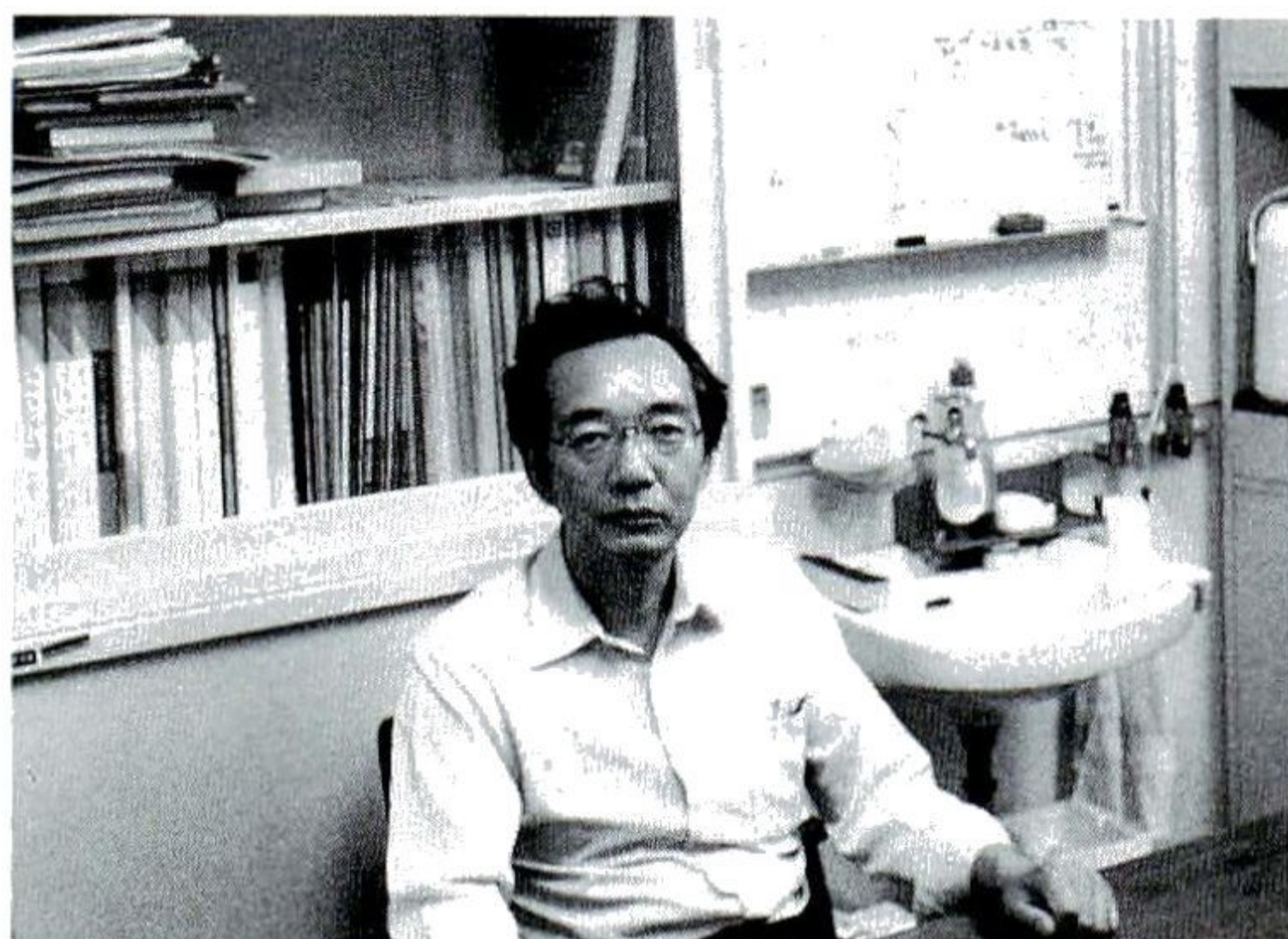




エントロピー 0 で物体はどうなるか

— 西田研究室～物理学科 —



西田 信彦 教授

物理には大きくわけて物性系と素粒子系の2つの分野があります。大まかにいうと、物性系はアボガドロ数個の多数の粒子からなる系を、素粒子系は物質を構成する粒子(素粒子)を研究します。そして、それぞれが実験系と理論系にわかれています。東工大の物理学科には物性実験の研究室がたくさんあります。物性実験系の研究とはどのようなものでしょうか。今回は、極低温での物性を研究している西田研究室を紹介します。



