

非平衡状態の秩序化過程を探るミクロな実験手段の展望と限界

東京大学理学部 永嶺謙忠

§1 はじめに

“無秩序な状態が不安定になり、そこから新しい秩序が出来てゆく過程は自然界における最も魅力ある現象の一つである”¹⁾。この魅力ある現象を実験を通して捉えてゆく際に色々な困難に直面する。観測手段を磁気共鳴や μ SR 法^{2,3)} のような微視的な磁気プローブに限って以下に考えてみることにする。ある時間 ($t_R=0$) に秩序の破壊が起こり、その後時間 t_R と共に秩序化に向ってゆくさまを実時間的に測定することによって追跡することを目指す。

初めにおことわりしておくが、筆者はこのような物理に対しては全く実績がなく、知識も稀薄である。従って、以下の文章において、物理用語の使用法などにおいて専門家のみなさんにとって相い入れないことが多いことをお許し頂きたい。そのような立場をわきまえず、この文章をいつる理由は、筆者等東京大学理学部中間子科学実験施設が世界に先がけて開発したパルス状 μ SR 法^{4,5)} が、この方面の研究のミクロな手段として何らかの貢献をするであろうと感ずるからである⁶⁾。

§2 ミクロな手段による非平衡状態の秩序化過程の観測法

物質中のミクロな磁場をプローブにして、物質が非平衡状態から秩序に向ってゆくさまを調べるには、次の2つのプロセスが前提となる：1) 秩序の破壊、非平衡状態の生成；2) 破壊された秩序の回復、非平衡状態の秩序化過程の観測。2) の観測をミクロなプローブで行なう。

微視的な観測手段を念頭に置いて、1) の秩序の破壊がどのように実現されるか具体的に考えてみよう。当然のことながら、破壊によって観測手段の状態が変化することなく、調べたい物質の秩序のみが乱れなければならない。

a) マクロな物理量の急激な変化に応じた秩序の破壊：磁場、圧力、温度などの急激な変化を起させ、相変化を生ずる場合などである。急激な変化をパルス的にくり返すことによって観測される。試料全体の均一な物理量の変化が必要となり、磁場、圧力、温度の順にむずかしくなる。

b) ミクロな物理量の急激な変化に応じた秩序の破壊：ミクロなプローブの存在がそのまま、秩序の乱れを局所的に生ずる事実を積極的に利用する。 μ^+ や放射能核を用いる測定法をよく調べるとこのような状況に直面する。

このような秩序破壊の後に起る回復現象は、通常の微視的な磁性の表現 $\chi(\mathbf{q}, \omega)$ が t_R に対して変化するという形で $\chi(\mathbf{q}, \omega, t_R)$ で表現される。

§3 ミクロな測定手段の特徴と限界

ミクロな測定手段で $\chi(q, \omega, t_R)$ を測定する際に、測定手段に応じて t_R に対して測定に要する時間幅による分解能 Δt_R に限界が生じ、測定手段の個性と破壊の手法に応じて、 $t_R=0$ から $t_R=t_R^0$ までの不感時間帯が存在することになる。

a) NMRなどの磁気共鳴法: $\Delta t_R \simeq 100 \mu s$, $t_R^0 \simeq 1 ms$ 程度と考える。金属試料として、粉末を用いることにより、マクロな物理量の変化が試料に均一に起るか否かについて問題が生ずる場合がある。

b) Mössbauer法: 周期的な秩序破壊を起し、同期した測定をくり返す。測定に要する時間が day のスケールとなるため、 Δt_R は現実的には 全測定時間/データブロックという形で求まる。

c) パルス状 μSR 法: $\Delta t_R \simeq 2 \sim 20 \mu s$, $t_R^0 \simeq 1 ns$ 程度までゆく。 Δt_R の間での緩和時間の測定は、広い時間域の電子系の相関時間をカバーする。測定時間は、数分~数10分のオーダーである。

