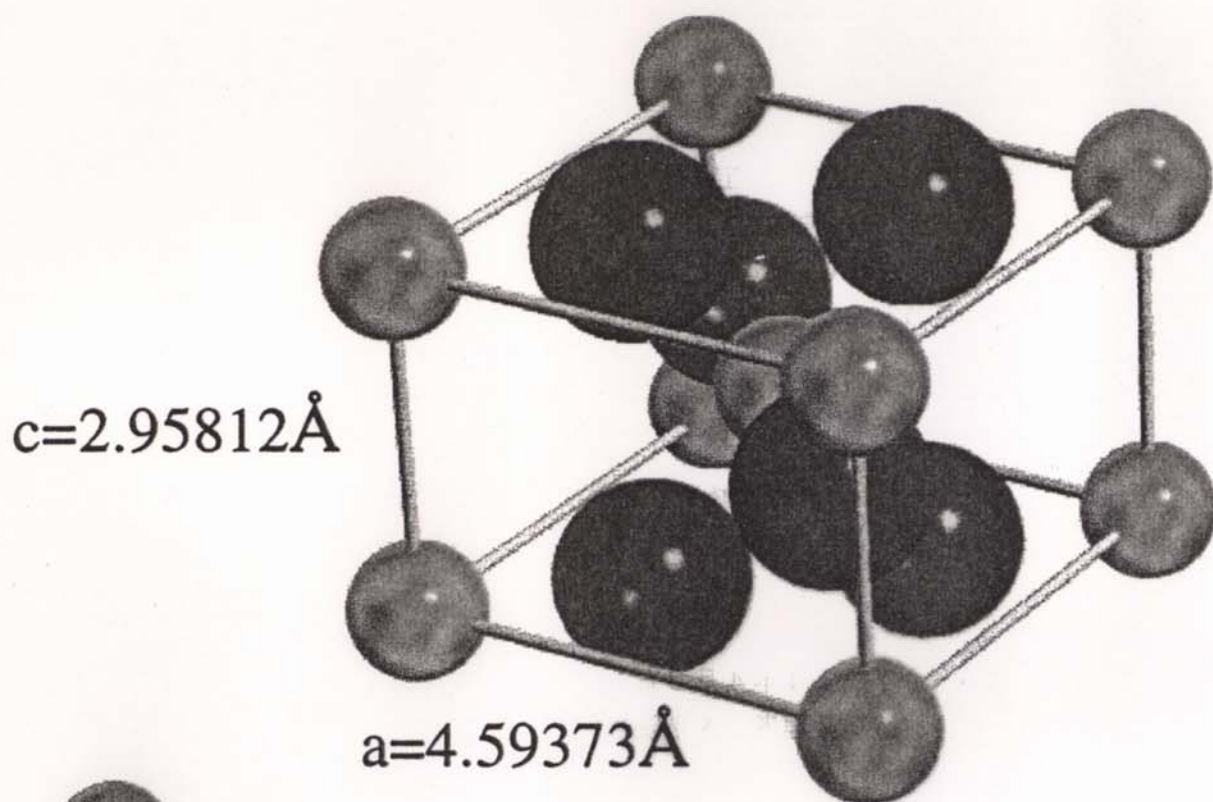
	n	n'	ν	Ref.	Comments
	$\sim 2/3$			27)	Ni, ESR line width
	1.44 ± 0.37			28)	Neutron scattering
	0.70 ± 0.03			29)	Ni^{100}Rh , perturbed angular correlation
	~ 0.7			30)	$\mu^+\text{SR}$ in Ni
	0.71 ± 0.24			31)	Ni^{57}Fe , Mössbauer line width
	0.62 ± 0.13			32)	Fe^{57}Fe , Mössbauer line width
		0.67 ± 0.08		24)	Ni^{61}Ni , NMR
			0.54 ± 0.10	this work	Ni^{12}B , recoil-implanted NMR
Heisenberg (MH) model	1.97		0.34	33)	
Moriya-Kawabata (MK) theory*	1.31	0.77	0.46	36)	

* Developed for weak ferromagnetism in metal.