低温物理とは？—— 温度を下げる理由

温度とは何を示しているのでしょうか。温度は物質を構成する粒子の乱雑な運動のエネルギーの平均値です。それでは、温度を変えていくと物質はどのように変化するのでしょうか。

温度が非常に高い状態では、原子は電子と原子核にわかれて、プラズマと呼ばれる状態になっています。そして、この状態ではどんな物質も物理的にはほとんど違いがありません。

温度を下げていくと粒子の運動エネルギーが減り、電子が原子核にとらえられて原子になります。この状態が気体です。さらに温度を下げると原子間に働く力が無視できなくなり液体へと変化します。これらの状態は気体の状態方程式に見られるように、物理的には似た状態です。

液体の状態からさらに温度を下げていくと固体になります。原子は規則正しく並び、それぞれの物質特有の結晶構造をとります。原子の並び方が違うとその物質の性質も違ってきます。金属では原子に属していた電子が結晶中を自由に移動できるようになり、絶縁体では動きません。このように、物質の性質はそれを構成する粒子がどのように運動するかによって決まるのです。

固体の温度をさらに下げていくと原子自身の乱雑な運動はなくなっていきますが、電子がどのように運動するかによって、超伝導、強磁性や反強磁性などのさまざまな性質を示します。

熱力学の第三法則によると、絶対零度では物体のエントロピーは0となります。エントロピーは物体の乱雑さを表す量なので、この法則は「巨視的物体は絶対零度で秩序正しいある一つの状態をとる」ことを示しています。巨視的物体の温度を下げる理由の一つは、低温下、多数の粒子からなる系が秩序正しい一つの状態になる過程、そして、その状態がどのようなものかを研究することにあります。また、このように低温では多数の粒子が秩序正しいある一つの状態をとるので、低温下の物体を研究すると次のような量子力学の基本的な問題を研究することができます。

量子力学では非常に小さな粒子の運動を考え、粒子の運動はシュレーディンガー方程式で記述されます。ところで、粒子が1つのときには、シュレーディンガー方程式を解くことができます。しかし、粒子がたくさん集まると、シュレーディンガー方程式を解くことは不可能になり物質の性質

を予測することができなくなります。微視的な系（ミクロ系）では量子力学は完全に正しいのですが、量子力学をそのまま巨視的な系（マクロ系）で使うことはできません。

ミクロ系とマクロ系をつなぐ問題として、「シュレーディンガーの猫」があります。これはとても有名なので聞いたことがある人は結構いるでしょう。シュレーディンガーの猫というのは、次のような問題です。

青酸ガスの噴出口がついた箱のなかに猫を一匹入れておきます。この噴出口は放射線を検出すると開くようになっています。青酸ガスは毒ですから、噴出口が開くと当然猫は死にます。そこで、放射性元素を1つ用意しそれを検出器の前におきます。放射性元素はいつかは崩壊し放射線を発し噴出口は開かれます。この崩壊は量子力学の考え方に従って起こります。量子力学では崩壊は確率的に表され、崩壊した状態と崩壊していない状態の2つの状態が重なりあっています。箱の蓋を開ければ猫が生きているか死んでいるかはわかりますが、蓋を開けるまでは猫の生死は確率的に表されます。生きている状態と死んでいる状態が重なりあっているのです。これは、現実の世界で考え



ると非常に奇妙なことです。マクロ系で量子力学をそのまま用いたために起きたパラドックスです。

シュレーディンガーの猫は仮想実験であり、実際にはできません。そこで、極低温が登場します。極低温はマクロな系での量子力学を実験する舞台なのです。物質の性質を調べることによって量子力学がマクロ系でも成立するかを検証する。このような実験も低温物理の一つの特徴あるテーマなのです。



どこまで薄くしても超伝導？

西田研では超伝導、超流動、半導体などいろいろな物質について低温実験が行われていますが、ここでは超伝導の実験とミュオンを用いた物性実験を紹介します。

超伝導を示す物質を膜にし、その膜をどんどん薄くしていったら超伝導現象はどのようになるのだろうか、膜が原子1,2個分の厚さになっても超伝導現象は観測されるのだろうか。このような問題を考えるために、西田研では次のような実験をし

