

4. 金属中の重い粒子の拡散	電 総 研	近藤 淳
5. 荷電粒子の運動と直交定理	京産大理	桜井 明夫
6. μ^+ の拡散 — 密度行列の方法	基 研	山田 耕作
7. 金属中の水素の拡散 — 実験	中大理工	深井 有
8. 金属中水素の量子拡散 — 理論	中大理工	杉本 秀彦
9. 金属中の陽電子の運動	東大教養	兵頭 俊夫
10. 遷移金属における 3d 空孔の運動	阪 大 理	五十嵐潤一

1. 金属中のミュオンの拡散現象の現状と展望

東大理 永 嶺 謙 忠

I. はじめに

質量が陽子の $1/9$ である格子間軽粒子である正ミュオン (μ^+) の拡散現象が研究され始めて 10 年余の年月が経過している。これまでの実験研究は、 μ^+ の拡散それ自体を調べようとするものと、金属中に存在する不純物や欠陥によって μ^+ の拡散が阻止される性質を使って欠陥や不純物を調べようとする研究とが並行して進められてきた。ここでは、純粋な（不純物などの影響のない）金属中で、 μ^+ がどのような拡散をするか、それに関してどのような実験事実が積み上げられているか、今後どういう展開がありそうか、等の点についてしばしば話を進めることにする。

II. μ^+ 拡散に関する実験方法

これまでに μ^+ の金属中の拡散について、実験が行なわれたり、実験をすべく提案されてきた方法は次のようなものである。

1) ランダム磁場によるスピン緩和の narrowing

μ^+ が静的で方向または大きさがランダムな磁場の下におかれると、偏極した個々のスピンの方向に位相のずれを起し、集団平均をするとスピンの偏極に時間変化が生じる。このスピン緩和の時間変化、即ち緩和函数は、どのような条件で測定するかに応じて、特徴的な形をとる。零磁場縦緩和法 (ZF- μ SR, 外場零で初期偏極方向のスピン偏極の変化を測定する) では、いわゆる Kubo-Toyabe 型となり、ガウス型の減少部分の後に $\frac{1}{3}$ の回復部分が加わる。横磁場緩

和法 (TF- μ SR, 初期偏極と直角方向に磁場をかけ μ^+ スピンを回転させ, 回転平面内での位相のずれによる緩和を測る) では, ガウス型になる。ミュオンが運動することで, これ等の緩和に narrowing が起る。ZF- μ SR 法の優れた点は, μ^+ がゆっくり拡散するときに, 線幅と narrowing の程度 (拡散率) とを同時に決定出来ることにある。

さて, ランダム場として "利用" されるものとしては, a) 格子間 μ^+ の周りの核磁気によるランダム場 (大きさを 2 次モーメント σ で表わす), b) 磁性体中の原子磁気の大極子場 (大きさ $r_\mu H_d$), 等が考えられる。これまで μ^+ の拡散が調べられたのは; 1) の方法で Cu, Nb, Ta, V, など; 2) の方法で強磁性 bcc Fe, 反強磁性 bcc Cr, などであった。 μ^+ の跳躍率 (hopping rate) を ν とすれば, 1), 2) について narrow した緩和の程度 λ は, それぞれ, おおよそ $2\sigma^2/\nu$, $(r_\mu^2 H_d^2)/\nu$ の程度である。 σ の大きさは 10^5 s^{-1} , $r_\mu H_d$ は 10^8 s^{-1} のオーダーであり, λ の観測出来る範囲は $10^4 \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ であるから, ν の測定可能範囲は次のようになる。

- a) 核大極子場の narrowing $10^2 < \nu < 10^6 \text{ s}^{-1}$
- b) 原子大極子場の narrowing $10^8 < \nu < 10^{12} \text{ s}^{-1}$

明らかに, 2つの方法は異なった ν の領域をプローブしていることになる。これまでに, 最も精力的に測定が行なわれてきている fcc Cu^{1,2,3)} と bcc Fe⁴⁾ とがちがった領域にあることは注目すべきことである。

2) 不純物効果によるランダム磁場によるスピン緩和の narrowing

前記の方法で, より一般的と思われる a) の方法での ν 測定域の限界をこえるために, 不純物を入れる方法が行なわれている。代表的なものは Al 中の μ^+ の拡散を調べるために AlMn (Mn 濃度 5-70 ppm) 合金を用いた場合である⁵⁾ この方法では, μ^+ の状態を不純物に trap された状態とされていない状態とにわけて, 各状態における線幅と存在時間とをパラメーターとする rate equation を解いて ν (trap されていない状態の存在時間の逆数) を求める方法である。