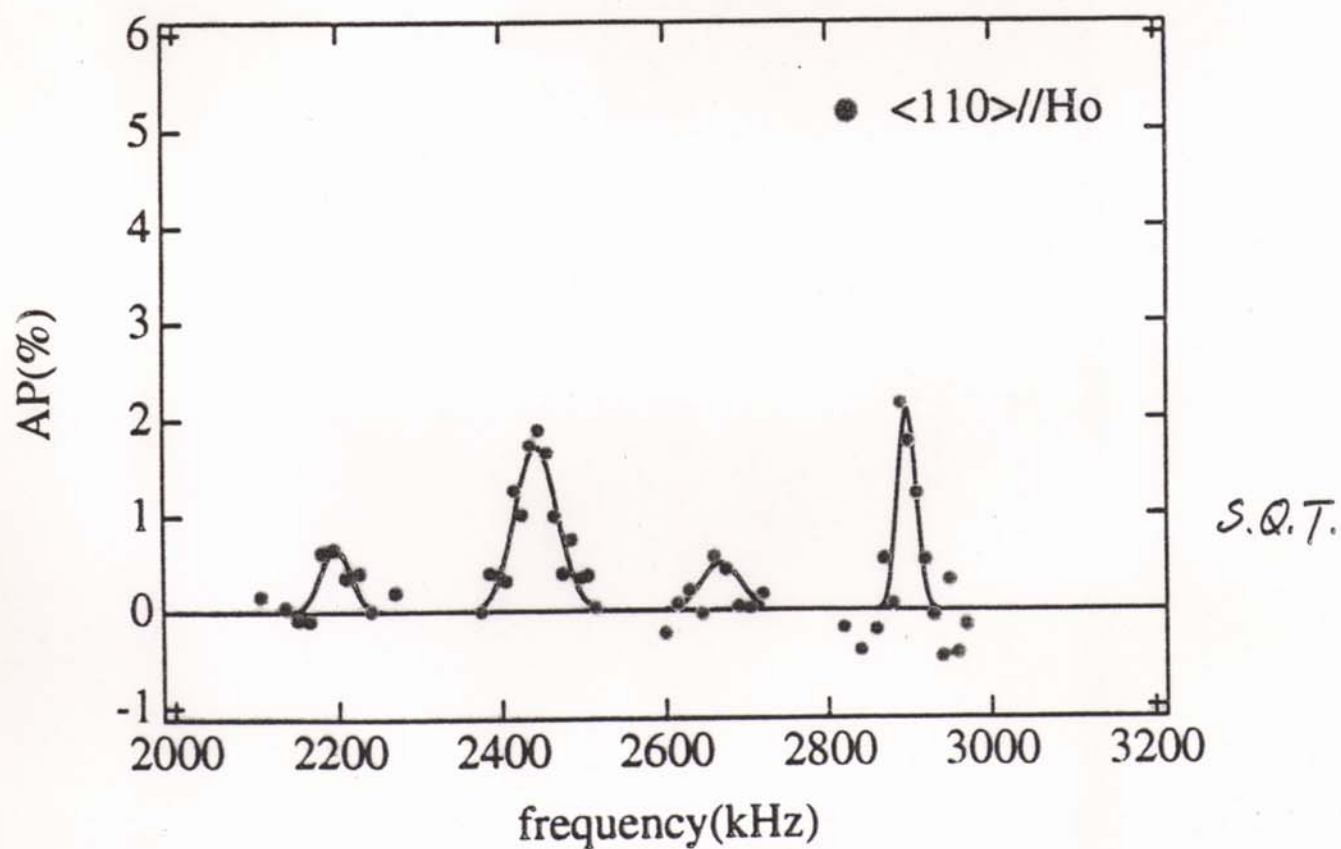
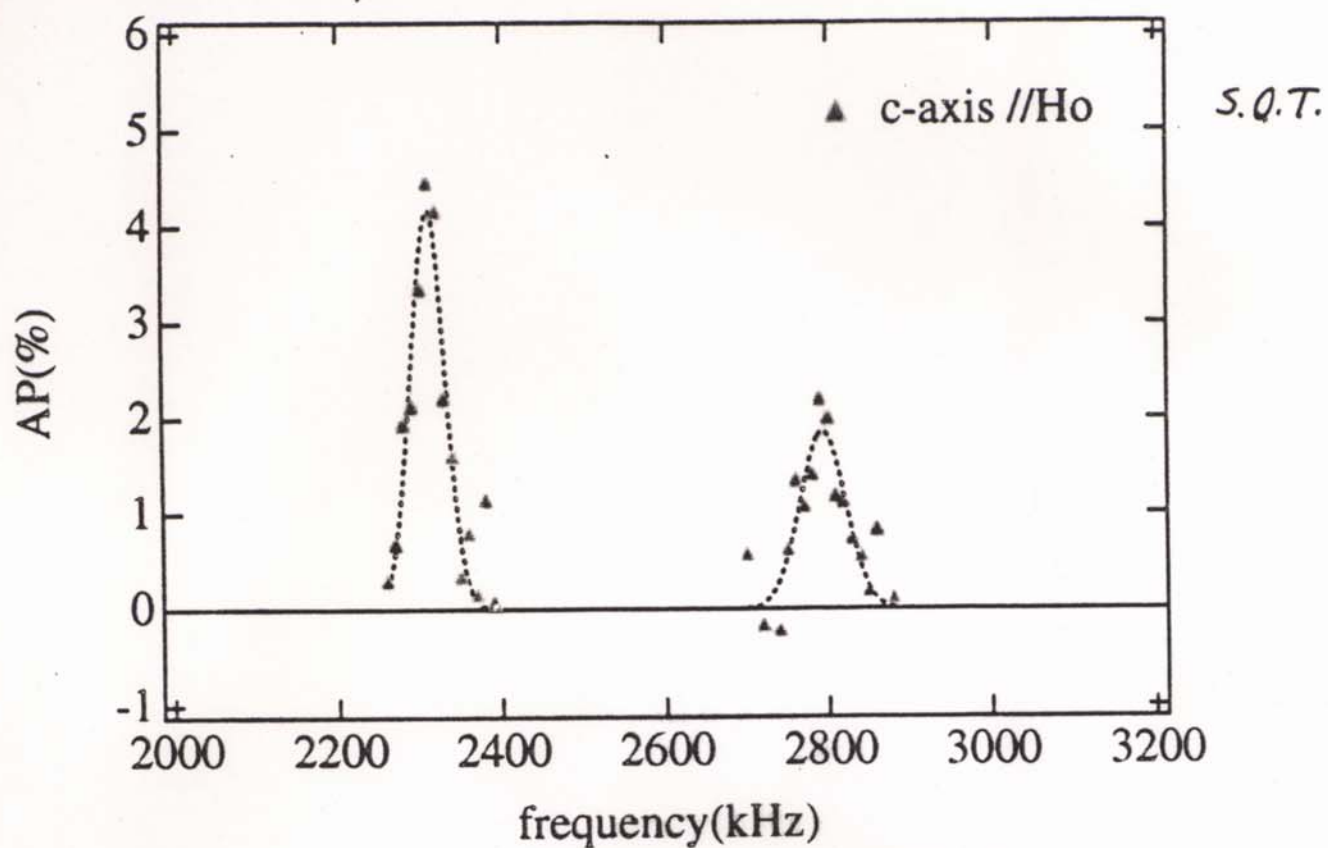
Indices: $T_1^{-1} \propto B_{\text{ext}}^\nu$ Expt. ; $\nu = 0.54 \pm 0.10$
 $T_1^{-1} \propto (T - T_C)^n$ at $T > T_C$
 $T_1^{-1} \propto (T - T_C)^{n'}$ at $T < T_C$