STM（走査トンネル顕微鏡）

真空中で物質の表面に針を近づけ、針と物質の間に電圧をかけるとトンネル電流が流れます。トンネル電流が一定になるように針を動かして物質の表面の状態を調べます。これがSTMの原理です。

ています。

超高真空の中で、高融点金属ニオブ(Nb)を気体にし、極低温下(4.2K)のサファイア基板にくっつけます。低温では原子の運動エネルギーは小さいので基板にくっついたニオブはすぐに停止し、基板の表面に薄いニオブ膜ができます。このようにして作ったニオブ膜を使って超伝導になるか実験します。

約3原子層程度のニオブ膜で超伝導が観測されています。そして、熱的に励起される超伝導渦電流の振る舞いがこの超薄膜で研究されています。

また、超伝導体に磁場をかけたとき超伝導電流の渦が規則正しく並びますが、その構造を調べることは興味ある研究対象です。そこで、STMを極低温で働かせて観測する試みが行われています。

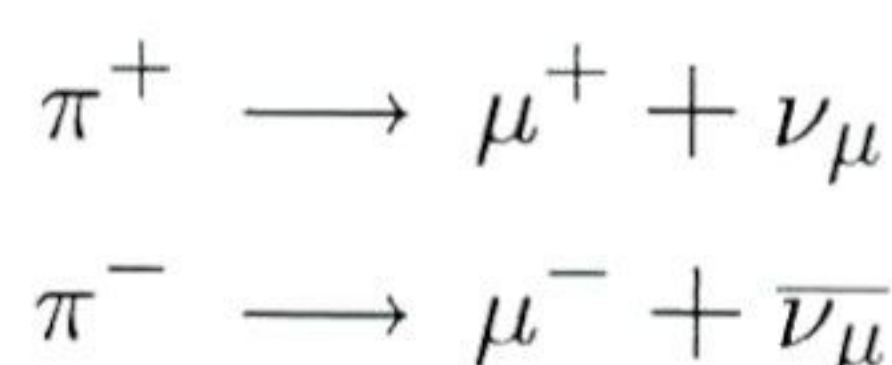
極低温STMは半導体などの表面に吸着した1,2原子層の電子状態、物性を調べる新しい方法で、これから新しい発見が期待されます。



