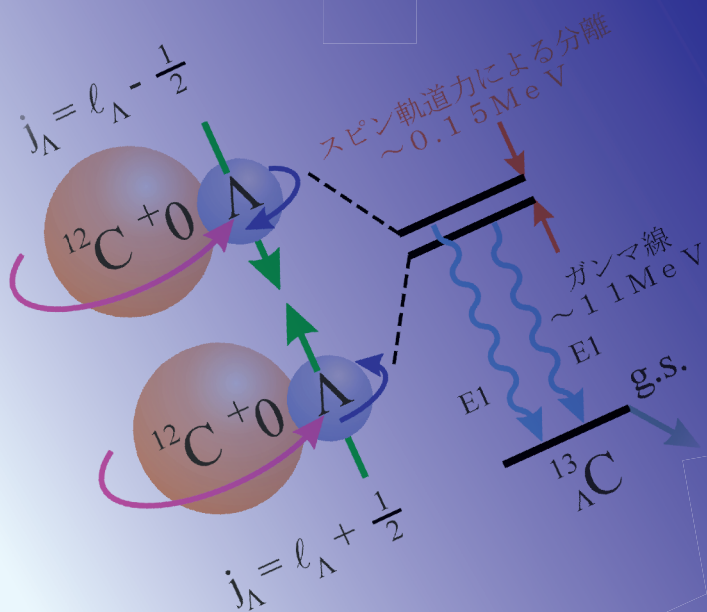
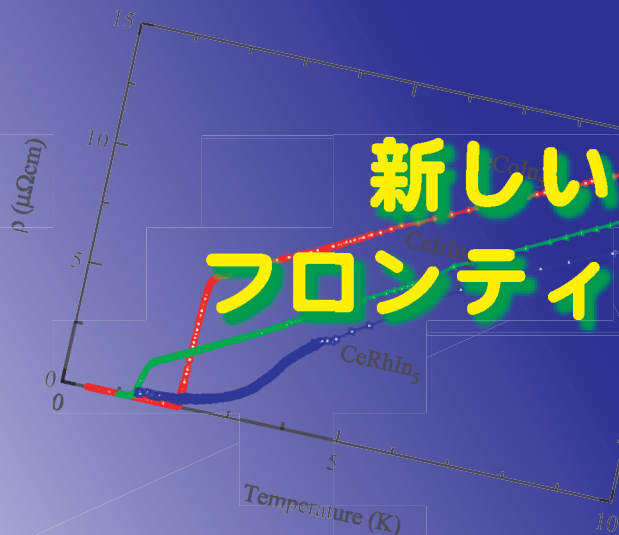


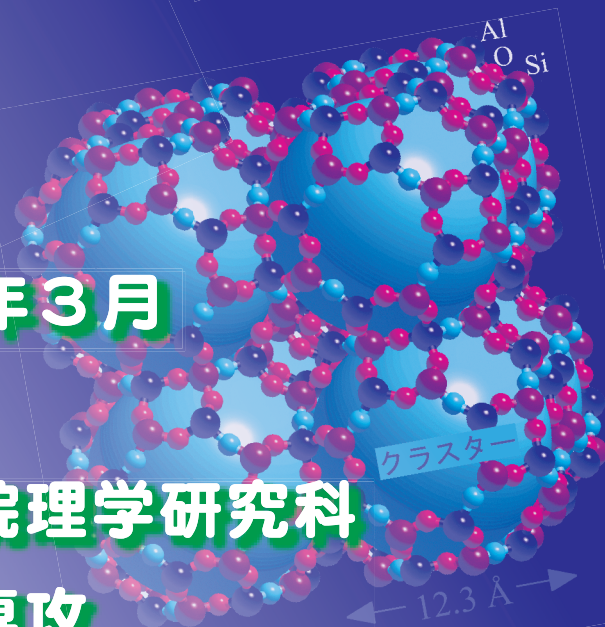
5 nm

新しい物理学の フロンティアを目指して



2002年3月

大阪大学・大学院理学研究科
物理学専攻



新しい物理学の フロンティアを目指して

目 次

2 物理学専攻からのメッセージ

4 これまでの研究の歴史

物理学専攻は、その前身である理学部物理学科が昭和6年に創立されて以来、多くの研究業績を積み上げてきました。今日、そして未来の発展もこの基盤なしには語るできません。物性物理学から素粒子・原子核物理学までの過去の輝かしい研究業績をまとめました。

16 最近の研究トピックス

物理学専攻における研究の現状を端的に理解していただくために、ここでは私たちが主導した最近の研究成果のいくつかを紹介します。めまぐるしく変遷する研究のフロンティアに対応して、数年毎にこのパンフレットを改訂して、毎回、新たなトピックスをご紹介します予定です。

24 研究グループの紹介

物理学専攻の研究グループを紹介します。物理学の幅広い研究分野に、約20の研究グループが展開しています。各研究グループから、最近の研究成果および研究上のリソースが紹介されています。

62 将来への展望

この研究紹介パンフレットの一つのハイライトがこの将来展望です。物理学の新しいフロンティアの開拓を目指す物理学専攻の将来像が浮かび上がります。

物理学専攻からのメッセージ

大阪大学理学部（物理学科）は、医学部とともに昭和6年に大阪大学発足と同時に長岡半太郎博士（初代総長）によって創設された大阪大学で最も伝統のある学部・学科です。大学院理学研究科としては、戦前の旧制度上で昭和8年から大学院学生を受け入れてきました。その後、平成6年に教養部物理学教室の教官と一体となって大学院重点化を行って物理学専攻を形成し、学内の研究所・センターの教官の協力を得ながら今日に至っています。因習にこだわらず独創的な研究を重んじて、常に新しい分野を切り開き、数々の輝かしい研究業績を生み出してきたと自負しております。平成12年度には外部評価を受け、多くのご指摘と共に従来の研究成果に対して高い評価もいただくことができました。この結果も踏まえて、未来を指向する物理学専攻の将来像を皆さまにお伝えしたいと思います。

当専攻は現代の物理学の各分野において、国際的にも高い評価を受けている教官を中心に構成されています。物性物理学講座、量子物理学講座および学際物理学講座では、凝集物質系における物理学として、独創的な研究成果を挙げてきました。一例として、重い電子系の典型物質の発見と非BCS超伝導、新しいナノ物質の創生、量子ホール伝導におけるエッジチャンネル幅の決定、金属磁性の起源の量子理論的解明、半導体中不純物の光磁気物性、結晶成長の統計理論、非線形効果による高速量子発光とその理論、金属クラスター構造の研究が挙げられます。ゼオライトの細孔に吸蔵させたアルカリ金属のナノクラスターが示す磁性はこれからの研究の発展が期待されます。実験グループは「新しい物質は新しい物理を創造する」を一つのモットーとしています。

一方、素粒子・核物理学講座および基礎物理学講座でも、世界に先駆けて最先端に挑む研究が進められています。素粒子物理実験では、ニュートリノ振動やミューオンの基本的対称性の研究、K中間子やB中間子でのCP非保存の研究などが挙げられます。また原子核物理実験でも、ユニークなアプローチにより「素粒子物理」や

「物性物理」との境界領域に迫る研究成果が生まれています。たとえば、それらは、核分光による素粒子原子核物理、ベータ崩壊などによる原子核や核物性の研究などです。さらに、素粒子および原子核理論のグループにおいても輝かしい成果を上げています。たとえば、ニュートリノを含む素粒子物理、統一理論、超弦理論、重力理論および原子核の殻構造、QCDに基づくハドロン構造の研究などです。また理論と実験グループが共同で研究課題を検討するような交流も活発であることも特色です。

以上の伝統を生かしながら、基礎物理学分野の中で、例えば、強相関電子系、ナノサイエンス、そしてニュートリノなどのレプトン素粒子物理などに焦点を絞り、世界をリードする拠点を形成して研究成果を発信したいと考えています。これらの研究活動はホームページ (<http://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/index-jp.html>) でも知ることができます。

私たちは積極的に研究成果を社会に還元して社会的責任を果たしていきたいと考えています。基礎的な物理学の研究成果も、可能な範囲で応用へ発展させ社会に貢献したいと思えます。本学が商都大阪の地元負担で創設されたことを忘れずに、大阪大学が掲げる「地域に生き世界に伸びる」をモットーに精進していきます。この冊子では触れていませんが、近畿の中・高校へのいわゆる出前講義・出張は毎年20校以上に及んでいます。その活動報告書は主として近畿の300校以上の高校に送られています。理科離れの影響で大学の理工系学部への志願率は低迷しています。そこで科学や産業の発展を支える物理学に中・高校生が興味を抱いていただけたらと願って企画し、物理学専攻として取り組んでいる社会貢献の一つです。

伝統ある物理学専攻のこれまでの研究上のリソースを生かしながら、新しい物理学のフロンティアの開拓を目指す大阪大学・大学院理学研究科物理学専攻の姿をこの冊子から読みとっていただけたら幸いです。

これまでの研究の歴史

70年を越える物理学科および物理学専攻の歴史のなかで、常に中心的な役割を果たしてきたのは研究でした。その研究の魅力に多くの研究者や学生が参集して、そして巣立っていきました。ここでは、物理学の分野ごとに、私たちの先輩たちが築き上げた歴史的研究業績をまとめます。今日、そして未来の物理学専攻の発展はこの基盤なしには語るできません。

1 素粒子と原子核の理論

大阪大学理学部では素粒子原子核理論分野に於いても、湯川秀樹、坂田昌一、小林稔、谷川安孝、伏見康司、木庭二郎、内山龍雄、森田正人、小谷恒之、吉川圭二などのそうそうたるメンバーによって数々の独創的研究が行われてきた。ここでは、日本人初のノーベル賞を受賞した湯川秀樹の中間子論と、すべての力の源として提唱された内山龍雄のゲージ理論について紹介する。

湯川理論

核力

昭和8年、物理学教室主任の八木秀次に誘われ、湯川秀樹は新設の大阪大学理学部に講師として着任した。初代の総長は尊敬する長岡半太郎である。大学を卒業してから4年目の湯川は、原子核の中で陽子や中性子を結びつける核力を量子力学的に説明したいと思っていた。

同じ電気を持ち互いに反発する陽子を原子核の中に閉じこめておくには、非常に強い力が働いていなければならない。また、この力は原子核の大きさより遠くでは急速に弱くなる短距離力でなければならない。

当時この世界は陽子・中性子・電子・光子だけから成っていると信じられていた。電磁気力は、陽子と電子が光子をキャッチボールすることにより生じる。その類推から、陽子と中性子が電子をキャッチボールすると考えて計算してみたが核力をうまく説明することはできなかった。

湯川の自伝「旅人」によれば、この頃の湯川は、大阪の町の雰囲気になんか仕事をせざるおられないような気持ちになりながら、自分の研究に目鼻がつかないことにじりじりしていた。

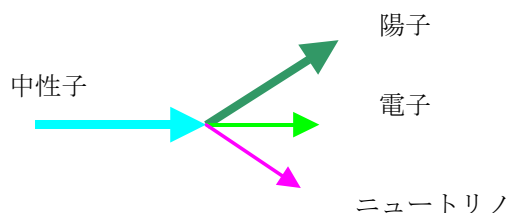


湯川秀樹博士

ベータ崩壊

そのころフェルミのベータ崩壊（弱い相互作用）の理論の論文が現れた。中性子が陽子と電子に崩壊するベータ崩壊では、同時にニュートリノと呼ばれる中性の粒子が出ると考えれば、エネルギーが保存するというのである。

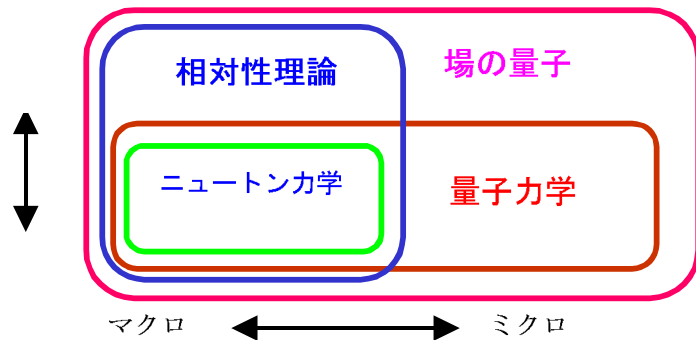
湯川は直ちに、陽子と中性子の間で電子とニュートリノの対をキャッチボールすれば、核力が説明できるのではないかと考えた。この仕事はソ連の学者に先を越されたが、結果は否定的で、電子とニュートリノによる力は核力とは比べ物にならないくらいに弱いことが判明した。この否定的な結果が湯川の元気を回復させた。核力の場に付随した粒子の性質を逆に決めてやれば良かったのである。



ベータ崩壊

場の量子論

相対性理論によればどんな信号も光速より速くは伝わらない。どんな力も瞬時に遠くへ及ぶことはなく、力の場の変化が波となって、時間とともに遠くへ伝わって行くのである。一方、量子力学によればミクロの世界では粒子は波の性質も持ち、波も粒子の性質を持っている。相対性理論と量子力学を融合した場の量子論では、力は場であり、場は粒子を伴っていないといけない。



発見

昭和9年10月初めのある晩、湯川はふと思いついた。核力（強い相互作用）は、非常に短い到達距離しか持っていない。それは10兆分の2センチ程度である。この到達距離と核力に付随する新粒子の質量とは、互いに逆比例するだろう。今までどうして気がつかなかったのだろう。あくる朝、さっそく、新粒子の質量を当たって見ると、電子の200倍程度に成ることがわかった。

湯川粒子の質量 m
と到達距離 λ の関係

$$m = \frac{\hbar}{c\lambda}$$

$$V(r) = -g \frac{e^{-r/\lambda}}{r}$$

湯川ポテンシャル

ノーベル賞

2年後に湯川の予言した質量を持つ粒子が宇宙線中に見つかった。この新粒子の発見は湯川を一躍世界の檜舞台に押し上げた。しかしその後この新粒子は湯川の予言する性質を持たないことが分かり、2中間子論を生むこととなった。昭和22年に2種類の中間子の存在が明らかになり、湯川は昭和24年日本人初のノーベル賞に輝いた。湯川の発表した論文“On the Interaction of Elementary Particles”は、素粒子物理学の幕開けを告げる画期的な論文となり、大阪大学理学部は素粒子物理学発祥の地となった。湯川が場の量子論を用いて導いた到達距離の有限な力は湯川ポテンシャルと呼ばれ、また、一般にフェルミオンとボゾンの相互作用は湯川相互作用と呼ばれている。

ゲージ理論

電子などの電気を帯びた粒子は複素数の場で表される。空間の各点ごとに異なる角度の位相変換

$$\psi(x) \rightarrow \psi'(x) = e^{i\theta(x)} \psi(x)$$

を行うことは、実数部分と虚数部分に分けて考えれば、実数軸と虚数軸の取り方を空間の各点ごとに異なることになる。このような変換を行っても物理学が変わらない場合に、ゲージ不変であるという。

ゲージ不変な理論では、各点ごとに実数軸が変わっているので、その変化の割合を表すゲージ場が必要になる。電磁場は位相変換に



内山龍雄博士

対するゲージ場であることがWeylにより示されていた。

内山龍雄と Yang-Mills は独立に、ゲージ対称性を空間の各点に3つの軸があるような場合に拡張した。特に、内山は任意の群の場合にゲージ理論を拡張した。

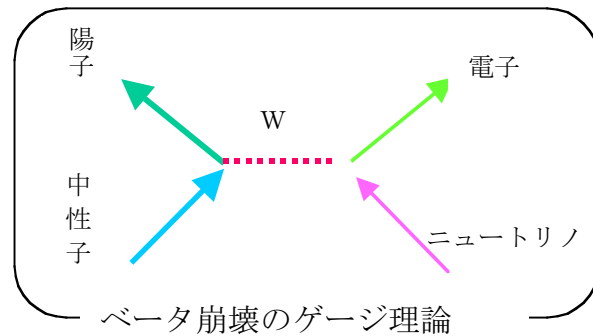
力	電気力	弱い力	強い力	重力
ゲージ粒子	光子	W	グルーオン	重力子

アインシュタインの一般相対性理論では、空間の各点ごとに勝手な座標系を設定しても物理法則は変わらない。内山はこの一般相対性理論との類推から、全ての対称性を各点ごとのゲージ対称性に拡張し、力の統一理論の基礎を築いた。

現在の素粒子論は、全ての対称性はゲージ対称性であるという内山のゲージ原理と、全ての質量の起源は対称性の自発的破れに起因するという南部陽一郎のアイデアに依っている。

ゲージ理論では、ベータ崩壊も一点で起きるのではなくゲージ場が媒介することにより起きる。このゲージ場にはWボソンと呼ばれる粒子がともなっている。もともと湯川は、フェルミのベータ崩壊も、核力と同じくパイオンが媒介すると考えていた。弱い相互作用がボゾンによって媒介されるという湯川のアイディアは、谷川らの研究を経て、内山のゲージ理論として昇華したのである。

現在の理論では陽子・中性子や湯川のパイオンもクォークと呼ばれる素粒子からできている。このクォークを結びつける力も、グルーオンと呼ばれるゲージ場が媒介する。また大統一理論においても、力の起源はゲージ場である。このように、全ての力の源は内山の考え出したゲージ場にあるということが出来る。



参考文献

- 1) Hideki Yukawa, On the Interaction of Elementary Particles, Proc. Phys.-Math. Soc. Japan, 17, 48, 1935.
- 2) 湯川秀樹著、旅人—ある物理学者の回想 角川文庫ソフィア、角川書店；ISBN: 4041238013
- 3) 日本物理学会大阪支部編、量子論と大阪大学、1996年12月。
- 4) Ryoyu Utiyama, Invariant Theoretical Interpretation of Interaction, Phys. Rev. 101, 1597, 1956.

