

## 家先生よりミニレポート(11月5日)の質問・感想への回答

### ●全般的な質問や感想

(1)物性物理学の講義として細部の説明が多かったので、もう少し「宇宙の誕生から現代まで」の中での位置づけが分かると理解が深まる

【物質の構成要素である元素の起源】 ビッグバンの初期に水素やヘリウムなどの軽元素が創られ、その後に星の中での核反応によってより重い元素が創られ、それらが超新星爆発によって宇宙にばらまかれました。これらの元素の組み合わせによって多種多様な物質が存在し、多彩な性質を示すわけです。

【物理学の概念としての関連】 物性物理学の研究の中には、素粒子論(場の理論)や宇宙論に登場する理論モデルと概念的数学的に共通する物も少なくない。重要な物として(限られた講義時間では、それぞれの概念の内容まで説明することはできませんでしたが)「くりこみ」、「対称性の自発的破れ」、「漸近的自由性」、「トポロジカル欠陥」、「カイラル秩序」などを挙げるすることができます。これらの言葉を記憶の片隅に留めておいて、いつか機会があったら勉強してみてください。きっと魅了されるはずですよ。

【物性科学の成果の応用】 物性科学で明らかにされた物質の性質の中には工学的応用がなされるものが少なくなく、それらは現代社会はもちろんのこと最先端の研究現場においても重要な役割を果たしています。

(2)物性物理学という学問の不思議さ、を聞きたい

限られた講義時間では伝えきれませんが、超流動、超伝導、量子ホール効果、単電子トンネル効果、レーザー冷却、などの言葉を記憶の隅に留めておいてください。

(3)電子の振る舞いで、固体の構造や性質が決まるのがイメージできた

物質科学の「さわり」を多少なりとも伝えることができたなら嬉しく思います。

(4)個々の原子や分子の性質が、物質全体の理解にどのように寄与しているのか

物質は原子や分子の集合体なので、原子や分子の性質が基本です。原子や分子の性質はその詳細に至るまでわかっているケースが殆どですが、講義で述べたように、構成要素がわかったからといってそれらの集合体の性質が直ちにわかるというものではありません。そこに物性物理学の課題と面白さがあると言えるでしょう。

(5)物性物理と化学(高校で習ってきた化学)とはどこが違うのか

高校の化学では、おそらく元素の話と化学反応などの現象の記述的な扱いが主であって、「なぜそのような現象が起こるか」ということを物理学の基本法則から解き明かすという志向は無かったのではないかと思います。講義でも述べたように、「物事を根本原理から論理的に理解する」というのが物理学の精神です。

(6)数学的知見から物理発見が得られる事例は想像できるが、物性物理研究から数学分野への刺激や知見が得られる事例があるのか

「数学的知見から物理発見が得られる」というケースはむしろまれです。物理学は実験科学なので実験・観測から従来の理論体系では説明できない事実が発見され、それを解明する試みのなかから新しい展開が生まれます。物性に限らず物理学の研究が数学の新しい展開を刺激することもしばしばあります。

(7)文系でも分かるような、入門書を教えて欲しい

入門書という意味では

- ・講談社ブルーバックス「物性物理の世界」伊達宗行著
- ・連載講座「アリスの量子力学」家 泰弘 パリティ誌(物理科学月刊誌 丸善)2005年4月～2006年3月号
- ・「物性科学のすすめ」(培風館)・・・ただし絶版 図書館で探してください。

を紹介しておきましょう。講義で「少し宣伝」と言って挙げたのは  
・「21世紀の物質科学」物性研究所編（培風館）  
ですが、これは理系の学生さん向けです。

## ●超伝導

(8)超伝導の話も聞きたい

第3回でお話する予定です。

(9)NHKで、鉄は超伝導しにくいと考えられていた、と言っていたが、どうしてそうだったのか

一般に、磁性と超伝導とは相容れない性質です。多くの金属は絶対零度において磁氣的秩序を示す(強磁性または反強磁性)か、あるいは超伝導になるか、のどちらかになります。強い磁性を示す鉄は超伝導にはならないわけです。ただし、物事はそう単純ではなく、例えば鉄に高い圧力をかけると通常の鉄とは別の結晶構造になって、その構造では磁性が消えて超伝導が出るということが知られています。また最近発見された LaFeAsO という物質は主成分として鉄を含んでいながら~50K という高温で超伝導になるので大変注目を集めています。