小さな磁石で物質の内部を調べる

もう一つの実験方法にミュオン物性という方法があります。ミュオン物性は10年ほど前から行われるようになった新しい方法です。

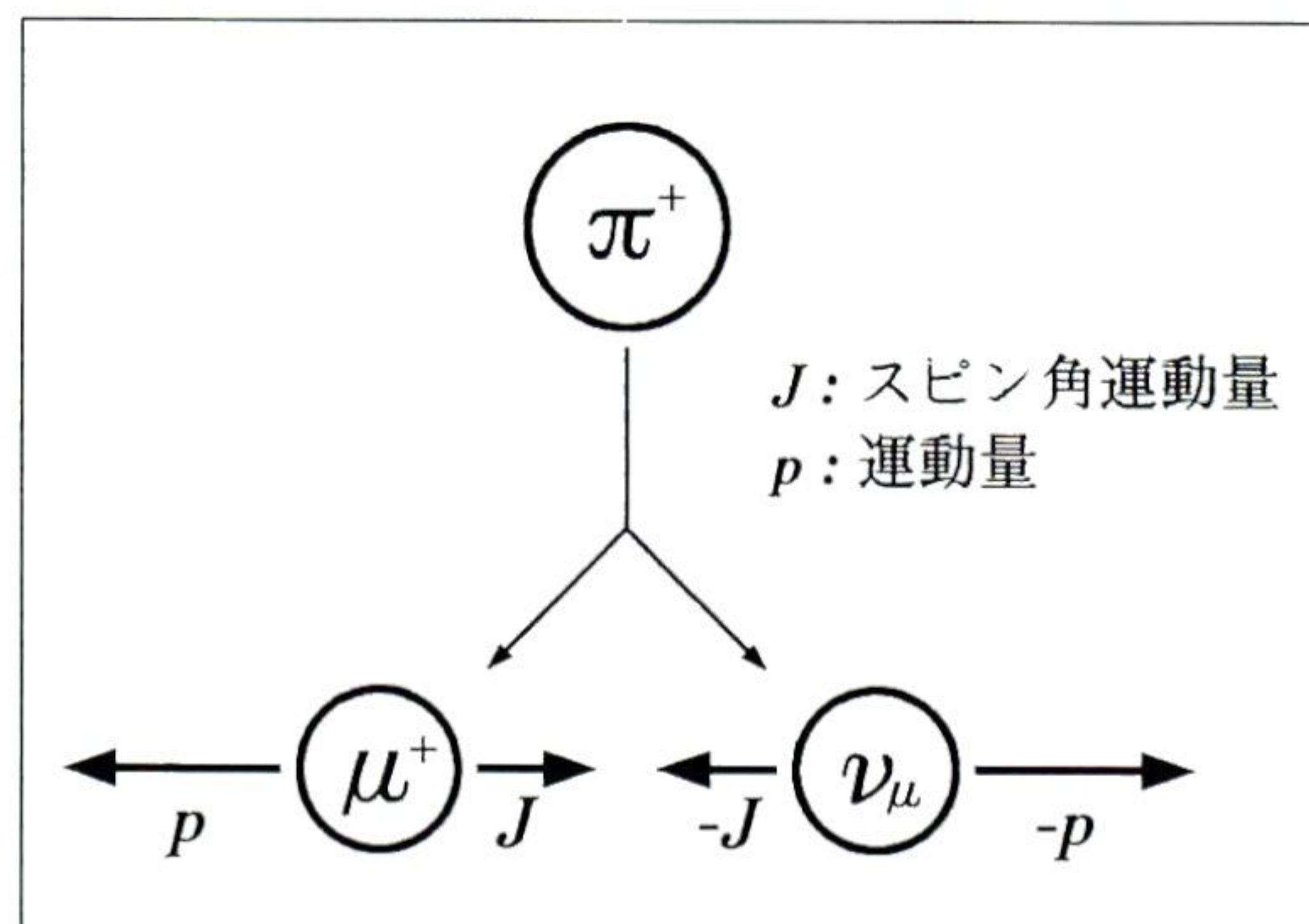
ミュオンとは聞きなれない言葉ではないでしょうか。そこで、ミュオン物性の主役となるミュオンについて少し説明します。ミュオンは素粒子の一種で電子と同じ仲間の粒子です。電子との違いは電子に比べて約200倍も質量が大きいことです。これは、陽子のおよそ9分の1にあたります。また、ミュオンは不安定な粒子ですぐに崩壊してしまうので、人工的に作り出さなければなりません。ところで、 π 中間子は次のようにミュオン(μ)とニュートリノ(ν_μ)に崩壊します。



したがって、 π 中間子を作ればミュオンを作り出すことができます。

静止した π^+ 中間子の崩壊では、運動量保存則によりミュオンとニュートリノはそれぞれ反対方向に飛び出します。また、ニュートリノは特殊な粒子でスピン（自転みたいなもの）が進行方向と逆向きになっています。 π^+ スピンは0なので、角運動量保存則から μ^+ スピンは進行方向と逆向きになります。

ミュオン物性とは、物質を調べるのにミュオンをものすごく小さな検出器として用いる方法です。ミュオンはスピンと電荷を持っているために小さな磁石となります。先に述べた方法で作出したミュオンはスピンが進行方向と逆向きになってい



ミュオンの生成

分裂前の π 中間子は静止しているので、運動量保存則と角運動量保存則から、分裂後のミュオンとニュートリノの運動量とスピン角運動量はそれぞれ逆向きになります。

ます。スピンが一方向に向いているということは、磁石の向きが揃っているということです。磁石ですから、周りに磁場があればその影響を受けます。つまり、ミュオンの運動を観測すれば物質中の磁場を調べることができるのです。

物質の構造を調べる方法には、NMR(核磁気共鳴)といった方法もありますが、ミュオンを使う利点は外部磁場をかけなくても良いことです。なぜなら、超伝導体は強い外部磁場をかけると超伝導でなくなってしまうからです。

西田研のミュオンを使った実験では酸化物超伝導体について調べています。酸化物超伝導体とは近ごろ有名になった高温超伝導体になるもので、金属とは違い酸化物を焼き固めたものです。ミュオンを使い酸化物超伝導体の結晶構造や、結晶中の磁場を調べます。



