



「リー群の離散部分群」

金井 雅彦 (数理学研究科 教授)

代数構造と幾何構造、これらを共に有するのがリー群である。少々乱暴な言い方をすればこうだろう。最も簡単な例はユークリッド空間 \mathbb{R}^n である。とくに $n=1$ の時には直線、 $n=2$ の時には平面に他ならない。ユークリッド空間はもちろん幾何学の対象である。いっぽう、 \mathbb{R}^n の要素(点)は n 個の実数の組、すなわち n 次元ベクトルであり、そのふたつの要素に対し和が定義される。これが \mathbb{R}^n の代数構造である。より面白い例として、行列群が挙げられる。たとえば、行列式の値が1の実 n 次正方行列全部の集合 $SL(n, \mathbb{R})$ はリー群である(代数構造としては行列の積をとる)。物理にもしばしば登場するリー群であるが、その最大の強みは微積分を利用して代数構造を記述できる点にある(それを可能た

らしめるのは結局のところ幾何構造である)。

次にリー群の離散部分群について、例をとり説明しよう。ユークリッド空間 \mathbb{R}^n の要素であってその座標が整数であるものの集合を \mathbb{Z}^n と書く。和に関し \mathbb{Z}^n は閉じている。このようなものを部分群という。とくに、 $n=1, 2$ の場合には \mathbb{Z}^n を \mathbb{R}^n の中に図示することも可能である。部分群 \mathbb{Z}^n が \mathbb{R}^n の中に離散的に分布している様子が見てとれよう。このようにリー群の中に離散的に分布している部分群を離散部分群とよぶ。行列式の値が1であり、しかも成分がすべて整数であるような行列の集合 $SL(n, \mathbb{Z})$ は、 $SL(n, \mathbb{R})$ の離散部分群である。

リー群の離散部分群であって、リー群全体に「一様」に分布しているものを、

特に格子とよぶ。代数学に限らず、幾何学、力学系理論など、それが関わる分野は数多い。1960年前後から格子に対する研究が活発に行われるようになり、その後わずか十年少々の間にそれに対する理解は飛躍的に増大した。20世紀数学の中でも最も華々しい出来事のひとつではなかろうか。当時得られた特に重要な成果のひとつが、G. D. モストウ (George Daniel Mostow) の強剛性定理である。 $SL(n, \mathbb{R})$ などの非コンパクト単純リー群はその格子で完全に決定されることを(妥当な仮定のもと)強剛性定理は主張する。離散が連続を統制できることを保証するのがモストウの定理であると解釈することもできる。



「高調波」

酒井 広文 (物理学専攻 准教授)

振動現象の基本振動数 ω をもつ成分に対し、その整数倍の振動数 $n\omega$ (n は2以上の整数)をもつ成分を「高調波」とよぶ(ここでは簡単のため角振動数 ω を単に振動数とよぶ)。また、基本振動数 ω をもつ成分を基本波とよび、振動数 $n\omega$ をもつ成分を第 n 高調波とよぶ。周期性をもつ任意の振動波形は基本波とすべての高調波成分を含むフーリエ級数展開で表すことができ、その係数はフーリエ解析の手続きにより決定される。非線形特性をもつ電子回路に正弦波信号を入力すると、その振動数の高調波成分を含む歪み波が発生する。音の場合はとくに、基本波を基本音、第 n 高調波を n 倍音とよび、2倍の振動数までの範囲をオクターブとよぶ。楽器が奏でる音(楽音)が楽器ごとに異なる音色をもつのは楽器ごとに倍音の含まれ方が異なるためである。