3) μ^+ 局所場の時間変化の測定

格子間 μ^+ は, その場所固有の平均的な局所場を感じる。この平均場は, 外場をかけたときの Zeeman 周波数のずれとして観測される。 μ^+ 場所を移動する際 (t-サイト $\rightarrow$ o-サイト, 格子間 $\rightarrow$ 欠陥, 等) に, 局所場がわずかでも変化するならば, その時間変化のようすから, μ^+ の拡散率を求めることが出来る。周波数の時間変化は, 横磁場回転法 (TF- μ SR) でスピン回転数の時間変化を測定すればよいが, スピンの位相の干渉性が失なわれると測定出来なくなる。我々 UT-MSL で開発されたパルス状 R.F. によるスピン共鳴法では, その制限がない。これまでに放射損傷を起した Fe について回転法で, 常磁性 MnO について共鳴法と回転法で測定が行なわれた。

4) 巨視的拡散の方法

直接的に μ^+ の拡散をみる方法として、調べたい金属試料 A を薄膜として、同じく薄膜にした μ^+ が偏極を失ないやすい物質 B (磁性体など) とをサンドイッチ構造にさせて μ^+ を入射させる方法が提案されている⁶⁾。 μ^+ が A 中を拡散し、 B 中へ migrate すると減偏極し、 μ^+ の緩和が起る。 Al などでも試みられたが、成功はしていない。

5) μe channeling の時間変化の測定

最近成功した μe channeling 法⁷⁾ は、 μ^+ の結晶中の位置とその変動を測定するために直接的な方法と考えられる。 μ^+ が入射され、格子間位置に止った後拡散を始めたとすれば、格子間での blocking パターンに変化が生ずる。この方法では、極端な小立体角で μe 崩壊を測定するために、メソnfactoryのような直流型ビームでは時間変化を測定しにくい。 $UT-MSL$ のようなパルス状ビームを用いて、ビームパルスに時間原点をとることによってのみ、 μe チャリングパターンの時間変化の測定が容易になる。85年秋以降の実験に期待が寄せられている。

6) 準位交互共鳴法 (Level Crossing Resonance)

Cu などの結晶中の格子間 μ^+ は、近接原子格子を歪ませ、電場勾配を Cu 核の位置につくる。このとき隣接する Cu 核スピンは、Zeeman エネルギーの他に4重極相互作用をうける。外場を変じて、2つのエネルギー差を合わせると、共鳴的に核スピンの運動が起り、 μ^+ の緩和が減少する。このLCRと呼ばれる共鳴現象に、 μ^+ の拡散が加わるとLCR共鳴の線幅に narrowing が起り、そのようすから拡散率を求めることが出来る。84年7月に Cu についてLCR共鳴が観測され、拡散の研究を始めている。

III. μ^+ 拡散実験データの現状

主として、1)及び2)の方法で試みられた μ^+ 拡散を調べる実験の実験条件が図1に、代表的な結果が hopping rate の温度依存性の形で図2に示されている。

図2から読みとることの出来る総体的な μ^+ の金属中の拡散の特徴は次のようなものである。(Crの結果は、10年程前の実験であることもあって、以下の議論には加えていない)

1) 全てのデータは50 K以上で、phononの関与する非干渉性拡散を思わせるように、温度降下と共に ν が急速に減少する。

2) fcc Cu と Al 中では、低温で温度降下と共に ν が増大する。この温度依存性は Cu で $T^{-0.36}$ というゆるやかなもので、phonon散乱の減少に伴うバンド的拡散の予測である T^{-9} とは全く異なっている。この結果の解釈は最近になって、ミュオンと伝導電子の相互作用をとり入れた新しい理論によって説明されている^{7,8)}

μ^+ Diffusion Studies in Metals (Pure)

SAMPLE	METHOD	IMPURITY	TEMPERATURE		
			0.1	1	100
Cu	N.D.	2 ppm	-----		
$^{63}\text{Cu}_{99.99}$		20 ppm	-----		
$^{65}\text{Cu}_{99.97}$		20 ppm	-----		
Al	N.D.	1 ppm	-----		
Al-Mn	N.D.I.A.	5-70 ppm	-----		
Fe	A.D.	20 ppm	-----		
Nb	N.D.	2 ppm	-----		
V	N.D.	0.1 %	-----		

図1 μ^+ 拡散実験の実験条件のまとめ。
N.D. は、ランダム場の起源が核磁気の場合、A.D. は磁性原子の場合で、I.A. は不純物効果を利用した場合を示す。実線は横磁場法、点線は零磁場法、一点鎖線は緩磁場法を示す。

