

# サイエンス・ピククス

# 空間反転対称性の破れた超伝導

物理学専攻 准教授 木村 憲彰

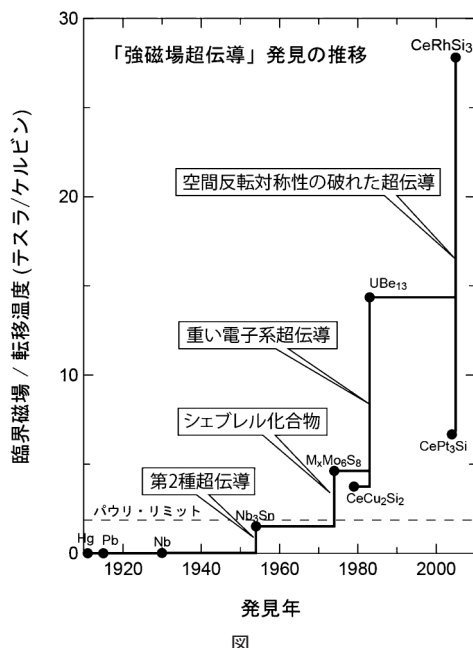
超伝導とは、ある温度以下で電気抵抗が突然ゼロになる現象である。今からさかのぼること一〇〇年ほど前の一九一一年にオランダのカマリン・オンネスによって発見された。当時は量子力学の黎明期で、超伝導の主役である固体中の電子の性質はおろか、電子１個の性質すらまだよくわかっていなかった。そのため、この現象の解明には実に四十六年という長い歳月がかかった。その間、実験、理論両面で超伝導に対する理解を積み重ね、一九五七年、いわゆるBCS理論の出現によって超伝導の基本的な機構について理解されるに至った。現在では、超伝導は「巨視的な量子現象」が顕著に表れる物理現象として物性物理のハイライトの一つとなっている。

超伝導であろう。一般的に超伝導は1ケルビン程度の極低温で、おきる相転移現象で、温度が上がると超伝導が不安定になるとされている。超伝導が安定に存在できる限界の温度は、BCS理論からは30〜40ケルビン程度とされており、BCSの壁と呼ばれている。高温超伝導はこのBCSの壁を軽々と破ってしまったのだ。現在では転移温度が25ケルビンの物質が見出されている。高温超伝導の発現機構は今もって解明されておらず、今日においても盛んに研究されている。

超伝導は磁場にも弱いことが知られている。これは、超伝導を形成する電子が上向きスピンの下向きスピンの二つの電子で

対を形成しているため、磁場によってスピンの向きをそろえられてしまうため、この対が壊されてしまうからである。対が保たれる限界の磁場をパウリ・リミットと呼んでおり、超伝導の臨界磁場は、このパウリ・リミットを超えることがないとされてきた。ちょうど転移温度でいうところのBCSの壁の臨界磁場版のようなものとなっている。

このパウリ・リミットもあるとき破られてしまう。図に、超伝導臨界磁場を転移温度で割った、いわゆる「高磁場超伝導」の発見年表を示す。超伝導が発見されてすぐのころは、あまり高い臨界磁場の物質は見出されていない。BCS理論以降、化合物で高い臨界磁場を持つもののが多数見いだされ、現在の超伝導磁石の材料として応用されている。ここまではパウリ・リミットを超えてはいないので、「予言」とおりである。この壁を打ち破ったのは、シエブル



化合物をはじめとするいわゆる磁性超伝導体である。これは、化合物を構成している磁性元素の交換相互作用が外部磁場を打ち消すために臨界磁場が増強されるのであって、超伝導電子はあまり強い磁場を感じていない。したがって本質的にはパウリ・リミットを超えてはいない。真にパウリ・リミットを破ったのは、重い電子系の超伝導の発見である。重い電子というのは、局在磁性電子と伝導電子の強い相関によって電子の有効質量が自由電子の一〇〇倍から一〇〇〇倍に増強されることをいう。この時、重くなった電子は自由電子からかけ離れた性質をもち、重い電子で形成された対も磁場に対して「鈍感」になると考えられている。この重い電子系の超伝導の発見から二十五年ほどたって、私たちのグループでこれまでの記録を大幅に更新する重い電子系超伝導体を見つけた。この物質はこれまでの重い電子系超伝導体と違