中性子散乱において、実時間測定を行なうことは、パルス状中性子源などで可能となるが、 Δt_R , t_R^0 共に統計によって制限され、1 ms 位である。

§4 いくつかの実例

μSR 法を中心にして、秩序化過程を観測した例(や、こじつけたものもあるが)を述べてみよう。

A) マクロな破壊とミクロなプローブ

磁場や温度をパルスのように変化させ、非平衡状態をつくり、図1のような回復過程を調べる。 μSR を用いる場合は、測定する時間の長さに対して、パルスの変化を t_R だけ早くに付けることにより、調べる。電子スピン系の秩序の回復を μ^+ スピンの感ずるミクロ磁場(双極子場のような)のゆるぎの変化により、調べる。スピングラス系の凍結温度以下の磁氣的オーダーの時空相関を調べることなどに興味ある実験が考えられる⁶⁾。

同様な問題意識に基づく中性子散乱による実験が、一足早く KENS のパルス状中性子源を用いて、フラスター系スピングラス $88FeTiO_3 - 12Fe_2O_3$ について実現された⁷⁾。

B) ミクロな破壊とミクロなプローブ

プローブとして導入される μ^+ や e^+ などは、局所的に物質の秩序状態を乱すことになる。この乱れのメカニズムが良く理解される場合に、その回復過程は興味ある研究対象となる。最近、ポリアセチレンに関して、石田等によって UT-MSL のパルス状ミュオンを用いて、以下のような実験が行われた。

ポリアセチレン $(C(H)_x, (C(D)_x)$ などのような半導体に μ^+ が入射されると、減速中にミュオニウムと呼ばれる μ^+e^- の束縛状態が出来、それが動エネルギー状態になる。その際に、図2のように2重結合に付加してラジカル状態を作り、一つの不対電子が生ずる。このモデルの正当性は、スズ型異性体において、不対電子がゆるやかに束縛されてい

る常磁性状態が観測されていること⁸⁾と与えられる。トランス型異性体では、不対電子が μ^+ を原点として局所的なソリトンとなり、ポリアセチレンの鎖の上を一次元運動をすることが予想される。その際 μ^+ を中心として片側(図2では左側のみ)でのみソリトンが存在し、 μ^+ ではわかえる。事実、 μ^+ のスピン緩和を観測したところ、外場 H に対して、 $(H)^{-1/2}$ の依存性を示し、ソリトンのような一次元運動によって緩和が起きていることが見出された。ソリトンが μ^+ の周りに局在していることは a) 温度依存性が全体を平均的にみる NMR とは異なる、b) ソリトンと μ^+ の結合が全空間平均としたものより10倍以上大きい、ことなどで予測される。

このように、ポリアセチレン中で、 μ^+ がもたらしたミクロな秩序の破壊は、局所的なソリトンの発生を生み出したことにより新しい秩序を生み出し、それをフローブとして μ^+ が観測している。このようなミクロな破壊現象は、ユニークであるばかりでなく、測定も容易で、不感時間も存在しない。今後系統的な研究が進展してゆくことが期待される。

1) 川崎恭治, 物理学会誌 38 (1983) 919

2) 物理論文選集 205 ミュオンスピン回転 (1979) 日本物理学会刊, 山崎敏光・石田謙二編

3) Proceedings of μ SR 83, eds T. Yamazaki and K. Nagamine, 近刊

4) UT-MSL Newsletter No 1-3 (1981-3), eds K. Nagamine and T. Yamazaki

5) 石田謙二・山崎敏光, 物理学会誌 37 (1982) 33

6) K. Nagamine, UT-MSL BOOM Proposal No. 17 (1982)