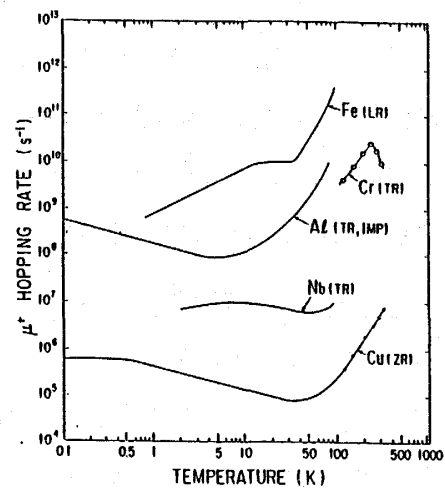


図2 代表的な金属中の μ^+ hopping rate の温度依存性。

3) bcc Fe, Nb 中では、温度降下と共に ν は減少傾向にあり、fcc Cu, Al と対照的である。bcc Fe については、one-phonon assisted tunneling の可能性が議論されている⁴⁾

4) hopping rate の絶対値は全温度域で同じ fcc の Cu と Al で、また同じ bcc の Nb と Fe とで 3 ~ 4 ケタ程異なる。非干渉性拡散域の解析から、Al と Cu とで隣り合うサイト間の転移積分の値 (J_{eff}) が、それぞれ $100 \mu\text{eV}$ と $1 \mu\text{eV}$ であると導かれている。

5) 図2の結果と、後に深井氏によって紹介される H の data とを比べてみると、例えば Fe, Nb については、高温域での H の結果は、そのまま低温域での μ^+ の data につながるようにみえる。数年前に考えられていたような、Fe 以外は μ^+ は全て H に比べてゆっくり拡散するという一般的傾向は、実験の改良（主として、試料の純度の向上）によって正当性が消えたと考えられる。

IV. 今後の展望

これまでの μ^+ の拡散の研究は、磁氣的相互作用を通じて、 μ SR 法によって行われてきた。 μ^+ の拡散現象はあくまでも電氣的なものであり、磁氣的な方法に頼らず直接 μ^+ の拡散を観測する channeling 又は巨視的方法によって μ^+ の拡散を調べる研究の進展が望まれる。

現在 (Sept. 7, '85) 筆者は SIN 研究所 (スイス) においてこの原稿を書いているが、昨日、Seeger グループがロスアラモスでやっている fcc Cu 中の $\pi^+ \rightarrow \mu^+$ channeling 実験の結果が伝わってきた。 π^+ は寿命が μ^+ の $1/80$ しかないが、質量は μ^+ の約 1.3 倍で、金属中の μ^+ の位置

と同じ位置を π^+ が占めると考えられる。 $\pi\mu$ channeling の結果は、温度を低下すると 10K の近辺までに O-site から T-site $\sim \pi^+$ の位置が移動しているようにみえるらしい。この結果は、次の Kadono の報告にある ZF- μ SR 法の結果と明らかに矛盾していて、ZF- μ SR 法ではランダム磁場の 2 次能率 σ は全く変化せず、 μ^+ の位置は O-site のままであると結論される。この矛盾は、今後大きな議論を呼びそうである。

参考文献

- 1) O. Hartman 他, Phys. Rev. Lett. **44** (1980) 337.
- 2) C.W. Clawson 他, Phys. Rev. Lett. **51** (1983) 114.
- 3) R. Kadono 他, Hyp. Int. **17-19** (1984) 109.
- 4) E. Yagi 他, to be published.
- 5) M. Leon 他, Hyp. Int. **6** (1979) 301.
- 6) B.D. Patterson, Hyp. Int. **17-19** (1984) 517.
- 7) J. Konao, Physica in press.
- 8) K. Yamada, Prog. Theor. Phys. in press.

2. 低温に於ける銅中の μ^+ の拡散

東大理 門 野 良 典

我々は昨年春の学会で銅中の正ミュオン (μ^+) の拡散について発表した。その後新しいデータがいくつか得られ、解析も最終的なものになりつつあるので、それを含めて低温での μ^+ の挙動について述べる事にしたい。

よく知られている様に μ^+ は陽子の約 1/9 の質量を持つ不安定な素粒子で、約 $2.2\mu\text{sec}$ の平均寿命 ($=\tau_\mu$) で陽電子 (e^+) と 2 つのニュートリノに崩壊する。その電磁的な性質は、陽子と全く同じで我々は μ^+ を陽子の軽いアイソトープと見做す事が出来る。崩壊に伴う e^+ は μ^+ のスピンに対して $1 + \frac{1}{3} \cos \theta$ という角分布 (但し e^+ のエネルギーについては積分する) を持つため、この e^+ を測定すれば我々は e^+ が放出された時点での μ^+ のスピンの向きを知る事が出来る。

μ^+ の拡散運動は NMR の用語で所謂 motional narrowing という効果 (共鳴線巾が probe の運動によって狭くなる) を通じてスピン緩和に反映され、我々は偏局した μ^+ を物質中に留めてそのスピンを上述の様に時間的に観測する事によって、緩和関数の変化からその拡散の速さ