い、結晶の空間反転対称性が破れているというのが特徴で、原理的にパウリ・リミットが存在しないことが高い臨界磁場の原因の一つと考えられている。空間反転対称性の有無は、結晶内の原子位置 $\vec{r}$ を $-\vec{r}$ に移したときと同じ原子の位置と一致するような点が存在するかどうかで決まる。この性質の有無で、超伝導の性質が劇的に変わるといふのが大変面白い。

このように、空間反転対称性の破れが物質の性質を大きく左右する例は意外と多い。誘電体などは古くから知られている例の一つである。最近では、マルチフェロイック物質、スピン・ホール効果、トポロジカル絶縁体など、いずれも空間反転対称性の破れがこれら新奇な性質を生み出す舞台となっている。今後も空間反転対称性の破れをキーワードとした新しい物理が生み出されることが期待されている。

力が遠距離では引力であるが近距離（ $\sim 0.5\text{fm}$ ）では強い斥力芯を持つことがわかつている。

さて、陽子、中性子は3クオーク（qqq）で構成されており、中間子はクオーク、反クオーク対（ $q, \bar{q}\text{-bar}$ ）で構成されている。（3クオークの粒子をバリオンまたは重粒子、クオーク、反クオーク対をメソンまたは中間子と呼び、これらクオークを構成要素とする粒子をハドロンと総称する。）このように核子は内部構造をもつ粒子であることから、核子同士がオーバーラップを持つ距離における強い斥力芯はクオークにおけるパウリ排他律によるものであるとも、重い中間子交換によるものであるとも解釈することができ。すなわち、核力は未だ定性的に理解されていないのである。

そこで核力をバリオン間相互作用の一つとして捉えてみる。

アップ（ $u$ ）クオークとダウン（ $d$ ）クオークのみで構成されている陽子（ $uud$ ）と中性子（ $udd$ ）に対し、次いで軽いストレンジ（ $s$ ）クオークを構成要素としてもつバリオン（ハイペロン）を新しい自由度として導入し、核力の理解がハイペロンを含めたバリオン対に対して適切であるか検証し、核力の本質的な理解を探る。

(p) クォークのみで構成されている陽子 (pnn) と中性子 (pnp) に対し、次いで軽いス

トレンジ⑤ クォークを構成要素としてもつバリオン（ハイペロン）を新しい自由度として導入し、核力の理解がハイペロンを含めたバリオン対に対しても適応できるか検証し、核力の本質的な理解を探る。

ハイパー核のガンマ線分光

物理学専攻助教 鵜養美冬

(平成十一年物理学科卒)

原子核を構成しているのは陽子と中性子である。それらは「核子」と呼ばれる。数フエムトメートル (fm) 程度の原子核の中に、 $10^{14}$  程度の大きさの核子が詰まっている。

原子核内に、核子を束縛する力(核力)は中間子と呼ばれる

粒子が媒介しているものである（中間子交換）と湯川秀樹が提唱し、後にこの湯川中間子はパイ中間子であることが確認された。核力の研究は、核子間散乱実験（陽子-陽子、陽子-中性子散乱）のデータを解析することにより定量的に議論され、核



まず、ハイペロンの中で最も軽い $\Lambda$ 粒子 ( $\Lambda_{\text{uds}}$ ) に対して、 $\Lambda$ 核子間力を考える。 $\Lambda$ 粒子は、バリオンの中でも陽子、中性子に次いで軽く弱い相互作用 (核子における $\beta$ 崩壊) のみで崩壊するため、寿命も $260\text{ps}$ と比較的に長い。核力の研究は散乱実験データから情報を得ているが、ハイペロン核子散乱実験は、ハイペロンの寿命が散乱実験を行うには短く、非常に難しい。しかし強い相互作用に対しては十分長いので、 $\Lambda$ 粒子を原子核内に束縛させた系の構造から、相互作用の情報を引き出すことができる。