Itinerancy in Ni 証明!

TiO₂ (rutile)



Site1 50% population.

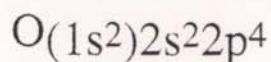
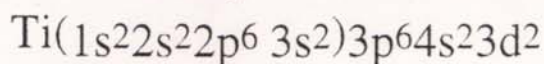


4. Band calculation based on KKR

Super lattice: too much dense impurities.

Lattice relaxation: Total energy of S.L. minimum.

Electronic configuration:



← Localized & Spherical: contr. to q is small.

Assumed Substitutional of O: N^{1-} ← neutrality +1

Substitutional of Ti: N^{1+} ← neutrality -1

Interstitial Octahedral; N^{1-} and/or N^{1+}

Assumed Maffin Tin Sphere(MT); Observed sphere depend. *in the Calc.*

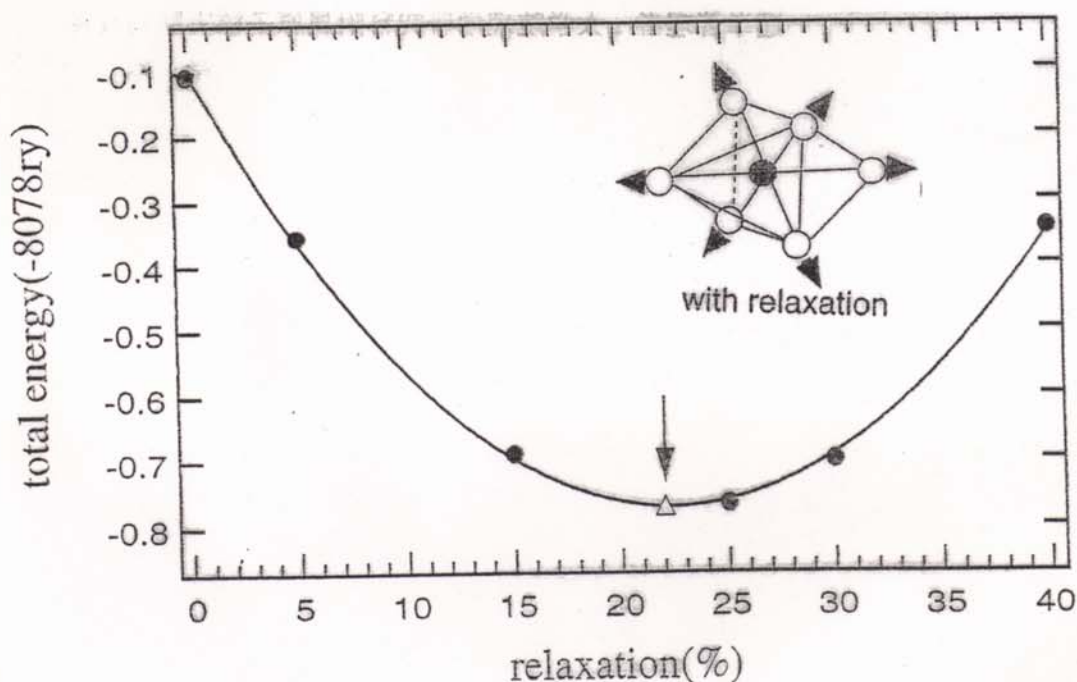
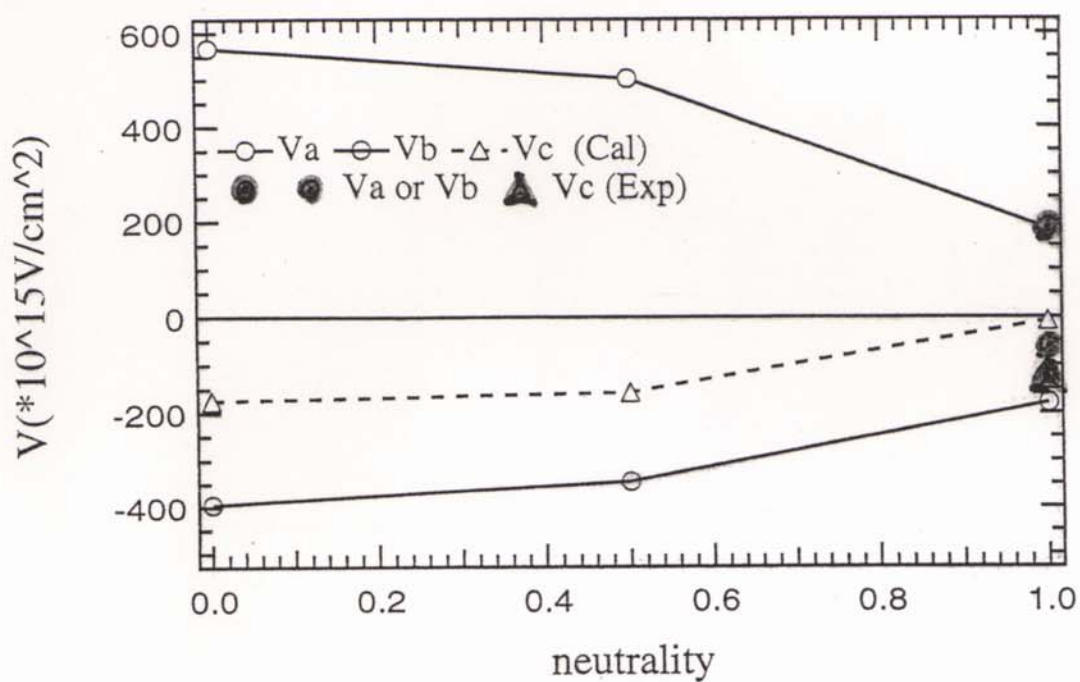
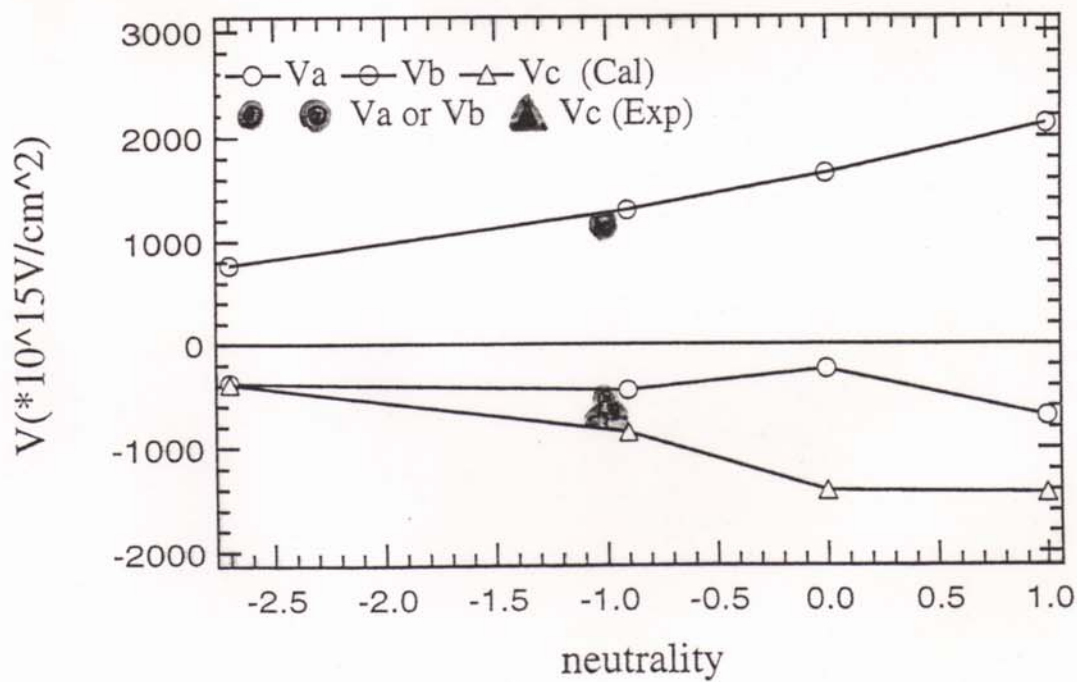