2 素粒子と原子核の実験

大阪大学理学部が創設された1931年は、原子核物理学の「奇跡の年」である。この年に Anderson が陽電子を発見し、Cockcroft 達が人口的に加速した粒子で核壊変を行い、Chadwick が中性子を、Urey が重水素を発見し、Heisenberg が核の陽子・中性子合成説を提唱した。この時、菊池正士は既に電子線散乱で物質の波動性を決定づけた電子線による物質研究分野を拓いて国際的に著名な若手教授であったが、この時から新世界である原子核物理学研究を目指し、若槻哲雄、渡瀬譲、熊谷寛夫、伊藤順吉、山部昌太郎、杉本健三、平尾泰男たちと多くの世界的業績を上げた。その後、八木浩輔、江尻宏泰たちを加えて、世界を引っ張った研究を紹介する。

遅中性子吸収によるγ線

菊池は初代総長長岡半太郎、物理学教室主任八木秀次に請われて1934年(32才)理学部教授とな

った。その年の1月、加速器で加速したビームを標的に衝突させて原子核を研究するという、今でこそ当たり前となっているが当時としては斬新な研究方向を定めて、2年前に英国で発明されたばかり



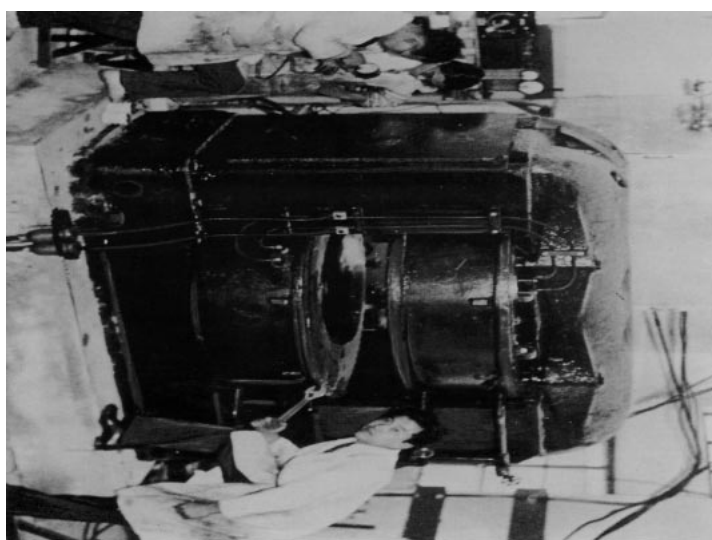
菊池正士（右）とコッククロフト。シーボルト（当時米国原子力委員長）と研究を競った際に使ったコッククロフト・ウォルトン加速器の前で（1970年3月）。左端は熊谷寛夫。

のコッククロフトウォルトン加速器を理学部（中の島）に建設した。わが国最初の加速器である。これには高耐圧整流管を製品として購入して使い、フィラメントの電源には蓄電池のかわりに絶縁トランスを使うなどして、発明者の装置より技術レベルが高く簡便な加速器となった。研究テーマを「中性子の関与する核物理学」に絞り、特に「中性子捕獲 γ 線」の系統的研究に集中し世界と競争した。コッククロフトで加速した重陽子と標的の重陽子の衝突 ${}^2\text{D} + {}^2\text{D} \rightarrow \text{n} + {}^3\text{He}$ 反応で中性子を発生させたのである。重水はノルウェーから購入可能となるまで、化学教室の千多利三が分離したものを使った。まず、基本過程となる中性子の陽子による測定を始めて、捕獲断面積（36~100 mb）と結合エネルギー（ 2.2 ± 0.1 MeV）を出した。このほか、早い中性子と遅い中性子の捕獲の研究を青木寛夫、伏見康治の協力を得て、30数種について行った。この中性子捕獲断面積の実験精度がもう少し良ければ、殻モデル（1949年：Mayer・Jensen）提唱を先駆けて行うことが出来たと思われる。なぜなら現在分かっている閉殻核、 ${}^{40}\text{Ca}_{20}$ 、 ${}^{50}\text{Sn}$ 、 ${}^{82}\text{Pb}_{126}$ 、で捕獲断面積が零に近くなっていた。加えて、この時東北大から内地留学で来ていた彦坂忠義は世界に先駆けて、共通ポテンシャル中の核子の運動を記述する殻模型とデータとをつきあわせていたのである。

核反応 γ 線と β 線研究

1938年には24インチサイクロトロンを完成して、5 MeV 重陽子ビーム、20 mAを得た。これでRIを作り、「 β 線、 γ 線スペクトルの研究」へ進んだ。この中で特筆すべきは、1939年には菊池、渡瀬譲、伊藤順吉達が、 ${}^{13}\text{N}$ の β 線スペクトル実測を行い、1933年に提唱されていた「Fermiの β 崩壊理論」の正当性に決着をつけたことである。

戦前のサイクロトロンが占領軍によって大阪湾に投棄された後、菊池は若槻哲雄を初めとする多くの弟子達と44インチサイクロトロンを再建して（1955年）あと、戦前の貴重な研究と方法論は引き継がれた。若槻哲雄、平尾泰男達は「カスケード γ 線の同時計測と角度相関」を取る「 γ 線核分光学」を世界的に定式化



1935~8年建設の24インチサイクロトロン。5 MeVの重陽子ビーム20 μ Aが得られた。

した。引続き江尻宏泰達は「インビーム核分光学」として発展させ、原子核構造を定量的に明らかにして、世界をリードした。また、遅中性子吸収反応研究に引続き速中性子吸収反応の研究が行われ、原子核半径の定量化、速中性子散乱実験を進め、光学ポテンシャル散乱研究に発展していった。

東京大学原子核研究所と大阪大学核物理研究センターの設立

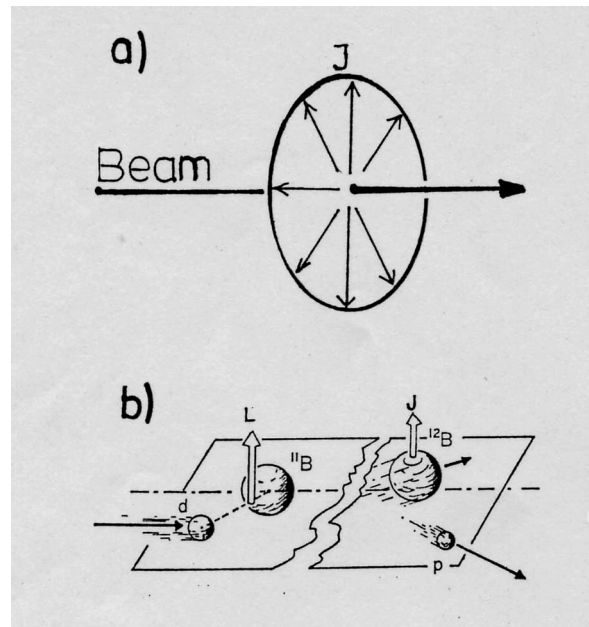
菊池正士は、我が国初の全国共同利用研究所である東京大学原子核研究所初代所長に就任し（1955年）、サイクロトロンを中心とする原子核研究の発展に尽力した。その後、山部昌太郎、近藤道也らは、大阪大学に全国共同利用の核物理研究センターを設立し、AVF サイクロトロン（K=120、1974年）を建設した。核物理研究センターはスピン偏極した粒子ビームと高分解能測定に特徴を持ち、スピン・アイソスピン自由度が関与する核反応機構、核子間相互作用、核構造研究の世界的中心地として、内外の研究者が活躍した。その成果によって、現在の大型リングサイクロトロン（K=400）へと発展した。

世界初の γ - γ 角度相関

原子核が励起状態から次準位へ遷移した時放出する γ 線と、引続き放出される γ 線の間には角運動量保存則から角度相関が有る（Hamilton, 1940）。菊池正士、渡瀬譲、伊藤順吉は世界初の γ - γ 角度相関実験を行った。この研究は若槻「 γ 線核分光」へ発展し世界をリードした。引き続き、1957年におこなった杉本健三の摂動 γ 線角度相関法の開発に繋がった。寿命 ns~ms 領域の短寿命準位の電磁気モーメント決定を可能にして、これで核構造を精密に研究する新分野を拓いた。必然的に核内にパイ中間子の自由度（効果）を定量して有名となった。これはまた、原子核と物質内電子との「超微細相互作用」研究を可能にする方法を与えた。

1956年になって「核の短寿命準位の核モーメント研究」にはスピン偏極と整列（スピン集合の1次と2次のモーメント）が不可欠であることが認識された。核準位は核反応で励起するが、杉本は図 a) で示したように、同じ核反応を、人工的にスピンを整列させ、生成核を結晶中に留めて起こさせる画期的な方法を開発した。全生成核を観測した時に巨大スピン整列が生成する。また、1963年には反跳角度を制限選択することで（図 b)）スピン偏極を生成した。この方法の応用可能範囲は短時間限界は $\beta \cdot \gamma$ 崩壊核の寿命（ ~ 10 ns）で決まり、長いほうは植え込む結晶中でのスピン格子緩和時間によって決まる（ ~ 100 s）。これら現象の発見と利用が、純粹に杉本と若槻が手作りしたバンデグラーフで世界に先駆けて行なわれたことは特筆するに値する。現在では、高エネルギー重イオン（核子当たり 50~400 MeV）衝突で得られる「入射核破砕片の分離選別」において、安定核から遥かに離れた陽子と中性子ドリップライン近傍核の生成捕獲を可能にして、同時に反跳角選択法で偏極を生成させるところまで発展した。

核スピン偏極核からの β 線角度分布は、偏極前後方向に非対称である。これを指標にしてスピンを観測して、スピンと外部場や結晶内場との相互作用を通して、核スピンの運動状態を外部高周波磁場で制御することに成功した（ β -NMR; β 線検出核磁気共鳴）。1965年に杉本、中井浩二達が短寿命核 ^{17}F の磁気共鳴を最初に観測し核モーメントによる核構造研究を決定的なものにした（上図 b)）。この後、後続する研究グループが方法をさらに発展（ β 線検出核四重極共鳴法； β -NQR）させて短寿命核



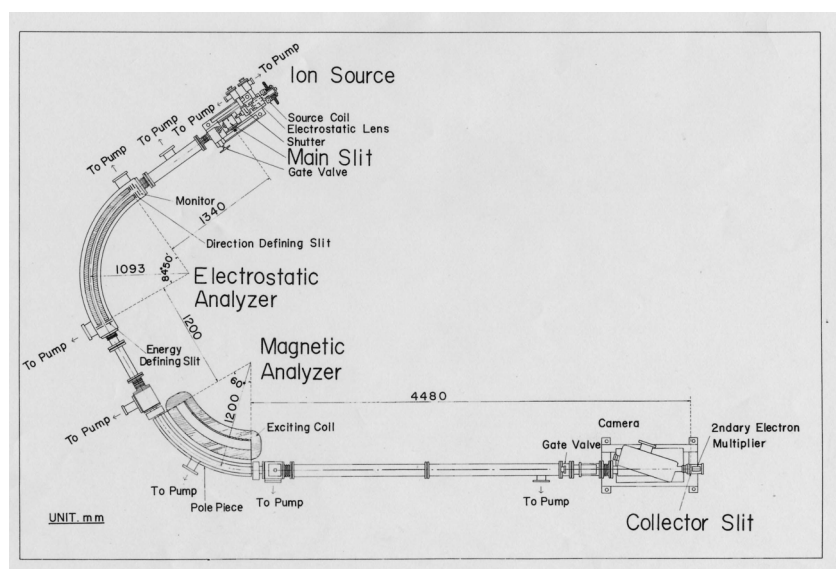
核反応で生成するスピン整列と偏極
a) ビーム軸に対してスピン整列が生成、
b) 入射と生成核の作る平面に垂直方向にスピン偏極が生成核に生成。

の電磁気モーメントの系統的研究に繋がっている。

この β -NMR の応用の一つに超微細相互作用についての研究がある。植え込んだ短寿命核で結晶内電磁場が計測して、結晶の物性、結晶内不純物の電子構造研究を可能にした。杉本、野尻洋一、中井達は、純鉄、ニッケル中に植え込んだ ^{12}B ($I^\pi=1^+$, $T_{1/2}=20\text{ms}$) を使い内部場と緩和時間をキュリー温度近傍で測定して、磁性の Critical Slowing Down 現象を観測することができた。これからニッケル磁性を担うのが、遍歴電子であるという結論を与えた。

β 崩壊過程の荷電空間内パリティ保存

1977 年杉本は南園の協力を得て、「 β 線角度相関の整列相関係数実測から鏡映 β 崩壊が同じか？」という問題をスピン整列した ^{12}B ($I^\pi=1^+$, $T_{1/2}=20\text{ms}$)、 ^{12}N ($I^\pi=1^+$, $T_{1/2}=11\text{ms}$) 鏡映核の β 崩壊を観測して検証した。その結果同じである結論し、 β 崩壊過程におけるゲージ理論やカレント代数学を保証した。スピン制御技術を使い大スピン偏極を正と負の大整列に変換して測定を可能にした。この段階では、 β 崩壊過程は荷電空間でのパリティが (運動量移行零で) 保存する (誘導テンソル項が弱磁気項の $1/3$ 以下) ことを証明した。この問題は、up-down クォークの質量差 ($m_u - m_d$) から予測される破れを越える可能性を示唆した。また、同じデータから擬ベクトル流時間成分の純粋抽出を初めて可能にして、巨大パイ中間子効果の研究が可能である事を示した。小型加速器をを使った超精密なフロンティア研究の重要性をも示した。



1958 年に完成した緒方・松田型マススペクトログラフ

高分散・高分解能質量分析器

緒方唯一・松田久は 1958 年には高分散、高分解能 (最高 $M/\Delta M=90$ 万) の大型質量分析器を完成して世界にその名を轟かせた。H、D、 ^{14}N 、 ^{16}O 、 ^{35}Cl 、 ^{37}Cl 等の原子質量を $10^{-(8\sim 9)}$ の高精度で測定して、質量公式からのずれを発見。高い (クォーク) レベルの理論研究が必用なことを指摘した。

1964 年に高岡宣雄達は質量分析の研究から $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ の 2 重 β 崩壊半減期を決めこの 2 重 β 崩壊による素粒子物理学検証への道を開いた。

ニュートリノ質量の謎への挑戦

江尻達は (多くの有名な仕事の一つとして)、1991 年には γ 線スペクトロスコピーの方法によって ^{100}Mo の 2 重 β 崩壊現象観測を発表し、ニュートリノ質量の謎に大きな手がかりを与えた。これは神岡鉱山の地下で専用開発した超低バックグラウンド環境で「エレガント号」検出器を使って行った。

3 物性物理学の理論

日本における実証的な物性理論の基礎を築かれたのは永宮健夫および金森順次郎である。二人は物性理論の発展に極めて大きな足跡を残されたのであるが、それとともに、独創性に富んだ物性研究が繰り返される豊かな土壌を大阪大学に生み出され、それによって本学の物性理論グループを日本における物性理論研究の一つの中心となるまでに育て上げられた。特に磁性理論の分野においては、永宮および金森スクールの研究に先導された数々の重要な研究が世界で生まれ育っていった。ここで二人の仕事を、そのごく一部について、歴史的な意義を踏まえつつ紹介する。

反強磁性共鳴の理論

永宮は東京大学を卒業後、1939年大阪大学理学部に助教授として赴任し、1942年から1964年基礎工学部創設にともない基礎工学部に移るまで、量子物理学第2講座（かつては物理学第5講座と称した）で教育と研究にあたった。

永宮の研究の特徴は、常に実際の物質を対象に定量的議論によって理論を構築していくところにあった。初期の重要な仕事の一つとして塩化アンモニウム配向や回転振動、相転移の研究などがあるが、特に重要な研究は反強磁性共鳴に関するものであろう。磁性イオンを含む物質は特定の周波数の電波を吸収しこれは磁気共鳴吸収と呼ばれる。この現象による強磁性体や常磁性塩の研究は第二次世界大戦後急速に発達した。強磁性体についての理論はキッテルによって1947年に定式化されたが、電子状態および磁気異方性に関するミクロな情報を与えることとなった。一方、反強磁性体に対する共鳴吸収に関しては手探りの実験が多少試みられてはいたが、何の成果も得られなかったし、また共鳴の可能性を示唆する理論も全く無かった。



永宮健夫

永宮は、反強磁性体の部分格子磁化に対する運動方程式を導き、強磁性共鳴では表に出てこない交換相互作用が磁気異方性エネルギーと結びついて、反強磁性共鳴吸収を起こすことを始めて指摘した。その理論は磁場のもとの共鳴周波数は結晶軸に対する磁場の方向と強さによって複雑に変化することを示していたが、その後1952年になってライデンにおいて反強磁性体 $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ の単結晶について詳細に実験が行われ、永宮自身の綿密な解析によって実験結果と理論が定量的に見事に一致することが示された。

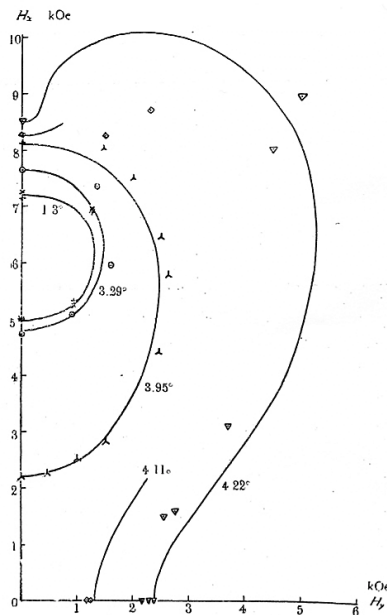


Fig. 9. Resonance curves in the ab -plane.
Experimental points: + 1.23°K and 1.27°K,
x 1.39°K and 1.43°K, o 3.29°K, Δ 3.98°K,
◇ 4.11°K and 4.15°K, ▽ 4.22°K.