ハイペロンを構成要素に持つ原子核をハイパー核と呼び、特に $\Lambda$ 粒子を含む場合、 $\Lambda$ ハイパー核という。(以下では、単純にハイパー核と表記する。) 例えば、陽子3個、中性子3個、 $\Lambda$ 粒子1個を構成要素にもつハイパー核は $\Lambda_{\text{pnn}}$ と表記する。(通常の原子核と比較して、添字の7は、質量数の代わりにバリオン数を表す。) これまで $\Lambda$ 核子間のスピン平均した中心力の研究は、エネルギー分解能が $2\text{MeV}$ 程度の磁気スペクトロメータを用いた反応分光実験で行われていた。その結果、核内で $\Lambda$ の感じるポテンシャルの深さが核子の感じるポテンシャルの $2/3$ 程度であることが判明しており、 $\Lambda$ 核子間力が核力より弱いことが確立している。しかし、 $\Lambda$ 核子間のスピン依存力によって分岐する励起状態を反応分光実験では分離して測定できなかったことから、 $\Lambda$ 核子間スピン依存力は小さいことが指摘

されてきた。そのため、励起状態のエネルギーを精密に測定しなければならぬ。

通常の原子核の励起状態を精密測定する場合、ゲルマニウム半導体検出器による、励起状態からの脱励起ガンマ線エネルギー測定が用いられている。ゲルマニウム検出器は、数keVもの分解能でエネルギー測定可能で、精密なエネルギー測定だけでなく励起状態のスピン・パリティや寿命の測定を可能にするため、原子核構造研究に果たしてきた役割は非常に大きい。

しかし、ハイパー核生成を行う環境で、ゲルマニウム検出器を動作させることは非常に困難であった。しかし、我々が開発したHyperballと呼ばれる特殊なゲルマニウム検出器群によって、一九九八年に始めてハイパー核の $\gamma$ 線分光実験が可能になった。このHyperballを用いて行っているプロジェクトであり、ハイパー核精密ガンマ線分光を行うことのできる唯一の装置である。

ハイパー核の生成反応は、一般的には中間子ビームを用いた、 $(K^-, \pi^-)$ 、 $(\pi^+, K^+)$ といった反応が用いられる。表記の意味は、 $(K^-, \pi^-)$  反応の場合、標的核 (例えば ${}^{\text{Li}}$ の場合) に $K^-$  ( $s, u$ -bar) ビームを照射し、標的核中の中性子を $\Lambda$ に変換し ${}^{\text{Li}}$ を生成、散乱粒子として $\pi^-$  ( $d, u$ -bar) が放出されることを意味する。中間子ビームは、加速器を用いて加速した高エネルギー陽子を金属に照射し原子核反応によって生じる様

々な粒子の中から、磁場、電場によって電荷、運動量、質量で弁別されたのち、実験標的上に照射される。入射粒子と、散乱粒子の運動量を磁気スペクトロメータで測定し、運動学からハイパー核の質量がミッシングマスとして得られ、ハイパー核生成事象が同定できる。標的周りに配置したHyperballで同時計測されたガンマ線エネルギーを測定することで、励起エネルギーを決定することももちろん、ガンマ線収量や生成反応角依存性などの情報からガンマ線を放出した状態のスピン・パリティなども決定することができ

る。これまでに、Hyperballや次世代のHyperball 2を用いて質量数 $A=7\sim 16$ までのハイパー核レベル構造を明らかにした。 $\Lambda$ 核子スピン依存力で分岐する非常に小さいレベル構造 (最小 $26\text{keV}$ ) も、分離して測定することに成功している。これらの構造から、比較的遠距離においては中間子交換モデルで $\Lambda$ 核子スピン依存力を再現することができるとわかったが、

近距離においては、既存の中間子交換モデルでは再現できないが、一方、クォーク描像によると、構造を再現できることが示された。今後、さらにデータが蓄積しそれぞれのモデルの妥当性を検証したい。