図 5.4: 格子緩和に対する全エネルギーの変化 (Octahedral 位置)
Interstitial site



○ substitutional site

図 5.7: O 位置における電場勾配

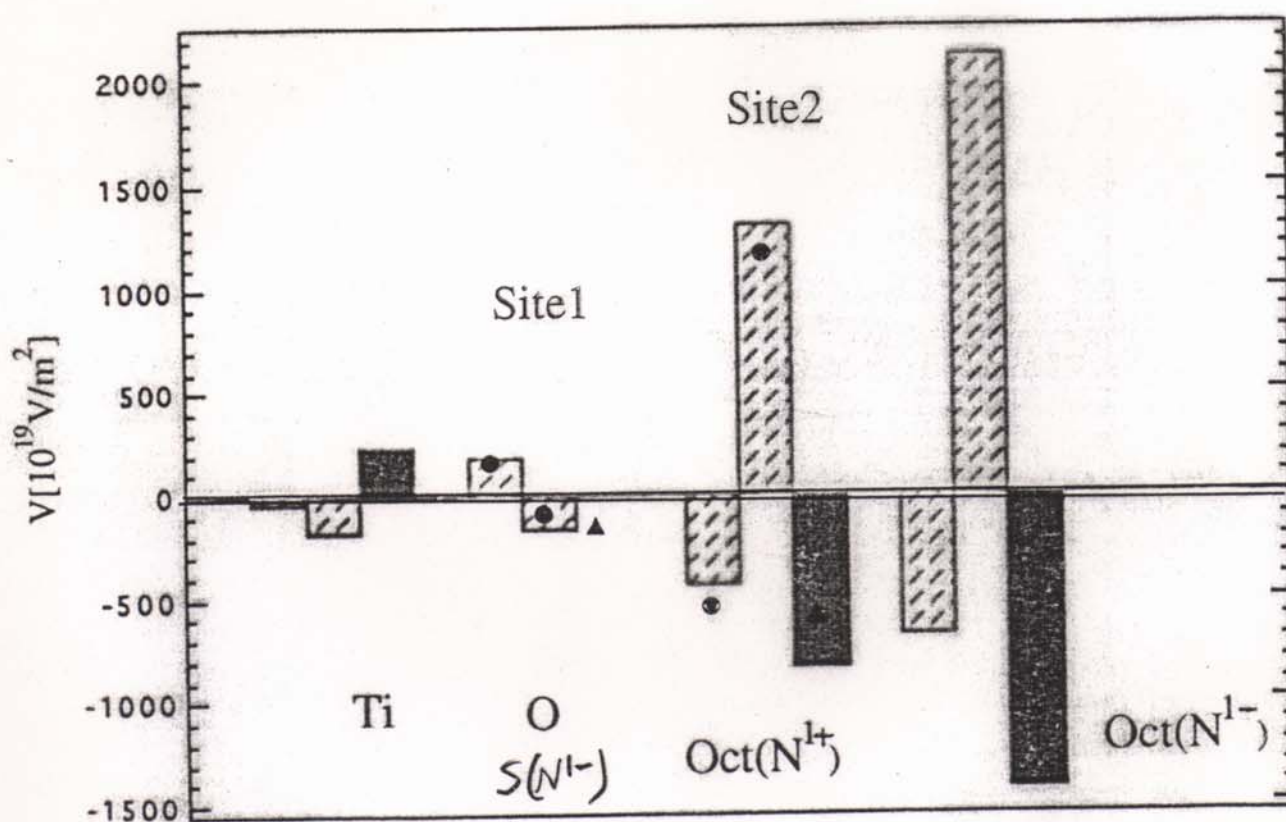


○ Octahedral site

図 5.8: Octahedral 位置における電場勾配

実験値と計算値との比較

Theory



How much the polarization maintained & Q ?

Nuc.	I	$T_{1/2}$	Catcher	P/P_0 (%)	Q (mb)	Ref
^8Li	2	0.84 s	$\text{LiIO}_3, \text{LiNbO}_3$	30	32.7(6)	PRL 69(92)2058
^8B	1	0.77 s	Mg	100	68.3(2.1)	PRL 69(92)2058
^{12}B	1	21 ms	BN, TiB_2 , Mg	30	13.21(26)	PRL 69(92)2058
^{12}N	1	11 ms	BN	30	+9.8(9)	PL B420 (98) 31
^{17}F	5/2	64.5 s	MgF_2 , CaF_2	~ 100 ~ 50	100(20) 58(4)	NP A236(74)416 JPSJ21(66)213 NP A236(74)416 PR 48(93)12672
^{21}F	5/2	4.16 s	MgF_2, NaF	~ 100	110(22) 71(16)	HFI 120(99)673 JPSJ21(66)213 HFI 120(99)673 PR 48(93)12672
^{23}Mg	3/2	11 s	$\text{TiO}_2, \text{MgF}_2$,	30	115(8)	HFI 120(99)673
^{27}Si	5/2	4.16 s	Al_2O_3 , Si	100	58(4)	PRL Submit.
^{39}Ca	3/2	0.6 s	KBr, KCaBr_3	~ 50	36(7)	To be published
^{41}Sc	7/2	0.54 s	CaO	50		