(10)高温超伝導はあるのか？

質問の趣旨は「室温超伝導はあるのか？」の意味かと推察します。いわゆる高温超伝導が発見される以前は、超伝導が起こる温度は高くても30K 止まりと考えられていました。(なぜ30K 止まりかを説明する最も美しい理論もありました。)ところが実際に30K を超える超伝導、さらには100K を超える超伝導が発見されて事情が一変しました。これまでのところ超伝導転移温度の最高は絶対温度で160K(摂氏で言えば-140℃)です。物質の無限の可能性を思えば、「これ以上の物はない」と考える理由はありません。室温超伝導があるかどうか、何とも言えませんが、「無いという理由はない」というのが現時点での妥当な答えでしょう。

## ●磁性

(11)なぜ磁性が生まれるのか

講義で述べたように、物質を構成する原子の中にはマイクロな磁気モーメントを持つものがあり、それらの相互作用によって多種多様な磁氣的性質(磁性)が生じます。

(12)そもそも磁気モーメントとは如何なるものなのか

電気の場合には+電荷と-電荷があります。+電荷と-電荷を少し離して置いたものは全体として中性(電荷ゼロ)ですが、電場に対して向きをそろえるような力が働きます。これを電気双極子モーメントと言います。磁気の場合には単独のN極やS極は存在せず、磁気双極子モーメント(いわばマイクロの棒磁石)という形をとります。電子のスピン(自転)には磁気モーメントが付随します。

(13)地球の磁場が変化したことがあると聞いたことがあるが、それはなぜ起こったのか

地磁気への主な寄与は、地球のコア部分(金属鉄)に流れる電流によって発生する磁場と考えられています。もちろん電流は抵抗によって減衰しますから、この電流を維持する何らかの発電機構があるはずですが、それはコアの大部分を占める熔融鉄の熱対流によるダイナモ作用によると考えられています。地質学的時間スケールでは地球磁場は大きな変動を繰り返しており、N極とS極がしばしば逆転したりもしています。

(14)永久磁石は、鉄・ニッケル・コバルト以外では作れないと聞いたが、それはなぜか

それは正しくありません。単元素でも、ランタノイド系列の Sm, Gd, Ndなどは強い磁性を持ちますし、Feの隣にある Cr や Mn などの化合物にも強磁性を示すものがあります。それらの化合物は多種多様なものがあって、遷移金属やランタノイドなど、磁性を示す元素に特徴的なのはd軌道やf軌道が中途半端に詰まっていてそれらの電子のスピンが打ち消されずに残っている、という点にあります。

(15)永久磁石が、なぜスピが一方向に揃った状態を常に保っているのか

隣り合うスピンの間に強磁性交換相互作用(つまり同じ向きにそろえる力)が働く系では、全ての原子のスピ(磁気モーメント)が同じ向きにそろう傾向があります。そろった全磁気モーメントは結晶方位などとの関係からある方向に固定されます。このことによって、磁場がゼロでも結晶全体の磁気モーメントがある方向にそろうわけです。

(16)マイクロな磁石の向きが、同方向を向く、逆方向を向く、というのは何が決めているのか

マイクロな磁石の間の相互作用が強磁性的(同方向を向きたがる)になるか、あるいは反強磁性的(逆方向を向きたがる)になるか、を決める要因にはいろいろあるので一言では説明できません。要するに、スピが同じ向きの状態と逆向きの状態とでクーロン相互作用エネルギーがどちらが低くなるか、で決まります。

(17)なぜ鉄が磁石に引きつけられるのか(マイクロな視点で)

普通の(磁石になっていない)鉄はその中に強磁性の磁区ができており、各々の磁区の磁化の向きがさまざまであるために全体としての磁化が打ち消しあってマクロなスケールでは磁化が現れていません。磁石を近づけるということはその磁石が発生する磁場をかけることになります。その磁場によって鉄の中の磁区の配置が変化して、全体としての打ち消し合いのバランスが崩れてマクロな磁化が発生し(つまりそれ自身が弱い磁石となり)、磁石に引きつけられるわけです。

(18)温度が下がると磁気の秩序の相互作用が安定するのはなぜか

相互作用の強さが温度によって変化するわけではありません。温度が下がると、その相互作用のエネルギーを最低にする(つまり安定な)状態が実現する、ということです。別の言い方をすれば、温度が上がるとマイクロな磁気モーメントはそれぞれ好き勝手な向きを向くようになって、秩序状態が破壊されるわけです。