これまでのハイパー核ガンマ線分光実験は、高エネルギー加速器研究機構陽子シンクロトロン加速器 (KEK-PS) や、米国立研究所の陽子シンクロトロン加速器

(BNL-AGS) などの施設において実験を行ってきた。現在、両施設はシャットダウンしているが、我々は現在、二〇〇九年より稼働した茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) のハドロン実験施設に舞台を移している。本稿はまさに、第3世代のhyperball-Jを用いた新たなハイパー核ガンマ線分光実験にむけた準備中に、執筆しており、会報が配布される時期には、J-PARCにおける初めて

## 望遠鏡 vs アインシュタイン

東京大学理学系研究科教授、天文学教育研究センター長 吉井 讓 (昭和五十二年天文学専攻 (博前) 修了)

のHyperballプロジェクトの結果が出ていることを期待する。本稿の内容は、筆者が受賞した平成二十四年度泉萩会奨励賞の受賞対象となった学術論文の内容に基づいています。詳しい内容は、物理学会誌 Vol. 67, No. 1, 2012 年14ページを参照されたい。最後にこの受賞に際し、Hyperballプロジェクトの共同実験者に感謝いたしますとともに、本賞の審査員ならびに泉萩会の皆様にお礼を申し上げます。

吉井 讓

宇宙の奥深くを望遠鏡で観測すると、秘密のベールが次々と剥がれていく。四百年前、ガリレオに端を発したこのパラダイムによって、望遠鏡は大型化と高性能化の一途をたどってきた。二十世紀初頭にはカリフォルニアのウィルソン山に口径 $1.5\text{m}$ と口径 $2.5\text{m}$ の望遠鏡が相次いで建設され、銀河系の外に無数の銀河が存在し、最も近いアンドロメダ銀河でも数百万光年の距離にあることが明らかにになった。天文学の最前線は猛スピードで拡大し、二十世紀後半には十台もの口径 $8\sim 10\text{m}$ の大型望遠鏡が空を見上げ、ハッブル宇宙望遠鏡が周回軌道から宇宙の深淵を狙うに至った。過去数十年で観測は一万倍の深さに達し、130億光年の彼方にある赤方偏移 $Z \approx 10$ の微光銀河を捉えた。サーベイ観測は百万個の銀河を使う統計研究をも可能にした。勢いは止まることなく、今世紀前半にはやがて口径 $30\text{m}$ の巨大望遠鏡が稼働するまでになる。



二十世紀の天文学は常に遠方銀河の距離を測ることによって私たちの宇宙像を一変させてきた。米国の天文学者ハッブルは一九二九年、遠くの距離にある銀河ほど高速で遠ざかっているという驚くべき事実を明らかにし、これが宇宙膨張の発見とな

った。そして一九九七年にはパールマターとシュミットの率いる二大グループが $Z \approx 1$ までの銀河の距離を測定し、宇宙膨張が加速していることを明らかにした。加速膨張を引き起こす正体不明の暗黒エネルギーは宇宙の構成要素の大半を占め、恒星や銀河のような通常物質を凌駕する。この物理学の根幹をも揺るがしかねない発見は二〇一一年、ノーベル物理学賞に輝いた。振り返ると、宇宙膨張の発見はアインシュタインが唱えた定常宇宙を否定し、加速膨張の発見は彼が取り下げた宇宙定数を復活させた。アインシュタインは観測の前に二度敗北したことになる。

ハッブルが銀河の距離の測定に使った光源は規則的な変光パターンを示すセファイド型変光星だった。その絶対光度と変光周期に相関があるため、変光周期の観測から絶対光度を求めることができ、見かけの明るさと比較することで距離が求まる。膨張宇宙の発見は、ハッブルがウィルソン山の望遠鏡を独占的に使用して、近傍銀河中のセファイドを継続的に観測することによって成し得た偉業であった。一方、パールマターとシュミットが使った光源は、セファイドよりはるかに明るいIa型超新星だった。その最大絶対光度は一定と考えられるため、出現後に最も明るくなった時点で、見かけの明るさと比較することで距離が求まる。加速膨張の発見は、遠方銀河で出現した超新星を大口徑地上望遠鏡や宇宙望遠鏡で継続観測する体制を築い