Sites						
^8Li	2	0.84 s	TiO_2	1	~ 25	'02 M.Thesis Ogura
^{12}B	1	21 ms	TiO_2	2P	100	'02 M.Thesis Ogura
^{12}N	1	11 ms	TiO_2	2	100	ZN 53a(98) 293
^{16}N	2	7.13 s	TiO_2	2	100	17.9(1.7) PRL 86(01)3735
^{13}O	3/2	0.86 s	TiO_2	2	100	11.0(1.3) PL B549 (99) 81
^{19}O	5/2	26.9 s	TiO_2	2	100	3.7(4) PL B457 (99) 9
^{41}Sc	7/2	0.54 s	TiO_2	1	100	-156(3) ZN 53a (98) 549

4. 最近のトピックス

自然科学の基礎研究

医学・工学への応用

環境やエネルギー

各分野への貢献大

ナノ構造：

フラーレン；アルカリ金属植え込みによる超伝導物質化

ゼオライト；ナノ構造材料の配列保持在、、、

非磁性金属ナノ粒子の Cubic 集合；強磁性発現

クラスター：スペクトル、分裂、内包クラスター

ネオマックス 最強永久磁石； $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, $\text{B} \Rightarrow \text{N}$ 化合物

弱強磁性； MB_x , CaB_6 (非磁性原子化合物)

重い電子系と磁気； $\text{CeM}_{1-x}\text{B}_6$ ； $\text{M} = \text{Nd, La,},$

磁性半導体； $(\text{Ga, Mn})\text{As}$, $(\text{In, Mn})\text{As}$, $(\text{Cd, Mn})\text{As}$

$(\text{Al, Mn})\text{N},,,,$

高温超伝導材料 $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$, $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_{7+y}$,

B の電子状態； MgB_2 , AlB_2 ,

H_c 改良 (重イオン照射による)；損傷部 非超、、

電子状態の層間不均一性

不純物効果

ステンレス鋼の放射線損傷・焼鈍；炉材料 (耐性)

液体金属標的窓；核反応高強度中性子発生

ビームタイム例：南園グループビームタイム実績 一外部実験のリスト
放医研 HIMAC

1999 ~200 hr 4/12-13, 7/20-25, 10/14-18

2000 ~140 hr 6/17-20, 6/30-7/2, 12/5-7

2001 ~240 hr 5/11-14, 7/26-28, 11/22-24, 11/30-12/3, 12/20-23

理研リングサイクロ

1999 ~100 hr 3/9-12

2000 ~200 hr 5/4-7, 7/25-31

2001 なし

理研リングサイクロの実験サポート上の特徴

1) Ca までのイオン; $E_{\text{proj}} \sim 135 \text{ MeV/u}$

Ca 以上 $E_{\text{proj}} < 135 \text{ MeV/u}$ 可

2) ビーム強度大; $I(\text{O}) \sim 200 \text{ pA}$

Metal Ion; Ca 位まで $I(\text{M}) \sim 20 \text{ pA}$

3) RIPS(大 Acceptance) 完備。

Control Program 完備; 実験者がほぼ自由に設定

(Hard 面も Full support でない。)

4) PAC 厳格; 拘物理的意味、PAC を納得させ得ない。

(自然、Dripline 近傍核に集中)

5) 非核 PAC; 核物性を提案可。

6) 旅費は理研側が支給。

実験費用: 理研研究グループに主にお問い合わせする。

7) ビームタイム要求多い。

RIPS 使用実験; 別途調整も必要。

8) ビームタイム計算 = On target 時間

PAC で認可後 2 年以内に消化

予定より早く、長くビームをもらえる。

多少の延長可; ビーム調整別途取るから!