(19)酸素分子が磁性を持っているということは、我々の周りの酸素は磁石に引きつけられているのか。

通常の条件では効果として大きくはありませんが、そのとおりです。

(20)液体や気体で磁性を持つものはあるのだろうか

例えば酸素分子は磁気モーメントを持っていますので、酸素ガスや液体酸素は磁性を持っていると言えます。ただし磁石になっている(強磁性)というわけではありません。また、純粋な液体というわけではありませんが、強磁性微粒子をコロイド状に懸濁した「磁性流体」というものもあります。

## ●電子スピン

(21)スピンをどう考えればいいのか。自転のようで、でも少し違うというが、よく分からない。またスピンの向きが変わるとは、どのような意味なのか

スピンは量子力学的な性質なので、日常的な言葉で適切に表現することはできません。「自転」というのは一つの比喩と考えてください。スピンには角運動量が付随するので自転というイメージはそう悪くはありません。古典力学の自転ならば、その回転軸と回転速度は連続的な値をとることができますが、スピンは違います。電子のスピン角運動量のある方向(たとえばz方向)に沿って測定すると、 $+1/2$ か $-1/2$ のどちらかの値しか得られません。別の方向(たとえばx方向)のスピン角運動量を測定してもやはり $+1/2$ か $-1/2$ のどちらかの値しか得られません。これは直観的にイメージしにくいことですが、量子力学ではそうなっている、としか言えません。

(22)電子スピンはどのように発見されたのか。観測されたのか。

電子がその空間的運動以外に何らかの内部自由度を持っているということは、原子の分光学(スペクトロスコピー)の研究から推測されました。スピン(とそれに付随する磁気モーメント)の存在を実験的に明らかにしたのはシュテルンとゲルラッハによる実験で、彼らは銀の原子ビームを空間的に勾配のある磁場の中を通すと、ビー

ムが2つ(スピンの上向き状態とスピンが下向き状態)に分裂することを見いだしました。

(23)電子スピンの量子コンピュータへの応用はどの程度進んでいるのか

量子コンピュータの実現には多くの乗り越えなければならないハードルがあります。通常のコンピュータの情報記録単位であるビット(bit)、つまり0か1の状態を取るもの、に相当する「量子ビット(qubit)」を実現することはいろいろな方法でできていますが、量子計算を行うにはそれらを数多くならべて、相互作用させる必要があります。もっとも困難なのは計算の途中に外部からの擾乱によって量子的相関が失われてしまうこと(デコヒーレンスと言います)です。これについてはまだ十分な進展がありません。また、量子計算の初期状態を創ること、計算結果を読み出すこと、なども大きな課題です。「応用」と言う段階ではなく、極めて基礎的な研究が行われている段階です。

●バンド構造

(24)バンド形成の部分の説明が分かりにくかった

この部分は物性物理学の根幹の部分ですが、確かに決してとっつきやすくはありません。ただ、原子がたくさん集まったときにエネルギー準位がどのように組み替わるか、という視点で考えれば理解できると思います。

(25)絶縁体に圧力を加えると、なぜバンド帯が広がるのか

圧力によって原子間の距離が縮まると、それぞれの原子に属する電子雲の重なりが大きくなり、電子の飛び移りの確率が大きくなるため、バンド幅が広がります。

(26)バンド構造の話で、「準自由」の中に出てくる「周期的」の意味が良く分からない

結晶の中の電子は自由空間ではなくて、周期的に原子が並んでいる空間のなかを走り回るわけです。電子にとっては、周期的な凹凸のある土地を走るようなものです。

●その他

(27)相転移と物性とは、どのように関係しているのか

質問の意図が必ずしも明らかではありませんが、物質の状態が質的な変化を遂げる「相転移」は物性物理学の中心的テーマと言えます。一般に物質は十分低温では何らかの秩序を示します。温度の変化や外場(圧力、磁場など)によってある秩序状態から別の秩序状態、あるいは秩序状態から無秩序状態へと変化するのが相転移です。相転移が起きるところを臨界点と言います。臨界点の近くでのふるまいには物質によらない美しい普遍性があります。