たリーダースhipによるものであった。

果たして我々は物理の基本法則あるいは重力理論を修正すべきか否か、加速膨張の発見は広範な議論を引き起こしている。

この難問に天文学が関与するとすれば、超新星を超える明るさの光源を使って、Z<sub>1</sub>2より遠い銀河の距離を正確に測ることだ。この条件にかなう光源として、銀河そのものを使う従来の方法がある。しかし、これには致命的な欠陥が指摘されている。無数の恒星が集まってできた銀河は、星形成→進化→死滅のサイクルを繰り返して進化する。従って、進化の効果を補正しなければならない。その進化の知識は不完全であり、求めた距離には常に無視できない系統誤差がつきまとう。極論すると、銀河を使う限り、宇宙論に何らかの制限を課することが可能だとしても、決定的なものにはなりえない。決定的なものにするためには、常時変光する活動銀河を光源として使う方法がある。

活動銀河の中心部には巨大ブラックホールが存在し、その周りに降着円盤があり、さらにそれを取り巻くように塵がトラス状に分布する。この塵は降着円盤から放射される紫外線や可視光を吸収して暖められ、近赤外線を再放射する。このため中心から塵トラスの内径まで光が伝播する時間だけ、紫外可視の変光に対して近赤外の変光が遅れる。塵は温度が一定の閾値を超えると蒸発するため、可視と近赤外でモニタリングして遅延時間を測定することによって、絶対光度が一次的に求まる。それを見かけの明るさと比較することで活動銀河までの距離が求まる。筆者のグループは近傍の活動銀河を可視と近赤外でモニタリング観測 (MAGNUM) し、この距離決定法の有用性を既に確認した。遠ざかる遠方の光源から届く光は赤方偏移によって波長が伸びるため、この手法を高赤方偏移の活動銀河に適用するには、近赤外と中間赤外で十年を超える長期に渡ってモニタリング観測 (Super MAGNUM) することが必須となる。

延時間を測定することによって、絶対光度が一次的に求まる。それを見かけの明るさと比較することで活動銀河までの距離が求まる。筆者のグループは近傍の活動銀河を可視と近赤外でモニタリング観測 (MAGNUM) し、この距離決定法の有用性を既に確認した。遠ざかる遠方の光源から届く光は赤方偏移によって波長が伸びるため、この手法を高赤方偏移の活動銀河に適用するには、近赤外と中間赤外で十年を超える長期に渡ってモニタリング観測 (Super MAGNUM) することが必須となる。

東京大学天文学教育研究センターは、南米チリ、アタカマ高地の標高5600mのチャナントル山頂に口径6.5mの赤外線望遠鏡を建設するTAO計画を推進している。これは世界で最も高い場所に位置する天文台であり、これまで大気に阻まれて観測できなかった中間赤外線を地上から唯一観測することが可能となる。TAO望遠鏡のファーストライトは約五年後に予定されるが、Super MAGNUMはその直後からスタートし、Z<sub>1</sub>2の多数の活動銀河の距離を測り、宇宙論の次のブレークスルーを狙う。中規模の地上望遠鏡による宇宙観測の未来を不安視する向きもあるが、そのような心配を払拭する一つの例である。観測装置の規模に応じた計画をたて、宇宙創成の謎に迫ることができるか、求められるのはやはり研究者の独創的アイデアなのだ。

天文学は現在も驚くべき発展を続けている。これは観測技術

や手段が格段に向上し、宇宙の細部が明らかにってきたことはもちろんだが、天文学と物理学の研究方向が徐々に接近し、互いに刺激し合うようになったことも大きな要因だ。以前から、学問分野の細分化が科学的思考の妨げになると問題にされてきたが、天文学と物理学については逆の現象が起こっている。

特に、宇宙の加速膨張の発見を機に天文学データを使用して、一般相対論に代わる重力理論の検証まで試みられるようになった。この熱気が新しい理論の成立へと結実すると、アインシュタインは三度目の敗北を期すことになるのか、その答えは十年先に持ち越される。