Progress of Theoretical Physics, Vol. 11, No. 3, March 1954

Theory of Antiferromagnetic Resonance in $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Takeo NAGAMIYA

Department of Physics, Osaka University

(Received December 21, 1953)

After giving a short review of Nagamiya-Yosida's theory of antiferromagnetic resonance, it is shown that this theory is equivalent to Gorter-Ubbink's at absolute zero, so far as the external field H employed in the former is replaced by H' defined by $2H'_z = g_a H_z$, etc. and the parallel and perpendicular susceptibilities are related with observed susceptibilities in a suitable way (equations (1.9)), where g_a is the value of the g -tensor in the direction of the crystalline a -axis, etc. (§ 1). It is then shown that the small anisotropy of the Weiss molecular field can be taken into account by introducing an anisotropy energy of orthorhombic symmetry and that in this way the anisotropic Weiss field can be replaced by an isotropic one (§ 2). By using this anisotropy energy, the hyperbola in the ac -plane that defines

この理論は反強磁性共鳴の全体像を明らかにしただけでなく、部分格子磁化という概念が反強磁性体中の原子磁気モーメントの、集団運動の基礎となることを明らかにした点で反強磁性のミクロな観点からの理解の第一歩になったという大きな意義がある。反強磁性共鳴に始まる一連の反強磁性体にたいする永宮スクールによる研究は磁気異方性、反強磁性スピン波、ヘリカルスピン構造、クロムのスピン密度波などの数々の研究を生み出し、その後の反強磁性体研究進展のための強い原動力となっていた。

d 電子物理学の構築



金森順次郎

金森は本理学部物理学科を卒業後、1954年本学に採用され、爾来、1997年本学総長を最後に退官するまで、本学において教育・研究および大学行政に卓越した能力を発揮して、時代を代表する大学人として活躍したことは未だ記憶に新しい。

金森は遷移元素を含む広範な物質の物理的性質について、多くの先駆的理論を展開したが、その一つとして化合物磁性体の磁性理論がある。化合物中の陽イオンはd軌道と呼ばれる原子軌道上の電子が磁性を担うが、隣り合う陽イオンは陰イオン上の電子を介して相互作用する。金森はd軌道と結晶の対称性に視点を置いた理論を展開して、相互作用の符号が一般的に定まることを結論して、後に金森・グッドイナフ則と呼ばれる一連の法則を導いた。また、結晶が高い対称性を持つ場合、協力的ヤーン・テラー効果が起こり得ることを示した。ヤーン・テラー効果は対称性の高い分子が自発的に変形する現象であるが、協力的ヤーン・テラー効果とは各イオンが周辺の変形を伴いつつ相互作用する結果、相転移を引き起こす現象である。金森は初めてその本格的な理論を与え、また、その理論を用いてマンガン化合物、鉄、ニッケル、銅クロマイトやその混晶の結晶変形を議論した。この理論は、超巨大磁気抵抗や軌道整列でここ数年来特に有名になったマンガナイトに関連して再び大きな注目を集めている。

また、その理論を用いてマンガン化合物、鉄、ニッケル、銅クロマイトやその混晶の結晶変形を議論した。この理論は、超巨大磁気抵抗や軌道整列でここ数年来特に有名になったマンガナイトに関連して再び大きな注目を集めている。

金森はd軌道の電子が原子間を移動する金属・合金についても多くの研究を行なった。重要なものとして、ニッケルにおける電子相関の研究と遷移金属合金の磁性理論が上げられる。前者はあまりにも有名であるが、言うまでもなく、金属の電子相関を正面から扱った世界で初めての理論である。その後のハバードやグッツヴィラーの理論が模型を用いた一般論であったのに対し、金森は一般論にとどまらず、ニッケルの強磁性発現機構に重点を置いた点が特に独創的である。金属強磁性の発現に関しては、当時、ハートリー・フォック近似に基づくニッケルの強磁性理論があり、その有限温度に対する拡張なども行われていた。しかし、そのような理論はニッケルの強磁性を本当に説明しているとは言えない。電子相関を考慮しない平均場近似では、強磁性を安定化するエネルギーが極端に過大評価されているからである。例えば、電子ガスをハートリー・フォック近似で取り扱えば、ある程度の低密度で強磁性が安定になる。しかし、相関効果を考慮すればそれを超えてはるかに低密度になっても強磁性は発現しない。金森

275

Progress of Theoretical Physics, Vol. 30, No. 3, September 1963

Electron Correlation and Ferromagnetism of Transition Metals

Junjiro KANAMORI

Department of Physics
Osaka University, Osaka

(Received May 14, 1963)

The electron correlation in a narrow energy band is discussed taking into account the multiple scattering between two electrons. The discussion is an adaptation of Brueckner's theory of nuclear matter. It is assumed that electrons interact with each other only when they are at the same atom. The effect of the electron correlation depends in an intricate way on the energy spectrum of a given band. An approximate expression of the effective magnitude of the interaction is derived. The condition for the occurrence of ferromagnetism is investigated for various types of bands. The ferromagnetism of Ni and the paramagnetism of Pd can be understood reasonably through the present approach. The degeneracy of the *d* bands is taken into account in the discussion of these metals.

は d 電子の 2 体電子散乱をあらわに考慮することによって低密度電子系における電子相関を議論され、強磁性を安定化する電子間有効相互作用エネルギーの大きさは、相関効果によって最大 d 電子のバンド幅程度におさえられると結論した。この結論に基づけば、金属強磁性は容易には起こらないことになる。金属強磁性はバンド幅程度に相当する電子の運動エネルギーを犠牲にしても、強磁性になることによる電子間相互作用エネルギーの減少の方が大きい場合に実現するからである。金森はニッケルの場合に詳細な考察を進めた。ニッケルの電子状態を特徴づけている d バンドが結晶構造を反映して特殊な形をしており、そのために相関効果を考慮してもなお強磁性が発現していることを明らかにした。

With the above-mentioned assumptions, the effective value of U in the paramagnetic state can be defined as

$$U_{\text{eff}}(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2) = U \cdot 1 / (1 + UG(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)), \quad (13)$$

where the sum in (11) which defines $G(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$ is understood to be taken over the unoccupied states. Since $G(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$ is generally of the order of $1/W$, where W is the band width, (13) yields

$$U_{\text{eff}} \approx W \text{ if } U \gg W, \quad (14)$$

whose physical meaning was discussed in § 1. If the bottom of the band corresponds to a point of high symmetry such as $\mathbf{k}=0$ or $\mathbf{k}=\mathbf{K}/2$, G of the pair of

The last term of (21) may be interpreted as a part of the one electron energy; adding it to ΔE_1 given by (19), we obtain $(\Delta\varepsilon)^2 \eta(\varepsilon_F)$. The first term of (21) corresponds to the energy change arising from a modification of the electron correlation. Since the modification arises in the present approximation from a change in the availability of the states near the Fermi surface for the scattering, and since these states do not contribute much to the electron correlation because of the condition of the crystal momentum conservation, we may expect generally that the first term is small. It is shown in the Appendix that the first term is actually small in the case of $\eta = \text{constant}$. Neglecting thus the first term, we obtain for the condition of the occurrence of the ferromagnetism

$$\tilde{U}_{\text{eff}}(\varepsilon_F, \varepsilon_F) \eta(\varepsilon_F) > 1. \quad (22)$$

The condition (22) is too stringent, because we assumed a special type of ferromagnetism. Let $\varepsilon(\mathbf{k})$ be dependent on the magnitude of the wave vector only. $G(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2)$ with both \mathbf{k}_1 and \mathbf{k}_2 lying at the Fermi surface diverges for

後者の遷移金属合金の磁性理論に関しては平均 d 電子数と磁化との関係を示すスレータ・ポーリング曲線の起源を解明した研究があるが、遷移金属の物性を電子論にもとづいて定量的に議論しようとするその後の世界的潮流の原点ともなった。以上の研究や、電子構造を決定する非経験的計算による多くの定量的理論でも、金森は常に現実の物質に即した立場をとられた。たとえば、ホウ素や窒素が鉄の強磁性を増強する機構の研究の結果は、高性能磁石の設計のための指導原理の一つと目されており、最強の永久磁石として高機能機器に用いられているネオジ・ホウ素磁石も金森の理論によって理解される。遷移金属合金の磁性理論はその後多くの人々によって発展させられ、現在、ほとんどの金属磁性体の絶対零度における振る舞いを非常に精密に議論することが出来るだけでなく、未知の磁性体を設計してその物性を予測することさえ可能になってきている。

金森の数多くの研究の中でもここで紹介した、固体の d 電子状態について独自の見地から広範囲の理論を建設した研究は、「d 電子の物理学」と呼ぶべきものであり、物性物理研究の世界的な流れを作りだしてきた。歴史的にはその後の遷移金属、強相関電子系、重い電子系などに関する数多くの世界的研究を発展させた原動力として特に重要であるとともに、大阪大学の物性理論研究の最も強固な基盤の一つをなすものである。

4 物性物理学の実験

大阪大学理学部における物性実験グループは、理学と工学が融合した創立時における学際的な研究体制にその出発点がある。その後、長い歴史の中で、常に未来を見据えて物性物理学におけるフロンティアを開拓し続けてきた。低温物理学、半導体物理学、磁性物理学、結晶物理学などにわたるこれまでの研究の歴史を紹介する。

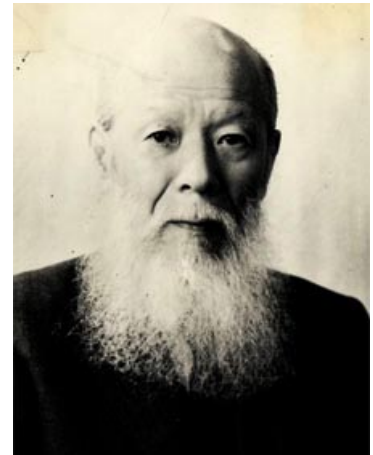
学際物理学のあけぼの

1931年（昭和6年）に創設された大阪大学理学部には1933年（昭和8年）の4月に19名の第1回物理学科新入生が入学している。創設当時の実験物理系は八木秀次教授の応用物理学講座、浅田常三郎教授の実験物理学第一講座そして菊池正士教授の実験物理学第二講座によって構成されている。第1回入学生のなかには後年、理学部の物性実験関係の中心となって阪大理学部の発展に貢献した伊藤順吉、川村肇の他に若槻哲雄、緒方惟一などがいた。

このように阪大理学部の物性実験部門は八木秀次を原点として出発している。阪大理学部が創設された直後、当時の阪大総長、長岡半太郎が特に懇望されて、東北大学工学部長であった八木を、理学部物理教室の主任教授として、迎えられたものと聞いている。八木の転任の背景には、日本に於ける工業の中心であった大阪に相応した理学の応用面にも配慮したものとして、大きな期待が込められていたと聞いている。八木は指向性の強い八木アンテナを開発したが、第2次大戦では日本軍でなく米軍の方が、YAG Iの名称で此のアンテナを広く使用していた事は有名である。

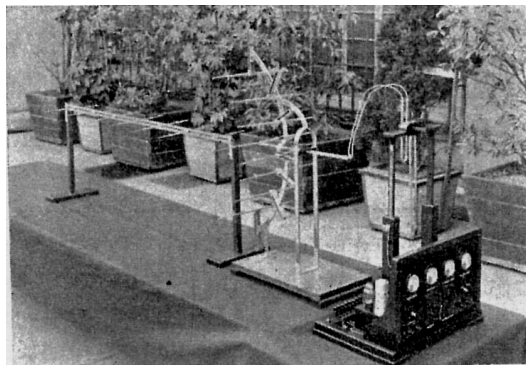
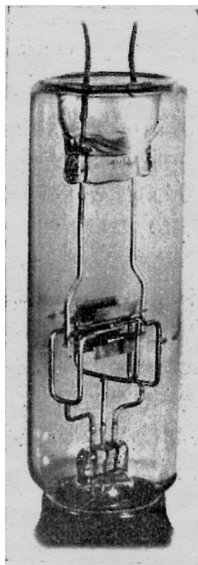
また、浅田は大阪大学理学部の創設委員として阪大理学部の骨格を形成した一人である。物理学の基礎のみならず応用物理の面についても博学多識で、その当時から常に欧文誌などに目を通し、最新の情報も身につけていた。大阪府堺市の出身で、言葉は全て大阪弁であった。この大阪弁の名講義は阪大理学部の名物の一つであったと聞く。研究分野は一口にまとめると分光光学であるが、なかでもレーダー専用マグネトロン製造に没頭したようである。また、産業科学研究所に放射線実験所を建設して、初代所長としてその発展に貢献した。

阪大理学部の物理学科にX線結晶学分野を確立したのは渡辺得之助である。1933年（昭和8年）に当時の化学教室の教室主任（後に理学部長）であった仁田勇教授に招聘され、仁田研究室の助手として着任した。1945年（昭和20年）、物理学第8講座の教授に昇任して、いわば化学と物理の学際講座的な役割を果たした。渡辺は結晶構造解析装置の改善・近代化と解析技術の進歩に大きな貢献をした。常に新しい装置の開発に挑戦し、液体ヘリウム伝導冷却型極低温ワイセンベルグカメラの試作などがその例である。解析技術の工夫も巧みで、撮影した画像のフーリエ解析ができるようになって原子像が画像化されるようになると解析を依頼される研究者が各方面から次々と押し寄せたという。



八木秀次と八木アンテナ

応用物理学の分野に近い岡部金治郎は、1935年（昭和10年）に八木秀次の強い要請によって名古屋高等工業学校教授（現名古屋工業大学）から大阪大学理学部の助教授として赴任した。最大の業績は、磁電管（マグネトロン）を発明したことである。同軸型二極管の軸方向に磁場をかけ、陽極電流のカットオフ特性から電子の e/m を測定する事を学生に命じたが、データに現れた小さなイレギュラーから陰極と陽極の間に電子振動が発生していることを見いだした。その当時は電気とか電子と言う分野は、むしろ工学に属するもので、岡部研究室は物理学科の中では、少し違った性格を持っていた。しかしそれが如何にも大阪大学の理学部らしい特長を示していた。



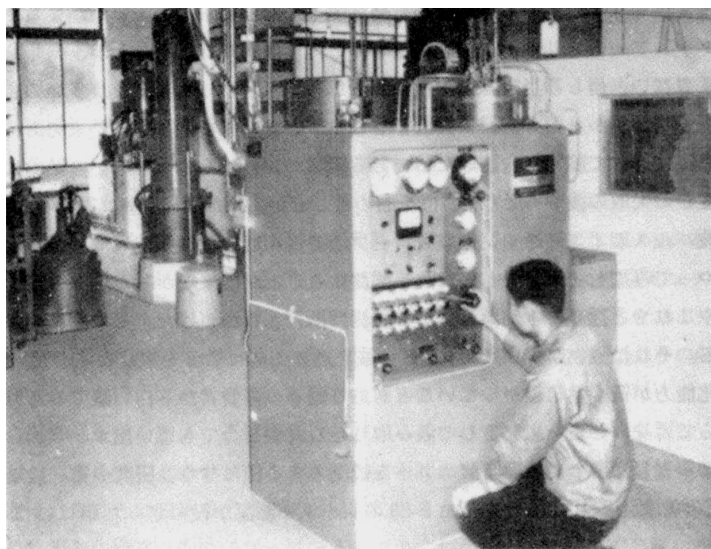
大阪管（左）と極超短波通話装置（上）

奥田毅は1933年（昭和8年）阪大理学部が創設された際、東北大学から助手として就任して、1949年（昭和24年）まで物理教室の発展に尽くした。最初分光学的研究から始めたが、その後我が国で最初にマススペクトルグラフの建設に成功して、いろいろな原子やその同位元素の質量の精密測定に多大の成果を挙げた。その頃一緒に研究を行っていた緒方惟一と松田久が、その研究を引き継いで更にそれを発展させ、質量分析分野の一大拠点を阪大に築いた。