7) Y. Ishikawa, Physica, to be published

8) K. Nagamine, K. Ishida et al Hyp. Int. 17-19 (1984) 503

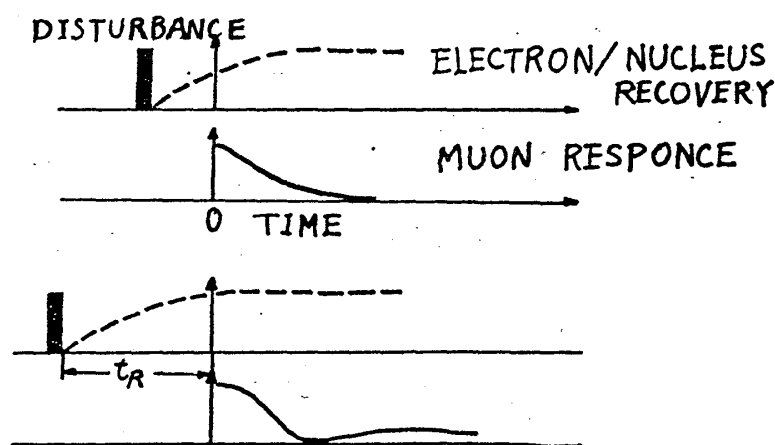
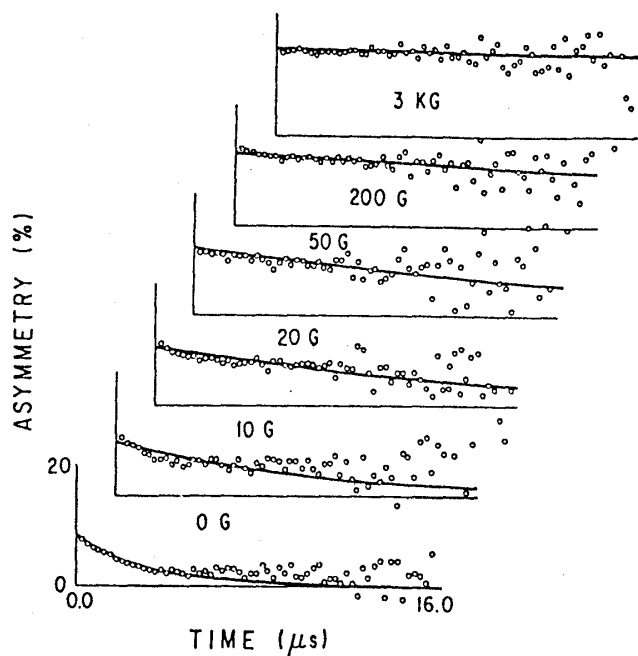


図1 μ SRの実時間測定。破壊された系の回復を緩和函数を通じて、時間 τ_R の函数で測定する。

μ^+ in trans-(CH)_x, 293 K



SOLITONS CREATED BY μ^+

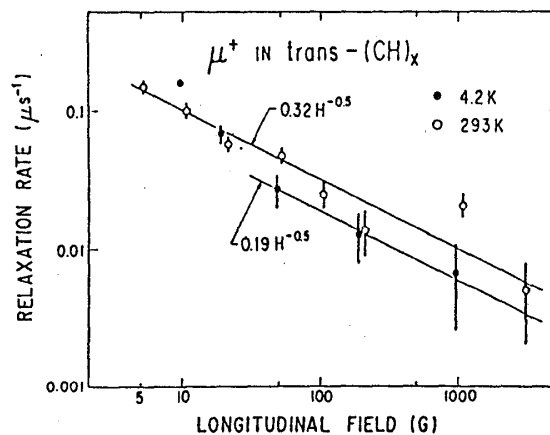
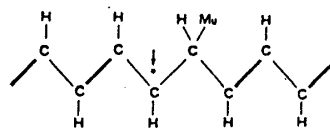


図2 石田・永嶺等によるトランス型ポリアセチレンの μ^+ SR測定。 μ^+ のスピン緩和の時間関数が外場（縦磁場）に対し2つゝやかに変化している（左）。緩和率を外場の関数として表わすと1次元運動に特有な（外場）^{-1/2}の依存性を持つ（右下）。 μ^+ が導入されることにより、2局所的な不対電子が生じ（右上）それがソリトンとなり、2図の左側に進んでゆく。