いっぽう、光の高調波は1960年にルビーレーザーが発明された翌年にルビーレーザー光を集光した水晶中からの第2高調波の発生が報告され、1967年には

希ガス中からの第3高調波の発生も報告された。とくに注目すべき現象は、超短パルス高強度レーザー光を気体原子や分子に照射したときに観測される、元のレーザー光の波長の数十分の一から数百分の一(反転対称性をもつ媒質中では奇数分の一)の波長をもつ「高次高調波」の発生である。高次高調波発生は、高強度レーザー電場と原子分子との相互作用に特有な高次の非線形光学効果のひとつであり、高調波強度がほとんど変化しない広いプラトー領域を伴うことを特徴とする。高次高調波の研究の歴史は1987年まで遡り、当初は高次高調波発生の物理過程の解明と元のレーザー光と同等以上のコヒーレンス(光の位相が揃った可干渉性のよい性質)を有する波長可変コヒーレント極端紫外～軟X線光源開発を目指した研究が進められた。1993年には高次高調波の発生メカニズムを説明する3ステップモデル(理学のキーワード第23回「3ステップモデル」参照)が提案された。また、高次高調波の波長は水中の生体分子のX線イメージング

を可能とする「水の窓」領域(2.3 nm～4.4 nm)に達している。

21世紀に入り、高次高調波に関する研究は大きく分けて二つの潮流となります。ひとつはますます盛んになっている。ひとつはアト秒パルス(1アト秒=10⁻¹⁸秒)の発生(理学のキーワード第32回「アト秒パルス」参照)とその応用である。アト秒パルスの発生は、波長が短く(たとえば波長30 nmの光の1周期が100アト秒である)広いバンド幅(超短パルスの発生にはそのパルス幅の逆数程度の広いバンド幅が必要である)を利用できる高次高調波を用いる研究が主流となっており、最近77アト秒パルスの発生が報告された。もうひとつの潮流は、配列あるいは配向した気体分子中から発生する高次高調波の観測から分子の構造と超高速ダイナミクスを明らかにする研究である。筆者の研究室では、気体分子の配列・配向制御技術の高度化を進めるとともに、後者に関する研究を進めている。



「晩期型星」

宮田 隆志 (天文学教育研究センター 准教授)

夜空に輝く恒星は多様であり、その性質は主に星の質量と誕生してからの進化の度合いによって決まる。恒星の分類は20世紀初頭に確立したハーバード法を基礎としている。その中で星の温度が比較的高くヘリウムや水素のラインが目立つものを早期型、対して温度が低くスペクトル上に金属の吸収線が多数見えるものを晩期型とよぶ。晩期型の星は、中心部で安定した水素燃焼をしているものの質量がもともと低いため表面の温度が低い矮星と、中心部での水素燃焼を終え外層が大きく膨らんだ巨星とに分かれる。銀河系の大半の星は晩期型矮星であり、太陽もその仲間である。また太陽の8倍以下の質量の恒星は進化末期にすべてこの晩期型巨星段階を通ると考えられている。その意味で晩期型星はわれわれに最も馴染みある恒星種だといえる。

従来、恒星といえば望遠鏡を通して

みても点にしか見えない存在であったが、近年の観測技術の発達は星そのものの空間分解も可能にしつつある。たとえばヨーロッパ南天天文台の赤外線干渉計VLTiでは0.01秒角を切る空間解像度で晩期型巨星表面の構造をとらえている。このような観測によって晩期型巨星の少なくとも一部は平坦な球面ではなく、非軸対称な姿をしていることが分かってきた。太陽もやがてはこのような巨星へ進化すると考えられており、この結果は太陽がどのように進化していくかを探る上でも興味深い。

晩期型巨星は宇宙空間にあまねく存在する星間ダストの供給源としても重要である。特にわれわれの住む天の川銀河ではダストの多くはこれら晩期型星が供給していると考えられている。このようなダスト形成史を探るには低温度(<1,000 K)領域のトレーサーである中間・遠赤