1977年（昭和52年）、阪大理学部の分光学分野を発展させるべく東大物性研より招聘された櫛田孝司は、それまで積み重ねた多くの経験を生かしてレーザーを中心とした研究に着手した。とくに物質に光を照射して光が放出される二次光学過程に共鳴光散乱と吸収・発光過程の二つの過程があることに注目し、これが同一の過程に対する2つの側面としてどのような関係にあるかを明らかにし、光吸収・光放出が一つながりの量子過程として見なされる場合が共鳴光散乱に該当することを理論・実験の両面から明らかにした。その他に時間分解発光分光法やホールバーニング分光法などを確立し、タンパク質やガラス、高分子などの不規則系における構造ダイナミックスを明らかにした。

半導体物理学および低温物理学の源流

原子核物理実験分野の中心であった菊池研究室の出身である伊藤順吉、川村肇は、その後それぞれ物性物理学実験の方に転向した。伊藤は日本の原子核物理学の創成期に活躍した後、戦後は日本における核磁気共鳴の草分けとして指導的役割を果たした。また物性物理学実験における極低温領域の研究の重要性を早くから指摘して、永宮健夫とともに液体ヘリウムの液化器を阪大理学部を導入すべく奔走したのは有名な話である。一方、川村は大阪市立大学を経て、東京大学物性研究所の創成期にゲルマニウムやシリコンにおけるサイクロトロン共鳴を国内において初めて観測し、その後阪大理学部に戻ってからは国内に限らず広く世界の半導体物理学における中心的な存在として活躍した。とくに、阪大ではヘリコン波やアルヘン波といっ



阪大のヘリウム液化器第1号機（国内第2号機）

た磁気プラズマ共鳴の分野における様々な新しい物理現象の解明、そして非晶質半導体を中心とした複雑系物理学の芽吹きに大きな貢献をした。またIBMの招聘研究員としてアメリカに滞在した折に、その当時江崎玲於奈が着手していた超格子の研究にいち早く注目し、日本における低次元電子系の研究の灯を点したのは川村の先を見通す洞察力の鋭さを物語る一面である。その後、サイクロトロン共鳴の実験は川村研究室の助教授であった大塚穎三と当時助手であった呂瀬和生によって引き継がれ、両氏はキャリアの散乱機構の解明やホットエレクトロンに関する電子温度の直接的な測定、新奇な化合物半導体の結晶評価への応用や時間分解測定法の開発、遠赤外レーザー光の導入など新しい展開に努力した。

磁性研究の拠点構築へ

物性実験における中性子回折の草分け的存在である国富信彦は東北大学金属材料研究所(金研)で磁性の研究から研究生活をスタートして、その後日本原子力研究所(原研)で中性子回折の研究を始めた。早くから磁性の研究に於ける中性子回折の重要性に注目して、阪大に着任後も、日本における中性子散乱分野の指導的存在の一人として活躍した。世界に比べて後発の日本の中性子散乱を世界的レベルにあげるため、高束の研究用原子炉を国内に建設することと国際協力による日本人研究者の研究舞台の拡大に努力した。前者は原研改造三号炉という形で実現され、後者は日米科学協力事業という形で結実した。また、学内ではラジオアイソトープの研究環境の整備に努力した。これらをベースとして、不規則合金系のフォノンや磁性の研究において数々の業績を残した。

1959年(昭和34年)、伊達宗行は招聘されて、東北大学から阪大理学部へ講師として赴任した。伊達の阪大招聘には、理学部の二人の推進者、永宮健夫と伊藤順吉の熱い思いが込められていた。それは阪大理学部に物性物理学のセンター・オブ・エクセレンス(COE)を創ろうという構想であった。着任以来三十数年間、伊達は阪大理学部で研究と教育に携わり、常に独創的な研究を発表し続けることによって、永宮・伊藤の夢にその期待を超えて応えた。最初の大きな研究は、「反強磁性共鳴」の研究である。これは、当時もっとも美しい理論と言われていた「永宮理論」の不備を指摘し、それを超えた完全な理論と実験を構築したもので、伊達の名を、一躍、世界的にした仕事である。次の大きな研究としては「スピングラス共鳴」という新しい現象と概念の発見を挙げることができる。これは既成の基礎概念を変えてしまう内容を持ったもので、伊達の直感力と深い洞察力を示した代表的な研究である。そしてその名を不動なものとした「阪大強磁場」の計画と建設が始まる。これは、多層コイルを用いて、百テスラを超えた超強磁場を発生させるというものであり、阪大を日本における強磁場物性の研究拠点の一つとして大きく発展させた。

このように阪大物理学科の物性物理学実験は脈々と流れる伝統に支えられた基本精神を基に、次々と新しいことに挑戦しながら発展し続けている。

参考文献

- 1) 阪大春秋(大阪大学創立60周年記念同窓会誌)



超強磁場マグネットの外観(上)と多層コイル部分(下)

最近の研究トピックス

物性物理学の実験から素粒子理論までの幅広い物理学の分野に展開している物理学専攻の研究グループが主導した最近の研究成果を紹介します。

重い電子と超伝導の混合状態

強相関電子系の研究では、重い電子と超伝導の混合状態の解明が一つのターゲットとされました。そしてこの混合状態でのドハース・ファンアルフェン効果の測定に成功しました。

金属中の電子は大きく2種類に分類されます。一つは金属中を自由に動き回る遍歴電子で、もうひとつは原子に束縛されている局在電子です。ところが、セリウム化合物やウラン化合物中では、セリウムやウラン原子の位置に束縛されそうで辛うじて動いているという微妙な電子が存在します。この電子はゆっくり運動し、みかけ上の質量（有効質量）がとてつもなく重いので、重い電子系と呼ばれます。この物理の背景は、局在していたセリウムやウランの f 電子が近藤効果を通して遍歴電子になることを意味します。そして、その物性には様々な面白い異常が観測されています。例えば、束縛されかかっているときに、電子と電子はお互いに強く牽制しあうので、動いている時も牽制を引きずって動くことになります。つまり運動の向きや大きさなどに制約を受けながらゆっくり動いているのです。そんな電子集団が超伝導になると、普通の金属の超伝導とは異なりとても魅力的な不思議な超伝導が発現します。

重い電子系は、フェルミ面と呼ばれる伝導電子のもつ最大の等エネルギー面近傍での異常が主な起源になっています。我々は、重い電子系の研究手段に、フェルミ面の情報を直接検出できるドハース・ファンアルフェン (dHvA) 効果を利用しています。dHvA 効果は、磁場の逆数を変数として磁化が振動する現象で、Fig. 1 のような美しい振動が観測されます。この振動の振動数や振幅を詳し

く解析し、フェルミ面の大きさと形状、伝導電子の有効質量の情報などを得ることができます。しかし、dHvA 効果を観測するには、純良単結晶を使用し、超低温・強磁場中での高感度測定を実現する必要があります。我々は、世界でもトップクラスの純良単結晶の育成に成功しており、dHvA 効果を利用した重い電子系の研究の最前線を走っています。特に、超伝導混合状態での dHvA 効果の観測に成功しましたが、この研究は世界でも成功例が少なく、他の追随を許さない研究です。

(Low Temperature Physics 25(1999)573

Y. Inada and Y. Onuki)

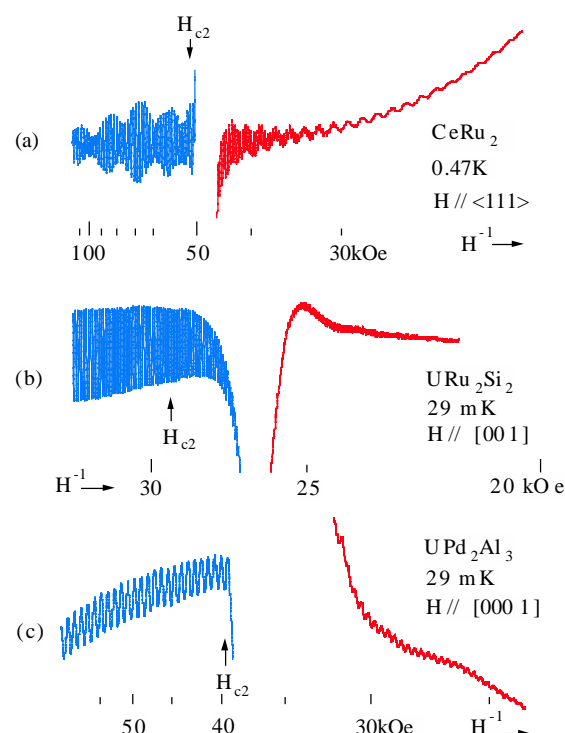


図1 超伝導混合状態とノーマル状態のドハース・ファンアルフェン振動 (NbSe₂, CeRu₂, URu₂Si₂ and UPd₂Al₃)

新しいナノ凝集体の構造と物性

物性物理学の分野では新しい物質の創生はたいへん重要です。研究の焦点の一つはスピンも含めた多数の自由度をもつ多電子系の振る舞いの解明に向かっていますが、このとき電子を閉じこめる容器としての固体構造を人為的に制御できれば極めてエキサイティングな物理学のフロンティアが開かれるはずで

す。最先端技術を駆使してマクロとマイクロの間サイズの実験室を人工的に作り上げて物性研究を行うメゾスコピック系の研究では、独自の磁気電気容量法によって、量子ホール効果におけるエッジ状態の幅を決定することに成功しました (K. Oto, S. Takaoka, and K. Murase, *Physica B*, 298 (2001) 18-23) .

一方で、自然に逆らわずに人間がわずかの手助けをするだけで新しいタイプのナノ物質が創生できることを明らかにしました。例えば、ナノ触媒を利用した新一次元固体構造、「シリコン・ナノ結晶チェーン」です (図2)。最先端の電子顕微鏡法を駆使して、節の部分は半導体のシリコンからできていて、そしてくびれの部分は絶縁体のシリカからできていることが分かりました。電子機器のほとんどに使われている LSI やトランジスターと同じ構造が、高度なテクノロジーを駆使しなくとも、ナノメートルサイズの世界では自己形成することが見いだされたのです。

成長の方法は以下の通りです。ナノメートルサイズの金の粒を高温で溶かして触媒とし、そこに原料のシリコンを供給します。触媒から、つくしのよう

にシリコンのワイヤーが成長します。ここで酸素と微量の不純物を添加すると、触媒とワイヤーとのナノ固液界面が変化して触媒の形が息継ぎをするように形を変えます。このようにすると、ワイヤーは成長しながら繰り返し太さ

が変化してシリコンナノ結晶チェーンになります。(H. Kohno, T. Iwasakii and S. Takeda, *Solid State Communications* 116(2000)591)

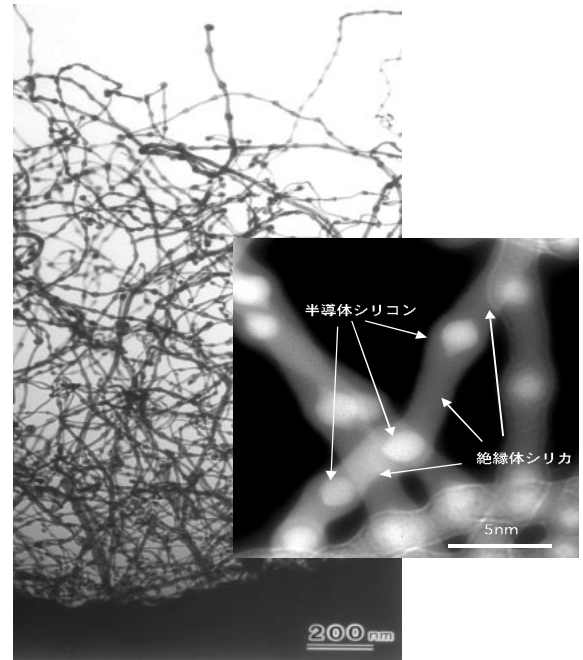


図2 自己形成した半導体・絶縁体周期的ナノ構造

ゼオライトと呼ばれる多孔質結晶の中にあるナノメートルサイズの空洞に非磁性金属原子のクラスターを埋め込み配列させると原子数に依存して強磁性となります。この新現象はナノサイエンスと強相関電子系にまたがる重要な研究成果 (T. Nakano, Y. Ikemoto and Y. Nozue, *Physica B* 281&282 (2000) 688.) です。最近、物理学専攻に生まれた新しい研究グループが研究を推進します。

現在、ナノテクノロジーがたいへん注目されていますが、テクノロジーの発展の裏側には必ずサイエンスが必要です。「なぜ、どうして?」という好奇心や疑問を、半導体、磁性、複雑系、金属など物性物理学に立脚して一つ一つ解決する地道な基礎研究なしでは真に新しい発見は期待できないと考えています。

高分解能物理測定装置の開発

他の自然科学と同様に、物性物理学でも新しい実験装置を工夫して作ったり、実験方法を開発する努力を怠ってはなりません。レーザー光によって複雑な物質の内部で起こる超高速現象を解明するための装置と手法を開発しています。強い磁場と光の両方で半導体結晶の中の電子の有効質量を正確に測定する光検知サイクロトロン共鳴法 (ODCR) を格段に進歩させ CdTe や ZnSe などの II

—VI族化合物半導体の双晶境界に2次元電子系が形成されていることを明らかにしました (T. Ohyama et al., J. Phys. Soc. Jpn., **70** (2001) 2185)。

液体 (二硫化炭素) の光散乱スペクトルにおいては、揺動散逸定理に基づく光散乱の表式が成り立っていないことを見いだしました。このことは、振動数の接近した領域にマイクロな量子力学的運動とマクロなゆらぎが共存していることを意味しており大変興味深い発見です。

(J. Watanabe, Y. Watanabe, and S. Kinoshita, Chemical Physics Letters **333** (2001) 113)。

また、私たちは、極めて高精度で物質の質量を測定する質量分析器を開発しています。この装置を用いて生体物質、宇宙塵、環境物質などの質量を正確に測定して大変重宝されています

(M. Toyoda, M. Ishihara, and I. Katakuse, Advances in Mass Spectrometry, **15** (2001), 437)。

加えて極低温での磁化測定やナノサイエンスには不可欠な原子を見ることのできる電子顕微鏡の技術も超一流で、次々と新しい発見をもたらしました。

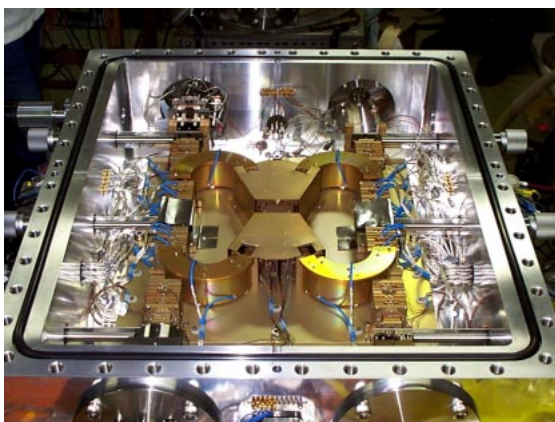


図3 マルチターン型飛行時間測定質量分析計

非平衡相転移の理論的研究

非平衡相転移という言葉には二重の意味が含まれています。一方は、非平衡状態を経由して生じる相転移、他方は、非平衡状態において生じる相転移です。「非平衡状態」にも様々なものが考えられますが、私たちは光によって作られた非平衡状態に着目し、上記の二通りの観点から理論的に研究しています。すなわち、

(1) 光励起状態を経由した相転移現象

(2) 光励起状態での様々な相と相間の競合現象です。

(1)の研究では、光励起状態を経由して生じる相転移現象がどのような条件下で生じるのか、また、その時間発展過程はどのようなものを理解することが、第一の目標です。「ある相から別の相」への転移は、2通りの方向があります：(A) 準安定状態から絶対安定状態へ、(B) 絶対安定状態から準安定状態へ。前者(A)は、エネルギー的に高い状態 (準安定状態) から、ポテンシャルバリアを越えることによって、エネルギーを散逸しながら、低エネルギーの絶対安定状態へ遷移する過程です。後者(B)は、外界から連続的にエネルギーを注入されながら、過渡的に準安定相を生成する過程です。転移ダイナミクスは、この両者で大きく異なることが、最近の研究から明らかになってきました。

パルス光照射によって、「準安定状態⇌絶対安定状態」相転移が引き起こされる過程は、次のように考えられます。光照射前は、物質は準安定で一樣な或る状態にあるとします。光照射により物質内の電子等が励起状態に遷移し、物質中に一つあるいは複数の局所的な変化が誘起されます。光照射を止めた後、光によって生じた局所構造変化が、物質中の電子や結晶格子間の協力効果 (相互作用) によって、結晶全体にわたる大域的構造変化に成長します。結晶全体が構造変化し終わって、光照射前とは異なる一樣状態に落ち着き、光誘起構造相転移が完了します。このダイナミクスに関連する研究は、

(A) 1次元局在電子-格子系での「ドミノ倒し」機構の解明です。

他方、連続光照射によって生じる「絶対安定状態⇌準安定状態」は、光誘起ドメイン注入とも考えられます。寿命の長い過渡的な準安定相が、光照射時間内だけに光照射領域内で、巨視的に成長・継続する現象で、このダイナミクスに関連する研究は、

(B) 光誘起スピン状態転移の現象論的研究です。

(2)の研究においては、励起状態に不可避な「有限寿命」の効果が、相転移過程にどのような影響を及ぼすかを理解することが重要です。これに関しては、様々な側面からの研究が考えられますが、最近では、相分離 (スピノーダル分解) 過程の時間ダイナミクスに及ぼす有限寿命の影響の解明