加速器を使った大がかりな実験

ところで、ミュオンの元となる π 中間子を作り出すには大きなエネルギーが必要となります。そこで、大きなエネルギーを得るのに高エネルギー加速器を使います。加速器とは、粒子を加速して運動エネルギーを高め、他の粒子にぶつけることによって瞬間的に大きなエネルギーを得るものです。加速器はとても大がかりな装置ですから、ど

こにでもあるというものではありません。世界中には数ヶ所の中間子工場(メソンファクトリー)と呼ばれるところがあり、そこでは加速器を用いて大量の π 中間子を発生させています。カナダのバンクーバー、スイスのPSI研究所等が大きなところです。また、日本の筑波にもあります。西田研では主にバンクーバーのTRIUMF研究所と、筑

波の高エネルギー研究所内にある中間子科学センターを使用しています。

ミュオン物性は加速器を使う大がかりな実験です。加速器は共同で使うものですから、実験をするためには実験評価委員会の審査を通らなければ

なりません。海外で実験する場合は研究室の人が何人か現地に行きます。実験データはコンピュータのネットワークを通じて日本に送られ、解析されます。



好奇心と研究の発想

「低温物理で超伝導の研究をしている」といったら、たいていの人は高温超伝導体を開発しているのではないかと思うでしょう。

しかし、西田研の実験のテーマはもっと物理の基礎的なことです。いまさら物理の基礎的な研究をやる必要はないのではと思いませんか。ところが、先生は「納得できないところがある」と言われます。納得がいかないとはどういうことに対してでしょうか。

たとえば、トンネル効果は不思議な現象です。トンネル効果は粒子の持つエネルギーよりも高いエネルギー障壁を粒子が通り抜けてしまう現象です。古典力学ではありえないことです。トンネル効果は粒子が1個の状態では実際に起こることです。では、粒子がアボガドロ数個集まった状態ではどうでしょうか。極低温では物質中の原子は秩序正しいある一つの状態をとります。このような場合には、粒子が集まった状態でトンネル効果を示すことがあるそうです。

また、超流動という現象もあります。超流動は液体ヘリウムだけに起こり、粘性が無くなる現象をいいます。超流動状態のヘリウムをコップに置いておくと、ヘリウムはひとりでにコップをよじ登って流れ出してしまいます。

このように量子力学の問題は、粒子がたくさん集まった状態ではどうなるか予想が付きません。現実の世界では考えられないようなことが起きているのです。そして、低温の世界ではそういった量子効果が目に見えるスケールで起きます。

このような理由から、低温物理というのは物理の基礎的な問題を研究するのに適した舞台なのです。超伝導の研究をしているのは、超伝導現象が量子効果によるものだからです。

西田先生は「人の話は信じるな」とおっしゃいました。といっても、これは人を疑えと言っているわけではありません。少しでもおかしいと思った

ことは信じ込んだりしないで、実際に調べてみる必要があるということです。これが、先生の研究の原動力ではないでしょうか。

また、「嘘か本当かわからないことが面白い」とも言われました。嘘か本当かわかっていたら何もすることがありません。しかし、どっちだかわからないのならば実験する価値があるのです。その実験によってまったく新しいことがわかるかもしれないのです。

実験というと「理論を検証するためにすること」と思われがちです。しかし、物理では実験と理論はそれぞれ別のものです。理論を検証するためだけに実験するのではなく、また、実験結果を説明するためだけに理論があるのでもないのです。根本的な理論の検証のための実験ならばしますが、それ以外の数多くある理論をすべて検証するようなことはしないのです。物性の研究ならば、実験も理論も物質の性質を調べるのが目的で、そのための手段が違うだけなのです。

「怒ってかっとなっているときには誰でも同じような行動を取ってしまう。その人の個性が現れるのは冷静になっているときだ。物質は温度が高いときにはどれも同じようだけど、温度を下げるとその物質固有の性質が現れてくる。そう考えると人間の性質も物質の性質も良く似ている」このようなたとえ話を交えながら先生はご自身の研究について説明してくれました。また、今回は研究室の引っ越しという忙しい時期でしたが、取材のために時間をさいていただきました。今後、新しい研究室でのご活躍をお祈りいたします。

(市沢)