外線が有用である。日本の赤外線観測衛星「あかり」は晩期型巨星から放出され広がっていくダストシェルの直接撮影を行い、シェルが幾何学的に薄い球殻のような構造をしていることを明らかにした。これは質量放出現象が短期間に間欠的に行われていることを示唆しており、恒星から宇宙空間への物質還元を考えるうえで重要な結果である。将来の衛星計画や地上望遠鏡計画でより高感度かつ高解像なデータが得られれば、宇宙の物質循環がどのように行われているかについてより詳しい描像が得られるものと期待できる。

理学系研究科では著者の研究室や木曾観測所、天文学専攻の尾中研究室で観測研究が行われている。またダスト形成の観点から地球惑星科学専攻の永原研究室でも実験研究が進められている。



「超高压」

船守 展正 (地球惑星科学専攻 准教授)

地球や惑星の内部は、探査機を送り込むことのできない超高压高温の世界である。その圧力温度は、地球中心で360 GPa・6000 K、木星中心で5000 GPa・20000 Kにも達する(1 GPa ≒ 1万気圧)。与えられた圧力温度環境下において、物質はギブスの自由エネルギー $G = U + PV - TS$ を最小化するように振る舞う(U : 内部エネルギー, P : 圧力, V : 体積, T : 温度, S : エントロピー)。地球表面では U が支配的であるが、地球や惑星の内部では PV 項(と $-TS$ 項)の寄与が重要になる。例えば、ケイ酸塩中のケイ素は、地球の上部マントルでは4個の酸素に囲まれた4配位の状態であるのに対し、下部マントルでは6個に囲まれた6配位になる。これは、結合エネルギー的に有利な sp^3 混成軌道から充填率の高い構造をとる上で有利な

sp^3d^2 混成軌道への変化(圧力誘起相転移)として理解できる。木星内部では、流体水素が分子解離して金属化し、ダイナモ効果によって強力な磁場を作り出しているものと考えられている。

超高压科学の研究は、20世紀初頭のブリッジマン教授(P. W. Bridgman; 1946年ノーベル物理学賞受賞)による10 GPa級の高圧発生装置の開発にさかのぼる。20世紀後半には、ダイヤモンドアンビル装置が開発され、改良を重ねられた結果、現在では地球中心を超える400 GPa領域までの静的圧縮が可能になっている。さらに高い圧力の発生もレーザー衝撃などの動的圧縮によって可能である。

超高压の静的な発生は、小さな面積に大きな力を加えることで実現される。高圧装置内の微小試料に対する測定に威力

を発揮してきたのがシンクロトロン放射光X線である。放射光源の高輝度化により、現在では結晶だけでなく、液体やガラスの相転移まで観察することが可能になっている。さらに、次世代放射光源の計画が実現すれば、エミッタンスやコヒーレンスなどの光の質の向上も見込まれる。その特色を活かした技術開発が進めば、物質の平均的な構造(規則性を持つ構造)だけでなく、詳細な構造のより直接的な測定が可能になるなど、飛躍的な発展が期待される。

筆者の研究室では、放射光実験のほか、ミュオン実験などに取り組んでいる。理学系研究科では、中性子実験(地殻化学実験施設)や計算機による第一原理分子動力学シミュレーション(物理学専攻)など、様々なアプローチで超高压科学の研究が行われている。



「磁性半導体」

福村 知昭 (化学専攻 准教授)

磁性半導体とはその名の通り磁性をもつ半導体で、半導体程度のバンドギャップをもった遷移金属を含む物質である。なかでも最近さかんに研究されているのは、通常の半導体に少量の遷移金属をドーピングした希薄磁性半導体である。少量のドーピングのため母体の半導体のバンド構造が保たれており、空間的に離れた遷移金属のもつ局在スピンの相互作用を(スピン1/2をもつ)キャリアが交換相互作用により媒介することで強磁性を生じる。このような強磁性を示す半導体は、電子のもつ電荷とスピンの自由度の両方を用いて高機能な電子デバイスを実現するスピントロニクスなどの分野への活用が期待される。たとえば、不揮発な情報であるスピンを磁場ではなく電気的手段で制御することができる。しか