に焦点を絞る,

(C)寿命のある多粒子系でのスピノーダル分解ダイナミクスの研究を行なっています。

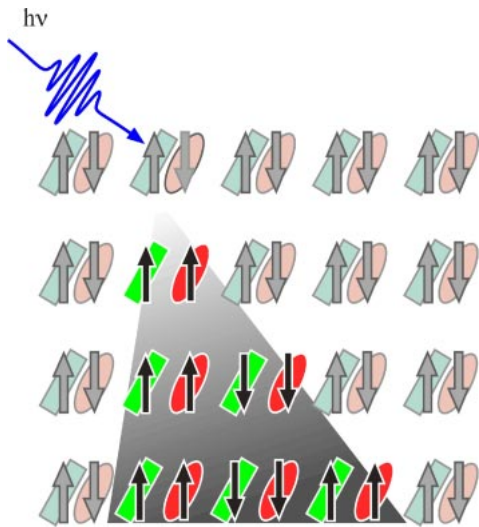


図4 光誘起のスピンの状態転移

希薄磁性半導体の電子状態と磁性

第一原理計算手法の開発とコンピュータの計算能力の急激な発展にささえられて、近年、実験に頼らず第一原理計算のみによって現実物質の物性予測を行うことが可能となってきました。例えば、単体金属や単純な金属間化合物では原子番号だけを入力パラメータとする第一原理計算により、物性発現機構の解明を行ったり、物理量を計算して実験データを定量的に再現することができるようになったのです。その結果、新機能やねらった物性を示す新物質相を計算機上でデザインすること、あるいは量子シミュレーションによる解析結果からマテリアルデザインのための新しいガイドラインを発見することが、単なる夢ではなく、現実的なこととなりつつあります。とりわけ、ナノサイエンスが目指す量子スケールにおける構造の構築と、そこで期待される新機能の探求には、ナノ構造におけるマテリアルデザイン---計算機ナノマテリアルデザイン---の飛躍的発展が不可欠です。すでに半導体物理学の世界においては、超構造やヘテロ界面、量子井戸や量子ドットなど、狙った構造を高い精度で形成する技術が格段に進んできています。そこでは自由なナノマテリアルデザインの発想を現実のものとしていくことが、限られた範囲内ではあるが、可能になってきました。電荷だけではなくスピンの自由度を制御して新しい物

理とその応用を目指そうというスピントロニクス材料のデザインはそのような例です。われわれのグループでは III-V 族系希薄磁性半導体 (In, Mn)As, (Ga, Mn)As, (Cd, Mn)GeP₂ などのキャリア誘起強磁性の機構および (In, Mn)As/(Al, Be)Sb, (Cd, Mn)Te/(Al, C)(As, C)のキャリア制御による強磁性発生の可能性について KKR-CPA-LDA (不規則性を含む固体の電子状態を第一原理に基づいて計算する手法, KKR は Korringa-Kohn-Rostoker method, CPA は coherent-potential approximation, LDA は local-density approximation in density functional method の頭文字をとったもの) による第一原理計算に基づく研究を行い、以下の点を明らかにしました。希薄磁性半導体においては磁性イオン間に働く磁気的相互作用がキャリアの存在に強く影響されることが本質的に重要です。すなわち、キャリア濃度の薄いところでは、超交換相互作用による反強磁性的相互作用が支配的であり、磁性イオンの不規則配置を反映してスピングラス的な磁気構造が実現されます。一方キャリア濃度が増えるとともに、キャリアの移動による運動エネルギーに由来する一般化された二重交換相互作用が超交換相互作用に打ち勝つために強磁性が安定化されるようになります。このような知見をもとに、超構造磁性半導体やカルコパイライト型磁性半導体の可能性などを予言しました (図5)。

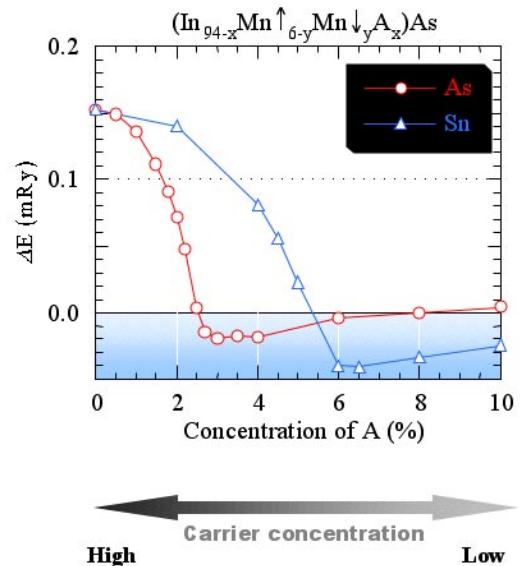


図5 第一原理計算により得られた (In, Mn)As のドーピング量と磁性の関係。縦軸はスピングラス相と強磁性相とのエネルギー差。正の領域では強磁性が安定。

超対称ゲージ理論・シグマ模型

ある種の4次元超対称非可換ゲージ理論では、相互作用を完全に取り入れて厳密な物理的結果を引き出すことができます。一方で、低次元では完全に力学的振舞が解けてしまう可積分系が存在します。中津は1996年、 $N=2$ 超対称Yang-Mills理論の厳密解が1次元戸田格子の分配関数の断熱極限として与えられることを示し、低次元可積分系と4次元超対称ゲージ理論の間に普遍な関係があることを示唆、その後、多くの研究者により確かめられています。また、窪田らは、1998年、4次元超対称ゲージ理論で、共形対称性を実現する特別な点の周囲でのくりこみ群の流れを調べ、興味深い結果を得ました。

また非線形シグマ模型は、場が曲がった空間上に値をとる理論です。中でも2次元時空間上の非線形シグマ模型は、曲がった空間上を運動する弦模型を記述するので特に重要です。東島らは、1999年、エルミート対称空間に値を取る非線形シグマ模型を、平坦な場の空間に拘束条件を課すことにより、ゲージ理論として定式化しました。また、リッチ平坦な空間に値を取る超対称非線形シグマ模型には発散がありませんが、東島らは2001年、非コンパクトなリッチ平坦な空間に値を取る非線形シグマ模型を構成しました。

- T. Nakatsu and K. Takasaki, Mod. Phys. Lett. A11, 157 (1996).
T. Kubota and N. Yokoi, Prog. Theor. Phys. 100, 423 (1998).
K. Higashijima and M. Nitta, Prog. Theor. Phys. 103, 635 (2000).
K. Higashijima et al., Phys. Lett. B515, 421 (2001).

質量混合とCPの破れ

現在の標準モデルでは、質量の生成は、粒子間の混合、及びCP対称性の破れをも帰結します。高杉らは1996年から2001年にかけてマヨラナ粒子としてのニュートリノの可能性、レプトン数の非保存、CPの破れの位相の構造を詳しく明らかにしました。田中らは、1997年から1999年にかけて、超対称大統一模型におけるレプトンフレーバーの破れについて詳しい計算をおこない、将来

の線形加速器実験での検証を待っています。

- T. Miura et al., Phys. Rev. D64, 073017 (2001).
J. Hisano et al., Phys. Rev. D60, 055008 (1999).

超弦理論—branes、非可換幾何、行列模型

この数年、超弦理論には、弦以外にソリトンの実体として、ブレーン(branes)と呼ばれる部分時空間が力学自由度として存在することが明らかにされました。ブレーンを用いることにより、その上に実現する場の理論の非摂動的な性質を探ることができます。太田らは、1998年、ブレーンが複数個ある場合、その相対的な配位によって超対称性の部分的破れのパターンが決まることを示しました。3次元場の理論、Chern-Simons理論もブレーン理論を使い、詳しく調べました。また、ブレーンが弦理論特有の背景場中におかれると、ブレーン上で非可換時空間が実現します。非可換時空間上のソリトン、Yang-Mills場の非摂動的性質の解明もおこなわれました。

超弦理論を摂動論の枠組みを越え、非摂動的に定式化するのに行列模型が提唱されています。土屋らは1997年から1999年にかけて、タイプII B超弦理論を定義するIKKT行列模型を提唱しました。行列模型のループ方程式から超弦場方程式を導出、行列の固有値分布と時空間構造の関係を明らかにしました。

- N. Ohta and P. K. Townsend, Phys. Lett. B418, 77 (1998).
T. Kitao et al., Nucl. Phys. B539, 79 (1999).
T. Hotta et al., Nucl. Phys. B545, 543 (1999).

モノポールと重力

現在、実験で検証されている範囲では、重力はEinsteinの理論で、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用はYang-Millsの非可換ゲージ理論で正しく記述されます。実は、重力と非可換ゲージ相互作用が結びつくだけで、スカラー場なしで、モノポール解やダイオン解が存在すること、特に、負の宇宙定数がある場合、モノポール解、ダイオン解は安定となること、解のスペクトルにはスケールリング則が成り立つことを細谷は1999年から

2001年にかけて証明しました。

おもしろいのは、重力があるとゲージ場だけで、モノポールのようなソリトンが存在するようになることです。Einstein 重力では、すべてのエネルギーがお互いに引きつけあい、非可換ゲージ相互作用による斥力と釣り合って、モノポール（磁気単極子）が実現します。このことは、1988年、Bartnik と McKinnon によって初めて指摘されたのですが、その後彼らの解は不安定であることがわかりました。細谷は 1999年、なんらかの効果で負の宇宙項が生成されると、中心部は空洞、そして殻状に非可換ゲージ場が絡み合い、外側にはモノポール磁場が生き残るといふ「空洞モノポール」が現われるのを見いだしました。驚くべきことにこの空洞モノポールは安定であり、初期宇宙でのモノポール存在の可能性を示唆しています。

このモノポール解のスペクトルは、数学的に興味深い構造を持っています。モノポールは磁荷 Q_M と質量 M で特徴づけられ、宇宙項 Λ の関数となります。 Λ が零か正のときは、このスペクトルは離散的ですが、 Λ が負になると、スペクトルは連続的な branch 群となります（図6を参照）。 Λ が負の領域から零に近づくときに現われる解の生成

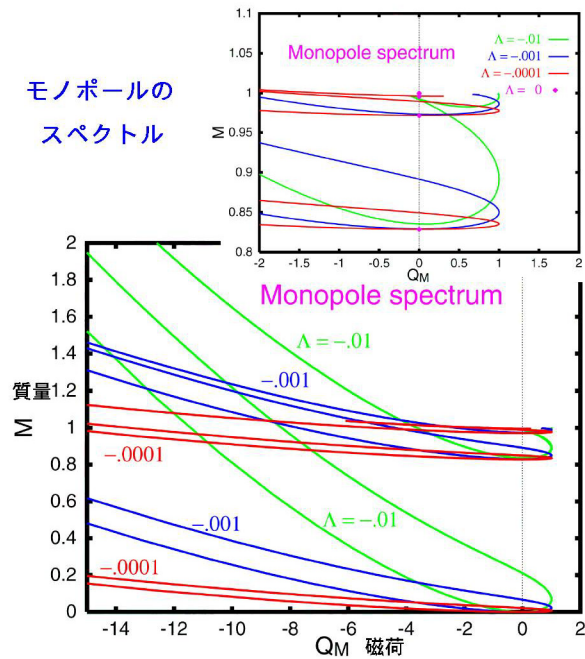


図6 横軸は磁荷、縦軸は質量。| Λ | が小さくなると各 branch はだんだん押し潰れ、新しい branch が次々と現われる。 $\Lambda = 0$ の極限では、 $Q_M = 0$ 上の無限個の離散点の集合となる。 $\Lambda > 0$ では、 $Q_M > 0$ に離散点が移動する。

現象は、フラクタルの構造を持ちます。

J. Bjoeraker and Y. Hosotani, Phys. Rev. Lett. 84, 1853 (2000); Phys. Rev. D 62, 043513 (2000).
Y. Hosotani, J. Math. Phys. 43, 597 (2002).

核子以外の自由度を含む原子核および核子の電磁、弱い相互作用過程の研究

デルタ共鳴領域におけるパイ中間子光・電子発生過程の中間子交換モデルを構築し偏極を含むさまざまな物理量を予言しました。このモデルは Jefferson Lab, MIT-Bates, Mainz で得られつつある高精度の実験データを説明し、一つのスタンダードなモデルとなっています。この研究からデルタ共鳴の磁気的雙極子形状因子に対する中間子雲の効果及び電気的 4 重極形状因子の存在が明らかにされました。

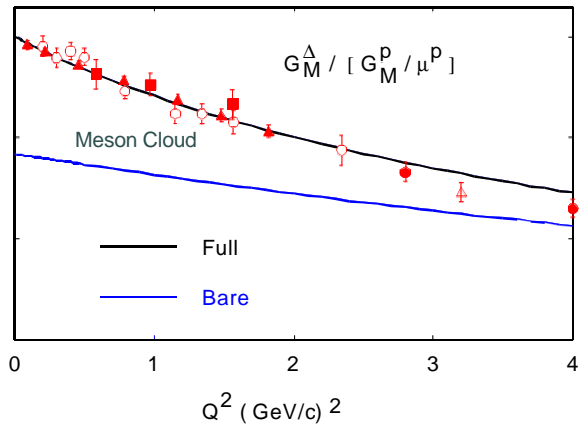


図7 デルタ共鳴の磁気的雙極子形状因子に対する中間子雲の効果

ニュートリノと重陽子の荷電、中性電流による反応を、中間子交換電流をとりいれ研究しました。この結果は SNO における太陽ニュートリノ検出実験に用いられ重要な役割を果たしました。さらに太陽ニュートリノの重要な源である陽子-陽子衝突によるベータ崩壊を調べました。この結果は地上実験の可能性と基本的弱相互作用の解明に大きな寄与をすると考えられます。

バリオン間の弱い相互作用の研究手段として、核子-核子衝突によるハイペロン生成反応を提唱しました。ここでは、中間子交換モデルを用い、ハイペロン生成断面積、偏極量などを調べ、それら

が、バリオン間弱相互作用について有用な情報を与え得ることを示しました。

重イオン衝突で発生するハイパー核の運動量分布は、その生成過程機構に強く係わっています。いくつかの典型的反応機構とハイパー核の運動量分布との関連を示しました。

カイラルソリトンクォーク模型に基づくハドロン構造の研究

核子による電子深部非弾性散乱のける非偏極分布だけでなく、縦偏極分布に対しても海クォークの大きなアイソスピン非対称性を予言するのがカイラル・クォーク・ソリトン模型の著しい特徴であることを強調しました。また 核子中のクォーク・スピンの分布だけではなく、クォークの運ぶ軌道角運動量分布関数を理論的に計算し、その振る舞いを調べました。

核子のスピン構造関数 $g_2(x)$ をカイラル・クォーク・ソリトン模型の枠組みで計算し、そのツイスト2とツイスト3の部分への分解を実行しました。理論の予言は2次のモーメントに対する SLAC グループの解析と定性的にコンシステントであることが示されました。

ニュートリノ振動の発見

標準理論では、中性のレプトンであるニュートリノは ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ の3種類あるが、それぞれ質量は0であり、お互いに混じり合わないとされてきた。しかし、この仮定が誤りであることを、旧長島グループは宇宙線研や他大学と共同して行ったスーパーカミオカンデの実験において発見しました。

以前から、岐阜県の神岡鉱山の巨大水槽の実験カミオカンデや他の実験から、太陽から来る ν_e や、大気上空において宇宙線によって作られた ν_μ の地上に到達する数が、理論的予想の約半分であるという兆候がいくつか出され始めました。

この一つの説明は、ニュートリノ振動と呼ばれる現象です。これによると、ニュートリノには ν_1 、 ν_2 、 ν_3 というわずかに質量を持った固有状態があり、それぞれがその固有の質量による振動数で振動しています。さらに、我々が観測している ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ は弱い相互作用における固有状態であり、これらは先の ν_1 、 ν_2 、 ν_3 の重ね合わせです。す

ると、 $t=0$ で純粹な ν_μ も、時間が経つとともに、それを構成してる例えば ν_2 、 ν_3 の成分の位相がずれてくるため、 ν_μ の振幅が小さくなります。

旧長島グループはカミオカンデの実験の解析とともに、さらに統計精度を上げるべく、新たな実験装置スーパーカミオカンデの建設と解析に関わりました。カミオカンデに比べ、スーパーカミオカンデは約17倍の体積を持ちます。

ここでも、ニュートリノの数の不足は改めて確認されましたが、最も説得力のあるニュートリノ振動の証拠は、大気ニュートリノの角度分布です。大気ニュートリノは大気の上空で一様に作られます。そうした球面上で一様に作られたニュートリノを球の内部から観測すると、単位立体角あたりのニュートリノの数 (flux) は角度によらず一定となります。しかし ν_μ の量は、図8に示すように地球の裏側からくるものほど (飛んでくる距離の大きいほど) 少ないことがわかりました。この結果は、大気ニュートリノの生成のモデルなどにほとんどよらず、ニュートリノ振動を示す明らかな証拠です。これにより、今までニュートリノは質量がなく、その種類が変わることはないという標準理論の仮定を大きく覆しました。

(Y. Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998))