9) 宿舍清潔、長期滞在にはちょっと費用高い。

部屋数が少ない。

10) 工作施設有、整備増強望む。

11) 電子・電気部品室有。

12) 電子回路モジュールプール有り。

13) 実験技術的改良、理研内共同研究者と一緒に進める。

放医研 HIMAC の実験サポート上の特徴

1) 重イオン; $E_{\text{proj}} \sim 400 \text{ MeV/u}$ まで出せる唯一の国内施設。
ビーム種開発段階; 相談が要る。

2) $I_{\text{proj}} \sim I_{\text{cyclo}}/100 = \sim 10^9 \text{ pps}$; ($\sim 0.1 \text{ pA}$)

3) RIPS 完備 (アクセプタンス 中位)

Control Program; 実験者にも解放、放医研側の助必要。

ハード部分は Full support

4) 週日昼間は癌治療に使用; 夜と週末に基礎研究用

5) 入射器は 2 Rings へ完全スイッチング可

生物実験 (上 Ring)、物理実験 (下 Ring); 同時進行

癌治療は下 Ring 主 = 物理実験は同時には不可

6 MeV/u も使用可

6) PAC は比較的和やか。

有物理的意味; 成果をあげれば PAC を納得させ得る
安定線に近い核をも対象可

(ビーム強度比較的弱; 必然的)

7) 非核分野 (PAC); 核物性、工学、加速器、医学・生物

8) 旅費; 放医研支給、実験費も申請可 (高額の備品等可)

9) 最近核関係; 南園 (阪大)、小林 (東北)、鈴木 (新潟)、
郷農 (最近少)、村上 (京大) 等と少ない。

10) PAC は 1 年単位

認可年内に消化、ビームタイム計算; マシン占有時間 (調整込)

調整時間は短い、また

ビームタイム計算はそんなに厳格ではない、

PAC 認可後; Scheduling で決まる、延長等は不可

11) 宿舍は快適、部屋数は多い

放医研全体の使用; 研修等が有る時は、注意!

12) 工作施設が有るが、整備必要

13) 電子・電気部品部屋が有り

14) 電子回路モジュールプール最近充実、十分でないこと有り

15) 実験の技術面は AEC (加速器サポート会社要員) の補助
+ 所内対応者の責任あるサポート

——RCNP——

以下の条件が有れば実験できる。

1) A = 40 位までの重イオンを研究対象；将来は鉄ビームまで！
ビーム種は相談しながら決める

2) PAC；「RCNP でなければできない実験」でなく、
「RCNP で十分効率良くできる実験」
(すでにそうなっているかもしれませんが。)

ユニークなマシンや実験設備は重要！

+マシン存在理由；ビームタイム潤沢に必要な実験も多有る。

実験がユニークなら；

「マシンを十分に活かせる」！

「マシンが近いから」でも良い！

海外は行きにくいし、

RCNP の重イオンビーム一流である

強度、セパレータのアクセプタンスは理研に及ばないが

3) 利用者とのパイプ役が欲しい。

理研；重イオン主体＝内部に共同研究者容易

放医研は必ずパイプ役（所内対応者）を付ける

技術的なことは専任の AEC がいる

RCNP 内部に通じる若い共同研究者か

パイプ役の教官・技官が立上げ時に必要

4) 旅費は必要

さらに、以下があればもっと良い。

5) 非核分野に別枠のビームタイム

6) 実験費用を申請できる。（含実験装置）

7) セパレータ運転環境（ソフト・ハード・サポート）を整備

ハードのレベルアップも

8) 機械工作室、電子工作室

9) 重イオンビーム種・および強度のレベルアップ

7 . Concluding Remarks.

- 1) Spin polarized unstable ($T_{1/2} \sim 1$ s) nuclei are produced.
Low-Energy nuclear reaction and
high-energy heavy-ion projectile fragmentation.
On-Line Isotope Separator.
Post accelerat. of T. Frag. and artif. pol. is promising.
- 2) NMR Line Shape in Metal; N-N Dipolar Int.
in Ionic Crystal; N. Quadrupole Int. due to def. & ions.
- 3) The implanted atoms are located in
Substitutional and/or
Interstitial sites with Loka Lattice relaxed.
- 4) Theoretical prediction of B_{hf} & q were given by the *ab initio* band structure calculation in the framework of KKR with a lattice relaxation and
a shifted Fermi level (charge neutrality)
in the adopted super-cell;
Explained experimental data well, but still further
theoretical improvements in handlind pot. are required
- 5) New materials can be designed using the disclosed
Electronic structures of crystals and dilute impurities.
World strongest permanent magnets!
High- T_c Superconductors.
- 6) Spin Dewers can be designed;
 TiO_2 crystal is a good Spin Dewer.