ちなみに宇宙開闢のビッグバンも一種の相転移と言えます。

(28)周期律表の下のところに書かれている元素(ランタノイド、アクチノイド)はどのようなものなのか。なぜ別のところに書かれているのか。

「遷移金属」は、軌道角運動量量子数が $L=2$ の「d軌道」が順に埋まってゆく部分です。ランタノイドやアクチノイドという一連の元素は軌道角運動量量子数が $L=3$ の「f軌道」が順に埋まってゆく部分です。ランタノイド系列は4f軌道、アクチノイド系列は5f軌道が埋まってゆくところでは、

(29)条件によって絶縁体を導体にできるなら、逆に金属を特殊な条件下で絶縁体にするにはできるのか

金属を絶縁体にするのももちろん可能です。いろいろなケースがあります。例えば、金属に強い磁場をかけることによって絶縁体になる場合があります。また、一般に金属に「乱れ」を入れてゆくと電子が動きにくくなり、十分大きな乱れを導入すれば金属が絶縁体になることが知られています。

- (30)軌道に電子が入る際に、何らかの外力をかけて、エネルギー順位を無視した位置に入れることは可能か。可能であれば、できた原子は元のものとは異なる性質になるのか  
エネルギー準位というのは電子が採り得る状態のことを指しているので、「それ以外の位置に入れる」というのは概念的に無い話です。外力(例えば非常に強い電場や磁場)がかかった場合には、エネルギー準位そのものが変化する、というのが正しい言い方です。また例えば光(高い振動数で振動する電磁場)を照射することによって、電子があるエネルギー準位から別のエネルギー準位に飛び移る(遷移する)ということも起こります。
- (31)結晶構造を考える上で、原子は球であると考えてよいのか  
球と考えてよいのは、電子が原子軌道をちょうど詰まった状態に相当する希ガス原子、あるいは、 $\text{Na}^+$ や  $\text{Cl}^-$ など希ガス原子と同じ電子配置をもつイオン、の場合です。一般の原子では必ずしも球(つまり「等方的」)ではなく、一番外側にある電子の軌道の形状(別の言葉で言えば電子雲の広がり方)を反映したものになります。
- (32)絶対零度では粒子の運動がとまるはずなのに、ヘリウムはなぜ流体となるのか  
大変よい質問です。量子力学には不確定性原理というものあり、古典力学(ニュートン力学)のような意味合いで粒子が空間の1カ所にじっと留まっていることはできません。粒子を狭いところに閉じこめると、最低エネルギーの状態でも粒子は「零点振動」という運動を行います。この零点振動は軽い粒子ほど激しくなります。周期律表の一番上にあるヘリウム原子は軽いので零点振動の効果が大きいため、常圧では絶対零度においても固体にならないわけです。
- (33)半導体でドナーを加えたものがn、アクセプターを加えたものがpとされていたが、これらは何かの頭文字なのか  
ドナーを加えた半導体ではドナーから供給される電子(負の電荷)が電気伝導を担うので、negativeの意味でn型半導体と称します。逆にアクセプターを加えた半導体ではアクセプターが電子を収容することによって生ずる電子の孔(正孔)が伝導を担うので positive の意味でp型半導体と呼びます。(「アクセプターが正孔を供給する」という言い方をしてもよい。)
- (34)電子が取り得ないエネルギー範囲ギャップはどうしてできるのか理解できなかった  
孤立した原子では電子が取り得るエネルギーは離散的(跳び跳び)であり、ほとんどのエネルギー値は電子が取り得ないエネルギーになります。講義で述べたように、そのような原子を並べると原子間の電子の跳び移りが起こるために取り得るエネルギーの範囲が広がります(バンドの形成)。その場合でも、一部のエネルギー範囲は電子が取り得ない「ギャップ」として残ることになります。
- (35)半導体、絶縁体等の技術が、現在のどのように応用されているのか  
講義でその一端を述べたように、電化製品、自動車など身のまわりの製品、さらには社会のインフラである電力、交通、情報などあらゆるものに使われています。
- (36)なぜ青色発光ダイオードの開発は、他色に比べて遅れたのか  
赤や黄色の光に比べて波長の短い(つまりエネルギーの高い)青色の光を出すにはエネルギーギャップの大きな半導体(ワイドギャップ半導体と言います)が必要です。開発が遅れたのは、ワイドギャップ半導体の高品質結晶を作製することが技術的に難しかったためです。