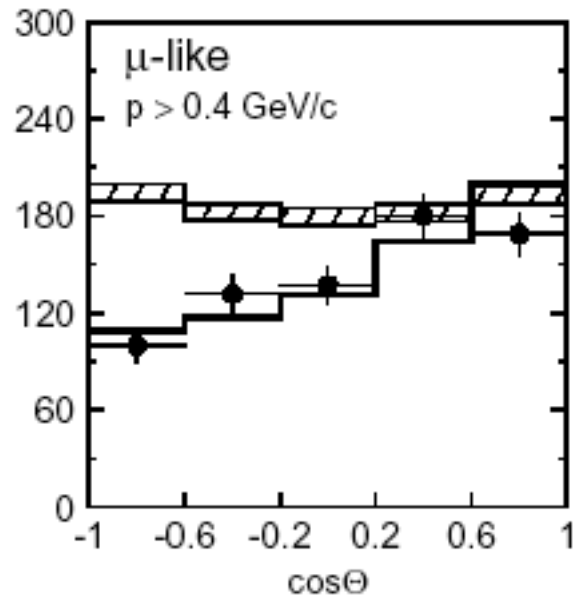


図8 大気ニュートリノ (ミューオンニュートリノ) の天頂角分布。Cos $\theta=-1$ は地球のちょうど反対側から真上に向かって飛ぶニュートリノの向き、Cos $\theta=+1$ は真下に飛ぶ向きをあらわす。十字はデータ、斜線の箱はニュートリノ振動がないと仮定し

た場合の分布である。地球を突き抜けてきた ($\cos\theta < 0$) の領域で、ミューオンニュートリノが明らかに減っている。

CP 対称性の破れ

弱い相互作用は、粒子・反粒子の入れ替え (C) と空間反転 (P) に対する対称性をそれぞれ完全に破っています。さらに、この両者を同時に行う変換 (CP) に対しても、わずかに対称性が破れています。CP の破れは、宇宙がビッグバンでできた後、粒子・反粒子の間のわずかなえこひきを生み、今ある物質世界を作り出すために必要な条件です。

1964 年に中性 K 中間子において発見された CP の破れを説明する理論は数多くありましたが、現在まで生き残ったのは標準理論とスーパーウィークモデルの二つだけです。このどちらが正しいかを検証するため、山中グループ (旧長島グループ) は米国の研究機関と共同で米国の Fermilab 研究所において KTeV と呼ばれる実験を行ないました。ここで、 K_L 、 K_S が $\pi\pi$ に壊れる分岐比の比を精密に測定した結果、スーパーウィークモデルが誤っていることを 6 シグマの有意さで明らかにしました。これにより、小林・益川が提唱した標準理論による CP の破れのメカニズムがより確からしくなってきました。

(A. Alavi-Harti et al., Phys. Rev. Lett. 83, 22 (1999))

また、B 中間子と B-bar 中間子の間の移り変わりにおいても、CP の破れはあるはずですが。それを探るために山中グループ (旧長島グループ) は、筑波の KEK において Belle 実験を行ないました。B 中間子の崩壊地点を約 $100\mu\text{m}$ の精度で測定するシリコン検出器の開発と組み込みを行い、この実験の中心である $B\text{-bar} \rightarrow J/\psi K_S$ の解析を行ないました。その結果、B 中間子が $J/\psi K_S$ に壊れるまでに飛ぶ距離の分布が、図 9 に示すように、 B^0 と $B^0\text{-bar}$ で有意に異なることを示しました。これにより、標準理論による CP の破れの説明がさらに確からしくなりました。

(K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001))

B 崩壊の荷電空間での パリティ対称性を検証

陽子と中性子は核子のアイソスピンが上向きと下向きの状態です。弱い相互作用により、陽子は原子核内で陽電子崩壊するが、これが中性子の電子崩壊と同一の現象か否かという問題は、荷電空間における反転対称性 (G パリティ) が核の β 崩壊過程で保存するかという問題、言い換えれば荷電空間においた仮想の鏡の内と外で物理法則が同じかという問題に帰着します。原子核内核子の β 崩壊はとどのつまり運動量移行ゼロ (極低温) でのクォークの β 崩壊です。この観点から G パリティ保存則は理論的に、up と down クォークの質量差と核子質量に比例する $(m_u - m_d)/2M$ の程度破れている可能性があります (Quark sum rules)。南園グループは、核スピン整列したベータ放射性核 ^{12}N と ^{12}B で β 線角度分布の超高精度測定を行い、G パリティを保存しない誘導テンソル項は極めて小さく、標準モデルを超える大きな破れは無い事を高い精度で検証しました。しかし、極わずかながら誘導テンソル項がゼロでない可能性をも示し、核内クォークの質量差を定量する研究方法を初めて示しました。

(T. Minamisono et al., Phys. Rev. Lett. 80, 4132 (1998)).

素粒子・原子核の実験グループからは、上記の

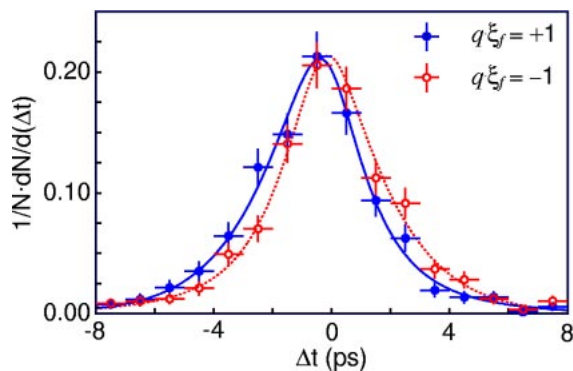
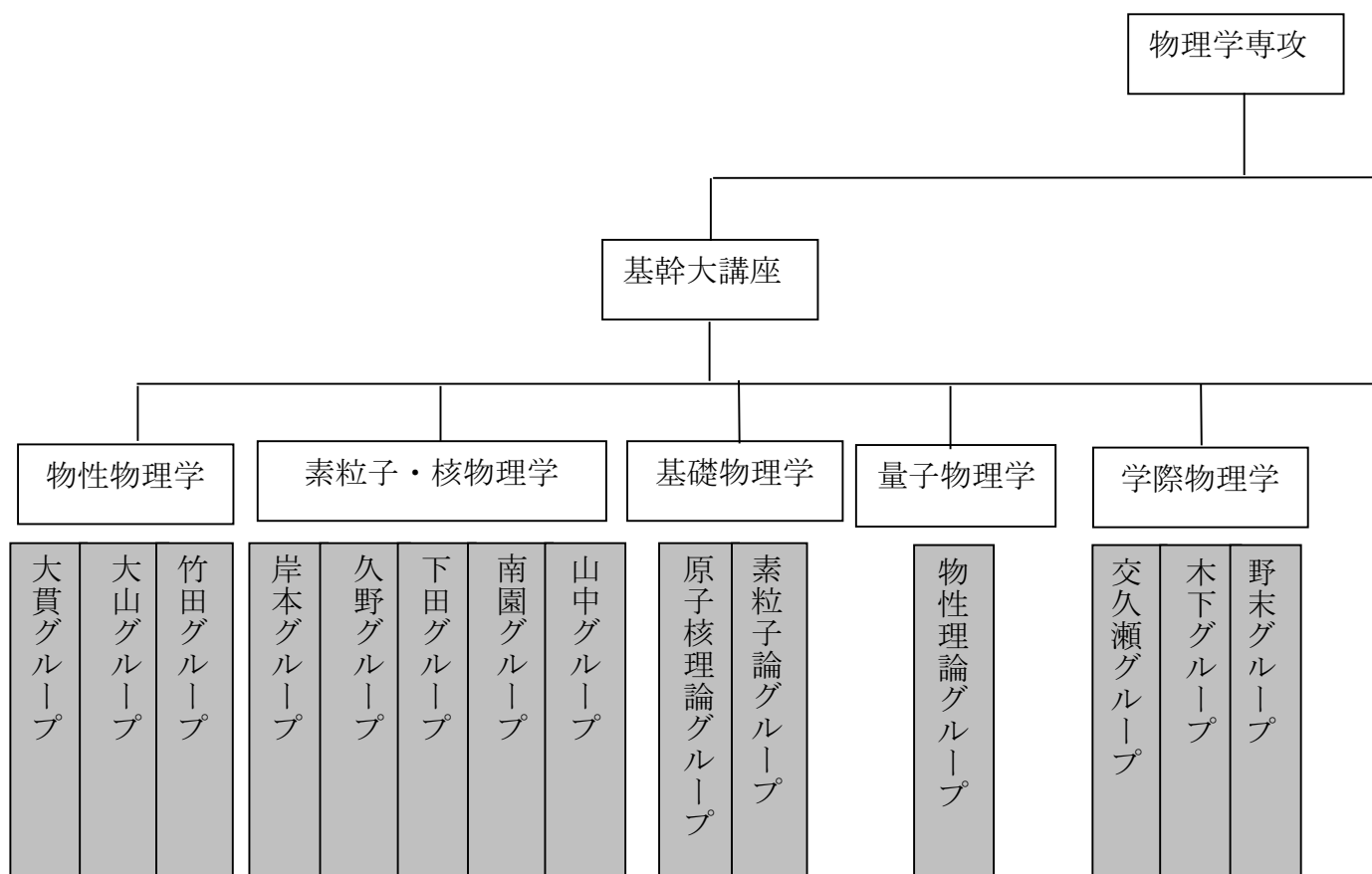


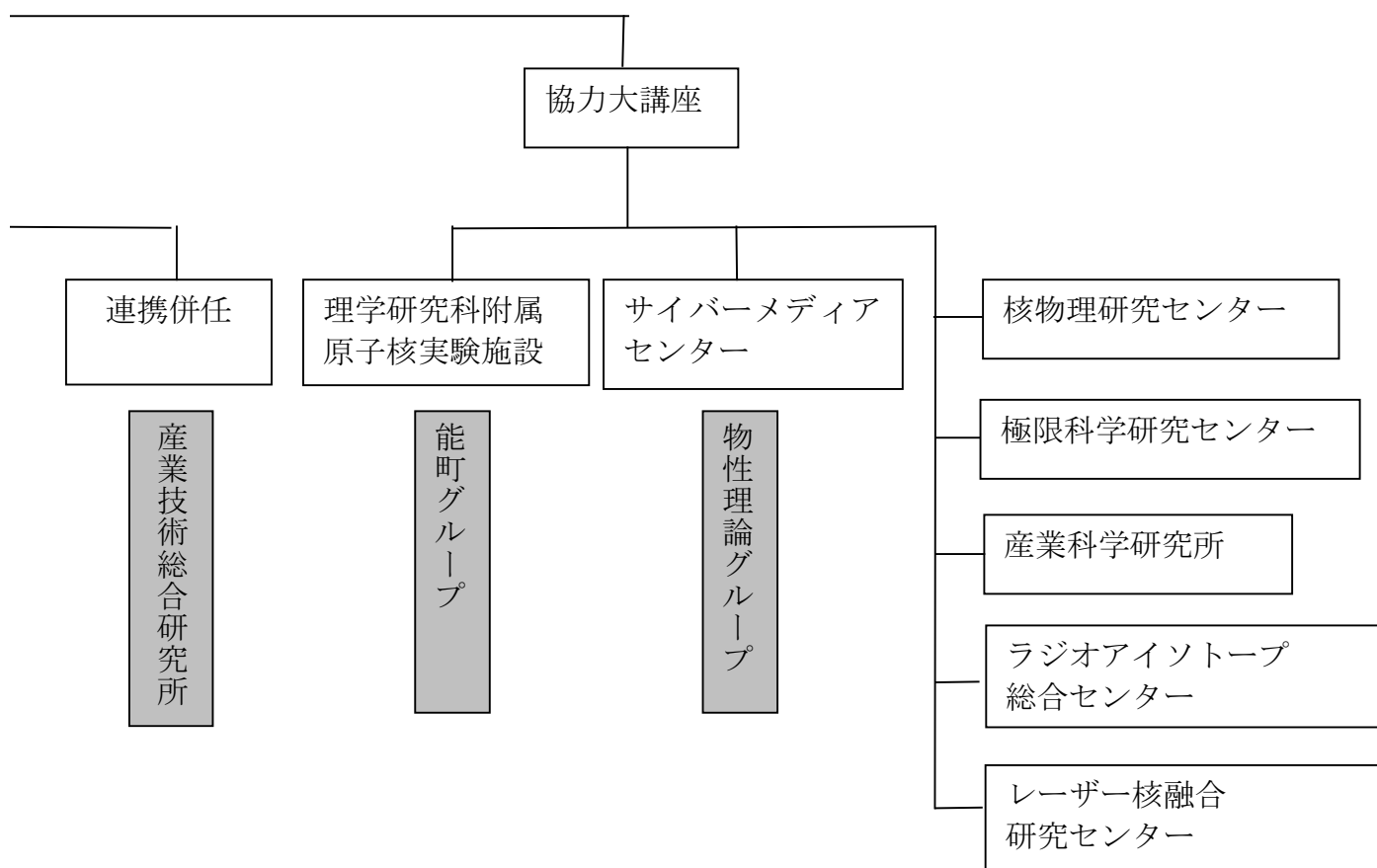
図 9 B^0 と $B^0\text{-bar}$ から $J/\psi K_S$ への崩壊の時間分布

成果の他にも、 Λ 粒子のスピン軌道力の測定 (岸本グループ)、短い寿命の原子核の構造の研究 (下田グループ) など、多くの成果が上げられています。その詳細は各研究グループの紹介欄を是非、参照してください。

研究グループ紹介



物理学専攻は組織として6基幹大講座に加えて学内と研究所、センターおよび施設の教官が兼任する協力講座から構成され、大学院教育を担当している。以下に主に基幹大講座に所属する教官によって構成されている研究グループを紹介する。

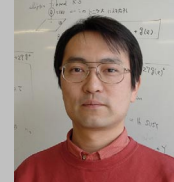
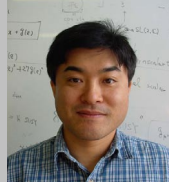
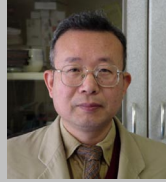


物性物理学講座 大貫グループ

研究領域
研究課題

重い電子系の物理（強相関電子系の磁性と超伝導）
1 希土類・アクチナイド化合物の純良単結晶育成
2 ドハース・ファンアルフェン効果によるフェルミ面の性質の解明
3 圧力誘起超伝導と強磁場磁化

構成メンバー



大貫惇睦（教授） 摂待力生（助教授） 杉山清寛（助教授） 稲田佳彦（助手）

A 研究活動の概要

比較的局在性の強い f 電子と幅広いバンドを形成する伝導電子が RKKY 相互作用や近藤効果を通して低温で織りなす強相関電子系の物理は、磁性と超伝導の宝庫であり、くめども尽きぬ魅力にあふれている。我々のグループは希土類・アクチナイド化合物の純良単結晶を育成して、低温・強磁場・高圧下でその磁性と超伝導を研究している。

1 異方的超伝導

これまでの超伝導は、運動量とスピンの向きが互いに異なる2つの電子対（クーパー対）によって形成され、フェルミ面に一様にギャップが開くとされてきた。この十数年、希土類・アクチナイド化合物や高温超伝導体では従来の対形成（ s 波超伝導）とは異なる新しい型の対形成が提唱され、例えば、高温超伝導体では d 波型である。このような対形成のとき理論的には、超伝導ギャップにはノードが生じる。ノードの存在はいろいろな物理量の温度変化から分かるが、その位置を決定することは難しい。東京大学物性研究所の松田グループとの協同研究によってノードの位置を決定することに成功した。希土類・アクチナイド化合物では初めての実験結果である。

実験はセリウム化合物 CeCoIn_5 という超伝導体でおこなわれた。伝導電子の質量が、通常の電子の静止質量の約 100 倍も重いことをドハース・ファンアルフェン効果から明らかにした（図 1 参照）。そのフェルミ面の形状は図 2 に簡略化して示すようにシリンダー状をしている。このような重い電子系が超伝導を形成していて、超伝導ギャップはシリンダーの軸方向に線状にあることを、磁場中の熱伝導度の実験から明らかにした。

R. Settai et al., J. Phys.: Condens. Matter 13, L627 (2001)
K. Izawa et al., Phys. Rev. Lett., 85, 057002 (2001)

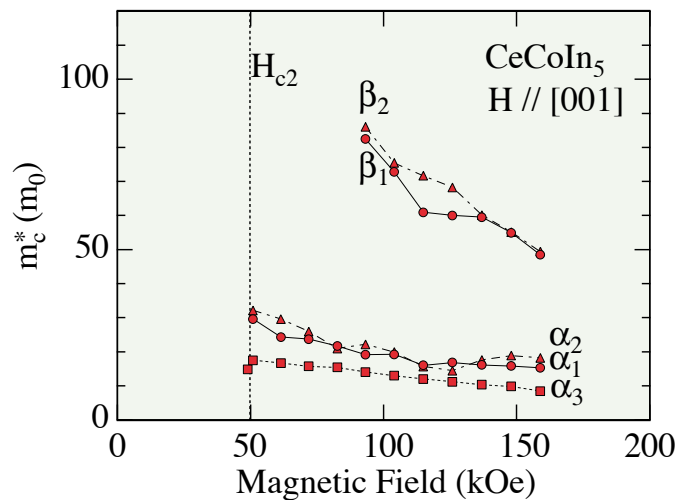


図 1 CeCoIn_5 のドハース・ファンアルフェン振動の温度依存性から決定したサイクロトロン質量の磁場依存性。凹凸を持つ 2 種類のシリンダー状フェルミ面が β_i と α_i である。