し、少量の遷移金属ドーピングでは交換相互作用の大きさも限られており、強磁性転移温度(キュリー温度)は最も高いとされていたMnドーピングGaAsでさえ室温を約100℃下回っていた。

酸化物半導体は大きなバンドギャップをもつ。すなわち可視光に透明だが良好な電気伝導性を示すため、液晶ディスプレイ内部の透明トランジスタなど透明電子デバイス材料として活用されている。その大きなバンドギャップは酸化物半導体中のキャリア(主に電子)の有効質量が重いことを意味する。したがって、酸化物半導体に局在スピンをドーピングすれば、キャリアと局在スピンの大きな交換相互作用による高温強磁性の発現が期待でき、透明磁石材料の実現の可能性がある。実際に、Coをドーピングした酸化物

半導体TiO₂の室温強磁性が2001年に発見された。最近、電界効果を用いたキャリア量の増減による室温強磁性の制御が実現し、室温強磁性をキャリアが媒介していることが明らかになり、室温動作スピントロニクスへの道が開けた。しかし、少量のCo濃度で約400℃ものキュリー温度が発現する理由は今も明らかではない。

本研究科では化学専攻の長谷川哲也教授の研究室で、われわれがCoドーピングTiO₂の薄膜試料を作製して基礎物性やデバイス応用に関する研究を行っている。物理学専攻の藤森淳教授の研究室では、放射光設備を活用した分光実験研究によりCoドーピングTiO₂の室温強磁性の発現メカニズムに迫る研究を行っている。



「代謝, メタボローム」

有田 正規 (生物化学専攻 准教授)

代謝とは細胞内における物質生産やエネルギー生成をつかさどる物理化学反応の総称で、一般に新陳代謝とよばれるプロセスと同じである。代謝によって生成・消費される物質を代謝物とよぶ。メタボローム(metabolome)とは「代謝物の総体」という意味で、メタボリズム(metabolism)という英語表記と総体を意味する接尾辞のオーム(ome)からなる造語である。また、代謝物の総体をそれらの生成・消費・化学変化を含めて研究する学問がメタボロミクス(metabolomics)である。定義からはDNAなどの核酸やタンパク質もすべてメタボロームに含まれるが、それぞれゲノム(gene + ome)、プロテオーム(protein + ome)とよばれている。メタボロームという場合、通常はペプチドより小さい分子(分子量50~1000)、例

えば糖・有機酸・核酸・脂質などを対象とする。

代謝の研究は古くて新しい。酵素やDNAの正体が明らかになったのは20世紀に入ってからだ。アミノ酸のアスパラギン酸がアスパラガスから抽出されたのは1806年である。その後、天然物化学や薬学において多くの代謝物が発見・研究された。1930年代以降、細胞内物質の生成・消費プロセスが精力的に調べられ、現在は3000を超える酵素反応のパターンや、その生化学ネットワークが知られている。それにもかかわらず、細胞内にどのような代謝物がどれだけあるのかは、大腸菌においてすら分かっていない。個々のバクテリアが3000程度、植物界全体で20万種類などと適当な憶測もされているが、代謝物の数え方すら統一されていないのが実情である。

ゲノムやプロテオームはそれぞれ核酸、アミノ酸という決まった構造のポリマーを扱う学問だが、メタボロームは物理化学的性質が様々に異なる対象を扱う。そのため、単一の測定機器や手法で全体像を把握できない。最近では、細胞内の代謝物をできるだけ幅広く正確に測定する機器開発と、複数の測定機器による計測結果を統合する技術開発が注目されている。筆者の研究室では、データベース構築を含め代謝物の同定技術を研究テーマにしている。同定できる代謝物数は現在数百に過ぎないが、これを数千にスケールアップできれば、ゲノム・プロテオーム情報と並んで生命現象を解明するための情報基盤になるだろう。