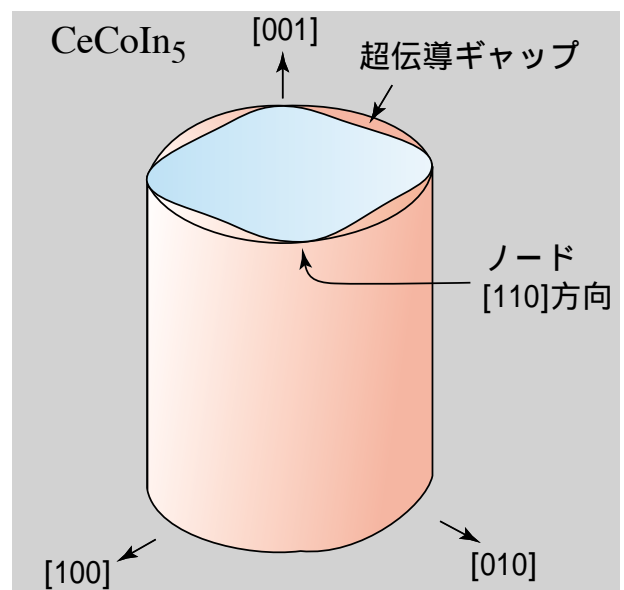


図 2 CeCoIn_5 の超伝導ギャップのノードの位置

2 重い電子系 UPt₃ のフェルミ面

UPt₃ の超伝導は、奇パリティ (p 又は f 波型) であることが、大阪大学大学院基礎工学研究科の北岡グループとの協同研究による核磁気共鳴のナイトシフトから明らかにされた。本研究で育成された単結晶は残留抵抗比が約 700、キャリアの平均自由行程は 2000 Å であり、コヒーレンス長 100 Å より充分大きいことが本質的に重要であった。この良質な単結晶により UPt₃ のフェルミ面の全貌が更に明らかになった。図 3 はフェルミ面の極値断面積に比例するドハース振動数の角度依存性である。太い実験は播磨尚朝氏のバンド計算の結果であり、フェルミ面の形状は 5f 電子を遍歴としたバンド計算にはほぼ一致していることが分かった。ただし、サイクロトロン質量はバンド質量によりはるかに大きく、例えば楕円体フェルミ面の ω ブランチのサイクロトロン質量は 100m₀ ある。

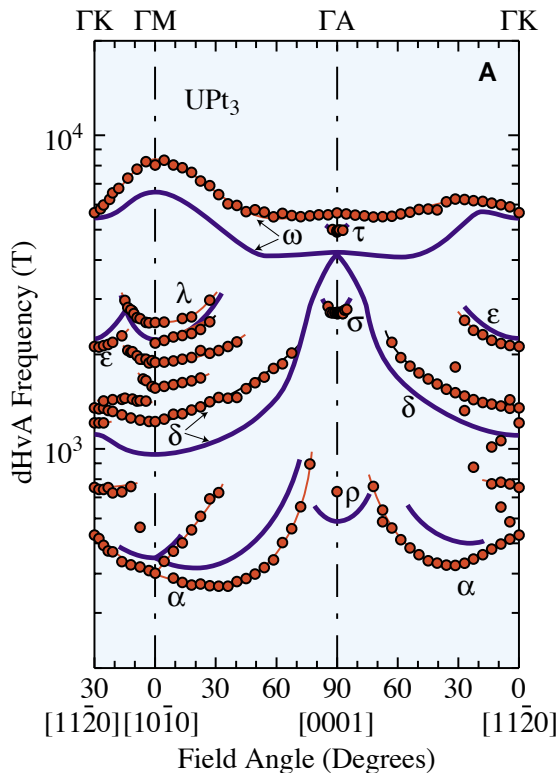


図 3 UPt₃ のドハース振動数の角度依存性、実線は播磨尚朝氏のバンド計算の理論曲線である。

- H. Tou, et al., Phys. Rev. Lett., 77, 1374 (1996)
 H. Tou, et al., Phys. Rev. Lett., 80, 3129 (1998)
 N. Kimura et al., Physica B 281 & 282, 710 (2000)

3 圧力誘起超伝導

強相関電子系の磁気秩序温度 T_{ord} は約 10 K であり、加圧するとある圧力で $T_{\text{ord}} \rightarrow 0$ となる。このときの量子臨界圧力 p_c 付近で超伝導が発現する。現在強磁性体の UGe₂ や図 4 に示す反強磁性体 CeRh₂Si₂ で研究を

進めている。CeRh₂Si₂ では $p_c \simeq 1.05$ GPa であり、この圧力付近で超伝導が発現する。図 4 は 4f 電子が圧力により局在から遍歴へと p_c で変貌することをドハース・ファンアルフェン効果というマイクロな実験手段で示した最初の実験結果である。

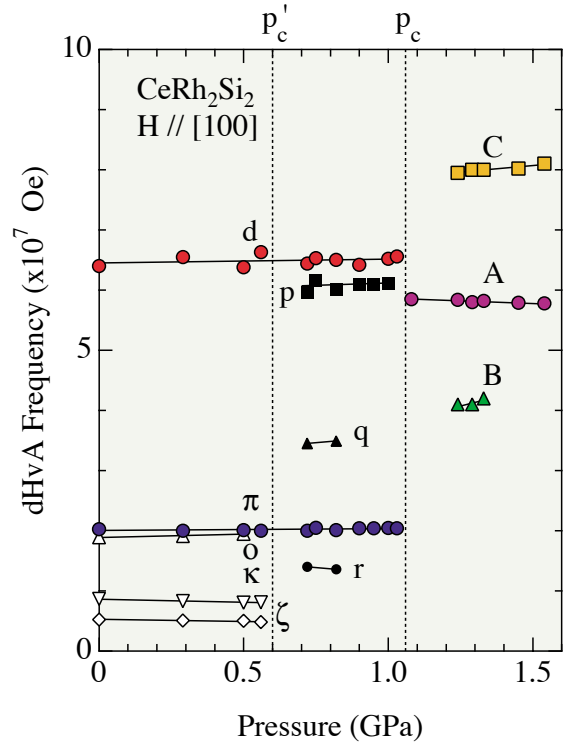


図 4 反強磁性体 CeRh₂Si₂ の圧力によるフェルミ面の変化。 p_c' は磁気構造が変わる圧力、 p_c は量子臨界圧力である。

S. Araki et al., Phys. Rev. B 64, 224417 (2001)

B 研究グループのリソース紹介

1. 受賞

- 大貫惇睦 日本 IBM 科学賞 (日本 IBM 科学賞審査委員会) 「重い電子系の典型物質の合成とその物性的実験的研究」 1989 年
- 大貫惇睦 仁科記念賞 (新潟大学長谷川彰教授とともに) (仁科記念財団) 「遍歴する重い電子系のフェルミ面の性質」 1992 年
- 木村憲彰 第 14 回井上研究奨励賞 (井上科学振興財団) 「UPt₃ の純良単結晶育成及びフェルミ面と超伝導の性質」 1997 年

2. 特色のある実験装置

- 高周波、テトラアークなどの各種単結晶育成炉
- トップローディング型の希釈冷凍機

* 研究グループのホームページアドレス
<http://dhva.phys.sci.osaka-u.ac.jp/OnukiLab/OnukiLab.html>

物性物理学講座 大山グループ

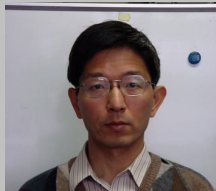
研究領域
研究課題

半導体物理学における非平衡状態と量子輸送特性
1 ミリ波およびサブミリ波磁気分光
2 半導体ナノ構造における量子輸送特性
3. 半導体における不純物および欠陥と電子局在

構成メンバー



大山忠司 (教授)



中田博保 (助教授)



藤井研一 (助教授)



近藤道雄 (連携併任教授
産総研)

A 研究活動の概要

1 ミリ波およびサブミリ波磁気分光

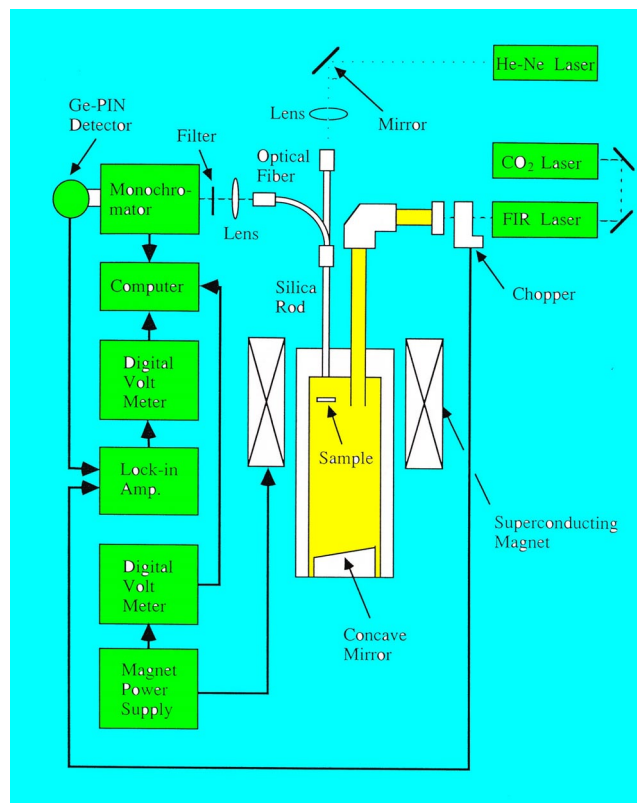
マイクロ波や遠赤外域の光は各種半導体の電子状態や光学特性を探るのに最適の探針である。さらに、外部から強い磁場を印加すると、電子の状態は量子化され、サイクロトロン共鳴吸収やゼーマン共鳴吸収といった、より鮮明な形で電子系の挙動を観測できる。我々の研究グループではこの特長を生かした研究手段によって、他の方法では得難い様々な情報を掴んできた。ここに最近の成果の幾つかについて簡単に紹介する。

(1) 光検知サイクロトロン共鳴法

最近、半導体の分野では様々な可能性を持つ新しい材料の創製が活発である。新しく作製された結晶の特性や品質の評価を非破壊で研究する有力な手段の一つとしてサイクロトロン共鳴法がある。その応用技術として最近我々の研究室で開発を進めてきたユニークな実験法に『光検知サイクロトロン共鳴法』がある。元来サイクロトロン共鳴法は、半導体におけるキャリアの有効質量を正確に決定したり、バンド構造の詳細を解明する有力な方法として導入された。その後、信号の中にキャリアの散乱や捕獲効果に関する情報が含まれていることから、結晶内の不純物や欠陥の挙動までも探ることのできる使い道の広い手段として発展してきた。一方、幾分受動的ではあるが、半導体の特性を探る汎用手段の一つとして重宝がられているものに、光励起された系から吐き出される特徴的な光をモニターするフォトルミネッセンス分光法がある。これら2種類の実験手段を組合せて、これまでとは違った角度から物性を探ろうとするのが光検知サイクロトロン共鳴法 (Optically Detected Cyclotron Resonance—略してODCR) である。初期の頃は Si や Ge などの基本的な材料を中心に、観測される信号に含まれる系のダイナミクスや起源の解析を中心に研究を進めてきたが、最近では対象を各種化合物半導体や混晶半導体にも拡張している。我々の研究グループでは 35 GHz のマイクロ波帯と遠赤外レーザー光を使った2種類のODCR装置を開発し、目的によって使い分けている。最近では ZnSe や CdTe などの II-VI 族化合物半導体における

双晶構造や曖昧であった欠陥構造を明らかにし、また InGaAs の 3 元化合物半導体における組成の偏析の様子などを明らかにすることができた。

ODCRは新しく創製される貴重な試料の物性を無接触、非破壊で探ることのできる有用な研究方法として今後も発展するものと期待される。



■ ODCRの測定装置概略図

T. Tomaru et al., J. Phys. Soc. Jpn. 61, 1798 (1992).
T. Ohyama, Physica B184, 141 (1993).
H. Nakata et al., Recent Research Developments in Applied Physics 3, 63 (2000).
K. Satoh et al., J. Phys. Soc. Jpn., 70, 2185 (2001).

(2) フーリエ変換赤外分光測定

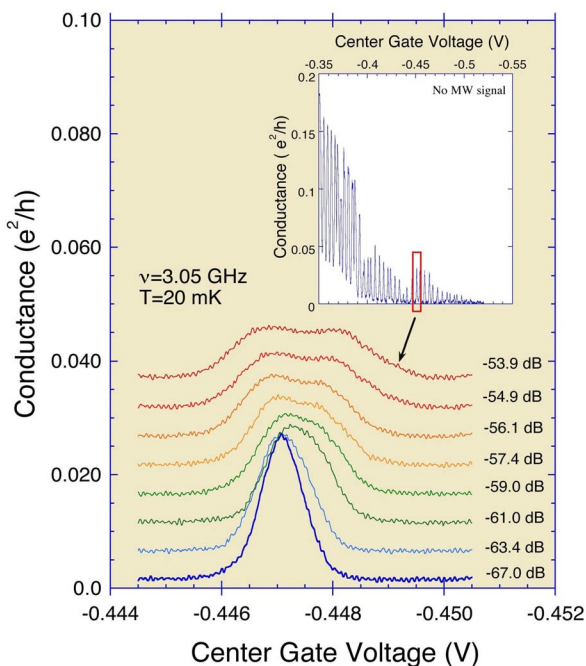
ZnSe は II-VI 族半導体で、そのバンドギャップが青色の領域にあり、青色発光素子材料として注目されてきた。長い間、p 型の試料の作製が課題であったが、最近我々は ZnSe 中に微量に存在する Li アクセプターの赤外吸収を 15T の磁場の下で世界に先駆けて初めて観測し、その結果を基に ZnSe の価電子帯のエネルギー構造と Li 原子のアクセプター状態について考察を行ってきた。その結果、価電子帯の構造を記述する Luttinger パラメータを導出し、Li 原子が格子置換位置からずれていることを見出した。これらの実験結果を国際会議で発表したところ、外国の 2 つのグループから共同研究の申し入れがあり、ベルリン航空宇宙研の Pavlov 博士と共同研究プロジェクトを開始した。強力な炭酸ガスレーザーでキャリアを励起すると、ZnSe 中の Li および Ge 中の Te に対して、非常に強い誘導放出発光が生じることを確認した。

N. Nakata et al., Appl. Phys. Lett. 74, 3480 (1999).

H. Nakata et al., Phys. Rev. B60, 13269 (1999).

2 微小量子ドットのクーロン振動におけるマイクロ波応答

GaAs/AlGaAs 半導体ヘテロ接合試料を微細加工し、試料表面のゲート電圧を制御することによって半径が数百 nm 以下の量子ドットを形成することができる。極低温で単一の量子ドットを介した輸送現象において、ドットのポテンシャルエネルギーに依存した電流が振動的に流れる特異な現象が観測される。これはクーロン閉塞振動(CBO)とよばれており、電流振動のピーク間隔はドットの静電容量に依存して変化し、振動のピー



■クーロン閉塞振動のマイクロ波強度依存性

では、ただ 1 つの電子がドットをトンネルして電流が流れることを反映している。この単電子トンネル (SET) 効果はドット中に 1 電子増加させることによる帯電エネルギーの変化がドット内へのさらなる電子の侵入を妨げることにより生じている。このような単電子トンネル状態に外部から高周波信号を印加すると、高周波の周波数、強度に依存して新しい振動ピークが観測される。我々は、ドットへのマイクロ波印加を試みるために GaAlAs/GaAs ヘテロ接合上に特殊な構造を作製し、コンダクタンスに対するマイクロ波印加の効果を明かにした。

K. Fujii et al., Solid State Electron. 42, 1349 (1998).

K. Fujii et al., Physica B227, 98 (1996)

B これまでの主要な業績とリソースの紹介

これまでに研究グループで開発した特色ある実験装置と解析技術、およびそれによって得られた興味ある結果を紹介する。

◆70GHz 帯のマイクロ波と He-3 の冷却系を組み合わせさせた装置を自作し、1 K 以下の極低温域におけるサイクロトロン共鳴を初めて観測し、不純物散乱におけるスピン偏極の効果を明らかにした。

T. Ohyama et al., J. Phys. Soc. Japan 29, 912 (1970).

◆自作したボックスカー積分器をサイクロトロン共鳴の実験に初めて導入し、時間分解測定を可能にした。それによって、電子と励起子の相互作用や電子-正孔液滴系のダイナミクスを明らかにした。

T. Ohyama et al., Phys. Rev. Lett. 27, 33 (1971).

◆光励起型遠赤外レーザーを自作し、多くの発振波長を生かして物性研究へ初めて適用した
中田博保 他、固体物理 10, 553 (1975)

◆不均一な歪の下において生成される半径 $500 \mu\text{m}$ におよぶ大液滴の磁気超音波吸収を初めて観測し、液滴が縮退フェルミ流体であることの実験的検証を掴んだ。

T. Ohyama et al., Solid State Commun. 19, 1083 (1976).

大山忠司、科学 47 巻 524 (1976).

◆光励起した系における遠赤外不純物ゼーマン吸収の解析から、補償された半導体における補償比を正確に求める解析法を確立した。

大山忠司、応用物理 51 巻、210 (1982).

◆半導体中のイオン化不純物による内部電場を調べるため、不純物の分布とドナー-アクセプター間の再結合を考慮したモンテカルロ法に基づくシミュレーションプログラムを開発した。

K. Fujii et al., Jpn. J. Appl. Phys. 38, 6405 (1999).

◆自己無撞着有限要素法による Schrodinger-Poisson 方程式解法プログラムを開発し、半導体ヘテロ構造や変調ドープ量子井戸構造のポテンシャルをハートリー法により計算するプログラムを作成した。

K. Fujii et al., Proc. 25th Int. Conf. Phys. Semicond., 1301 (Osaka 2000).

■ ホームページ <http://buna.phys.wani.osaka-u.ac.jp/>

物性物理学講座 竹田グループ

研究領域
研究課題

微小物質系の物理学（格子欠陥とナノ構造）
1. 新しい微小構造の創生、およびその生成メカニズムと物性の解明
2. 微小領域における新物性探索を目指した新しい電子顕微鏡法の開発
3. 顕微鏡法による非平衡原子ダイナミクスの解明

構成メンバー



竹田精治（教授）



大野裕（助手）



河野日出夫（助手）



永宗靖（連携併任助教授
産総研）

A 研究活動の概要

微小空間で生じる原子・電子多体系の非平衡現象を実空間観察によって研究している。その結果として、最近では原子系の新現象とそれに伴う新しいナノ構造を見いだした。この成果は、微小領域の原子系には未知の現象が多く潜んでいることを強く予感させる。この研究において私たちの高度な電子顕微鏡法が大きな役割を果たしている。

1 新しい微小構造の創生、生成機構・物性の解明

非平衡過程の一つの典型である結晶成長の原子・電子レベルでのメカニズムは十分に解明されていない。私たちは、新しい形状や内部構造をもった1次元シリコン結晶を成長できることを実証した。シリコンナノワイヤー、シリコンナノチェーンである。これらは、分子線エピタキシー法など一般的な結晶成長法ではなく、金属ナノ触媒を利用して成長させる。

ナノチェーンは半導体シリコンと絶縁体シリカが一列に配列したもので、電子顕微鏡観察によって発見した。これまでに、成長条件および成長のメカニズムの概略を明らかにした。一方、類似の方法で、シリコンナノワイヤーを基板から大量に成長させることにも成功した。興味深いことは、ワイヤー結晶の形態と内部構造は、結晶成長時の固液ナノ界面に

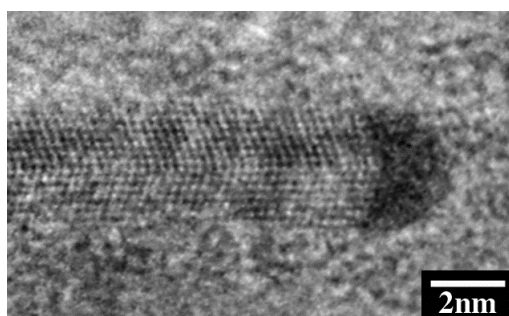


図1 固液ナノ界面の揺らぎによって変化するシリコンナノワイヤーの内部構造

よって決定されている（図1）と考えられることで、今後、金属ナノ触媒による結晶成長のメカニズムをまず解明したい。引き続き、新たな一次元シリコン結晶の物性を系統的に明らかにしたい。

シリコンナノワイヤー、シリコンナノチェーン（特許公開中）は、日刊工業新聞（平13・8・7第一面）、朝日新聞（平13・8・24夕刊）、EETimes（2001・8・27第一面）紙上などで一般にも紹介され、WTEC（World Technology Evaluation Center, NSF/ODR）の現地調査も行われた（2001年11月）。あくまでも基礎研究を重視しながらも、一方で成果を社会へ還元させるために、支援を得て、新一次元シリコン結晶を利用した実用デバイスのプリカーサーを作成し産業界へ手渡したいと考えている。

N. Ozaki et al., Appl Phys. Lett. 73, 3700 (1998)

H. Kohno et al., J. Cryst. Growth 216, 185 (2000)

H. Kohno et al., Solid State Comm. 116 591 (2000)

S. Takeda et al. J. Cryst. Growth 205, 11 (1999)

2. 微小領域における新物性探索を目指した新しい電子顕微鏡法の開発

固体の微小領域を研究する新しい実験装置と手法を開発した。すなわち、電子顕微鏡で観察している固体の微小領域について、同時に、光励起・電子線励起の可視分光測定を可能とする装置である。フォトルミネッセンスおよびラマン光がカソードルミネッセンスに加えて測定可能である。よって、電子顕微鏡法によって原子配列と非占有電子状態密度を測定し、一方で、光測定から点状欠陥の電子準位、欠陥の振動モード解析を行うことが可能となる。

この装置を利用して、結晶内部の空格子点の拡散現象について GaInP 半導体を例として研究した。さらにこの結晶における面状の格子欠陥から、偏光した可視光が放射され、その原因としてこの面状欠陥が量子井戸として機能していることが強く示唆され

た。

Y. Ohno, Phys. Rev. B 59, 2694 (1999)

Y. Ohno et al. Rev. Sci. Instr. 66, 4866 (1995)

3. 顕微鏡による非平衡原子ダイナミクスの解明

電子照射下などの非平衡の固体においては、多数の原子の協同的な運動の帰結として、短寿命のさまざまな非平衡構造が出現する。たいへん古い研究対象だが、最新の顕微鏡法によって新たな現象を見出した。

シリコン結晶は電子照射によって非晶質化しないことが従来の定説であったが、これを実験から覆した。図2が非晶質化の実験条件で、電子エネルギーは1 MeV以上、試料温度は100 K以下とすれば適度の電子線量によって容易に非晶質化が起こる(図2)。

非晶質化の原子レベルでのメカニズムは謎である。最も基本的な素粒子である電子による非晶質化現象を手にして、さらに、エネルギーフィルター電子回折実験とその理論解析を通して、非晶質のエンブリオは僅か4個程度のシリコン原子から構成されているという新しい実験結果を得た。

この他に、シリコン表面にナノメートルサイズのホール(空洞)が電子線照射下で自己形成する新現象も見いだした。数ナノメートル程度の電子照射領域を走査トンネル顕微鏡で観測し、その生成のメカニズムをほぼ解明できたと考えている。

以上の研究の一部は第14回国際電子顕微鏡学会(1998年メキシコ)などで招待講演した。また、日本経済新聞(平13・7・27)、日刊工業新聞(平13・9・18)などで一般にも紹介された。

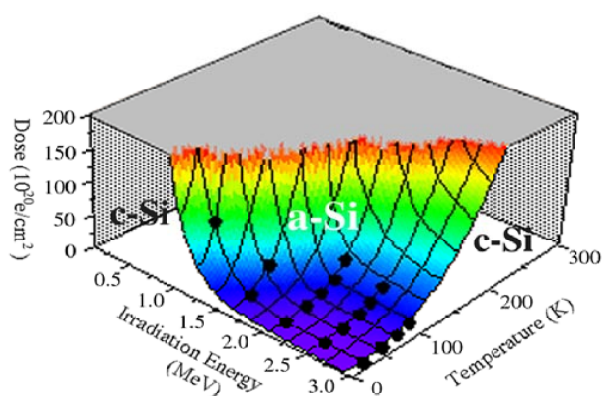


図2 電子線照射によるシリコン結晶の非晶質化条

S. Takeda et al. Phys. Rev. Lett. 83, 320(1999)

J. Yamasaki et al. Phys. Rev. B (2002) 印刷中

N. Ozaki et al. Surf. Sci. 493, 547 (2001).

S. Takeda et al., Phys Rev Lett, 83, 320(1997)

以上は過去数年間に於いて私たちの研究グループのメンバーおよび大学院生が主体(筆頭著者)となって進めた研究内容をまとめた。微小物質系の原子配列の解析から始めて、原子拡散などの動的挙動や電子構造、を解明していくオーソドックスな基礎研究を推進して未来の物質科学の礎にしたいと考えている。

研究グループとして獲得した研究費の主なものは、科学研究費基盤研究(A)(2)「シリコン表面ナノホールの形成メカニズム」(平成10-12年)、科学研究費特定領域研究(A)(2)公募研究「透過電子顕微鏡内その場可視分光法による相変態の研究」(平成9-11年)である。

また、当該分野の成果発表を支援するために、Journal of Electron Microscopy (Oxford Univ. Press)の Executive Editor: 竹田)などを務めている。

B 研究グループのリソース紹介

1. 受賞

○竹田精治 第42回瀬藤賞(日本電子顕微鏡学会賞) 応用研究部門「半導体における格子欠陥の電子顕微鏡法による研究」1997年

2. 特色のある実験装置

○シリコンナノ結晶成長装置(自作)

○電子・光複合プローブ透過電子顕微鏡(電頭・光測定インターフェイス部自作)

3. 過去の研究成果

「電子顕微鏡法による格子欠陥の構造決定」(図3)

存在は知られていたが、その実体が不明であったシリコン結晶の有名な格子欠陥、{113}面欠陥の原子配列を透過電子顕微鏡法により他に先駆けて決定した。

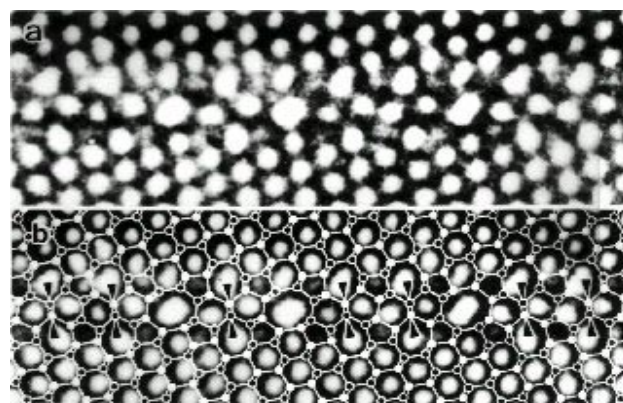


図3 シリコン結晶の{113}面欠陥の構造解

S. Takeda, Jpn. J. Appl. Phys. 30 L639 (1991)

S. Takeda et al., Philos. Mag. A 70, 287 (1994)

*研究グループのホームページアドレス

<http://tem.phys.wani.osaka-u.ac.jp>

素粒子・核物理学講座 岸本グループ

研究領域 素粒子核分光学
構成メンバー



岸本忠史 (教授)



阪口篤志 (助教授)



味村周平 (助手)



小川泉 (助手)

A 研究活動の概要

我々の研究グループでは粒子（素粒子や原子核）を1個ずつ計測する素粒子・核分光法を実験手法の基礎として、原子核物理学、素粒子物理学、宇宙物理学にまたがる、特に対称性と基本的及び現象論的な関連する問題に挑戦している。実験手法として加速器を用いない研究として(1)宇宙のダークマターの探索と(2)二重ベータ崩壊によるニュートリノの性質の研究、加速器を用いる研究として(3)ハイパー核(超原子核)と一般化された核力(4)弱い力によるストレンジネス(奇妙さ)の生成(5)中性子星とK中間子凝縮、といった研究に取り組んでいる。

1 ダークマターの探索

宇宙の質量のほとんどはダークマター（暗黒物質）で占められていることが宇宙の多くの観測事実と物理的な考察から示されている。ダークマターの候補としては超対称性対粒子と呼ばれる素粒子が有力である。超対称性理論とは自然界の力を統一していく時、物質がフェルミオン、力がボソンという我々の世界での役割と逆転する粒子が存在するという理論である。もしこの粒子が宇宙のダークマターであるならば宇宙論、素粒子物理、原子核物理にまたがる問題が一挙に解決することになる。

ダークマターは我々の銀河の中を漂っており、非常に稀に通常の物質（原子核）と散乱する。我々のグループでは蛍石（ CaF_2 ）シンチレーター中のフッ素原子核(^{19}F)との散乱を利用してダークマターの探索を行なっている。我々が開発したエレガント VI と呼ばれている検出器の中心部を図1に示す。 CaF_2 (45mm 立方) 結晶の周りを CsI(Tl) 検出器の動的シールド (Active shield) が囲んでいる。検出器全体は気密箱に入れられ、窒素ガスで大気中のラドンガスを置換している。気密箱の周りにはパラフィンで固めた水素化リチウム層(1.5cm)の中性子の吸収体があり、外側を銅(5cm)と鉛(10cm)のγ線シールドが囲っている。全体は周りの遮蔽まで入れると2m(縦) × 2m(横) × 3m(高さ) といった大きさになる。

現在検出器系は奈良県大塔村の地下実験室（核物理

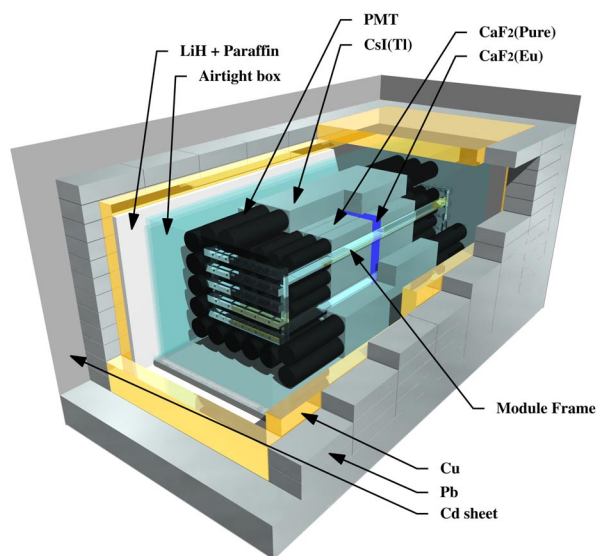


図1 エレガント VI

研究センター大塔コスモ観測所) に設置されており観測を進めている。地中深く潜ることで膨大な量の宇宙線起源のバックグラウンドを避けることができる。

2 二重ベータ崩壊の研究

最近ニュートリノに質量がある事が振動実験によって明らかになってきている。ニュートリノは粒子と反粒子が質量（マヨラナ質量）で結びつけられている可能性が高いと考えられている。この質量を調べる現在唯一と言ってよい方法が二重ベータ崩壊の研究である。これはニュートリノが反ニュートリノに転換することで引き起こされるので粒子数の保存則の破れに対応する。粒子数の保存則が破れているなら CP の非保存と関連して宇宙が何らかの理由で粒子だけの世界になったことが物理法則で説明できる可能性が高い。

最近の振動実験によって明確な目標が示されたことがこの研究を取り巻く環境を大きく変えている。現在 ELEGANT VI は ^{48}Ca の二重ベータ崩壊に関し World Best の結果を与えつつある。現在、内外を含めて十

指に余る次世代大型研究が提案されている。我々も次期計画を CANDLE と命名して準備研究を行っている。

3 Λハイパー核のスピンの軌道力

原子核の特に安定な陽子数(Z)または中性子数(N)は、魔法数と呼ばれている。これは核力の短い到達距離と大きなスピン軌道力によっている。スピン軌道力の大きさは中間子交換力だけでは説明し切れないことが知られていた。これは核子がクォークからなる複合粒子であることが関係していると考えられる。

さて我々は $^{13}_{\Lambda}\text{C}$ でスピン軌道力を直接決定する実験を行った。図2に示す様に $^{13}_{\Lambda}\text{C}$ には ^{12}C (0^+) 芯に $p_{3/2}(\Lambda)$ と $p_{1/2}(\Lambda)$ がついた状態が存在する。このエネルギー差がスピン軌道力によって決まっている。運良くこの状態は γ 線を放出して基底状態に崩壊するので、我々は大型の NaI 結晶を用いてこの 11 MeV の γ 線を 0.3 MeV 程度の分解能で測定し、今までの精度大きく超えてスピン軌道力を決定した。実験は世界で最強の K 中間子ビームを供給出来る米国 BNL (ニューヨーク州) の AGS 加速器で行った。

$^{13}_{\Lambda}\text{C}$ は (K; π) 反応で生成し、 π 中間子と γ 線を同時計測した。 Λ 粒子のスピン軌道力は ~ 0.15 MeV と決まり、原子核の数十分の 1 程度と極端に小さなものであった。 Λ 粒子のスピン (自転) を担うストレンジクォークは、核力 (π 中間子交換力) に寄与しないことが判明した。

4 弱い相互作用

自然界の力の中で弱い力だけが粒子の種類を変えることができ、今まで崩壊を通して研究されてきた。我々は弱い力でストレンジクォークを生成する $pn \rightarrow \Lambda p$ 反応の測定の実験を進めている。特に弱い力にはパリティの破れがあることが知られており、図3にこの実験との関係が示されている。

大阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロンから得られる 400 MeV の陽子ビームを用いるとこの反応が引き起こせる。実験的には Λ 粒子をその崩壊からの π と陽子を捕まえることで同定する。しかし予想される断面積は $\sim 10^{-39}$ cm^2 と小さいため (例えば強い力による π 中間子生成の断面積は 10^{-27} cm^2)、膨大なバックグラウンドから信号を取り出すための検出器を建設している。この測定は実験技術への挑戦とも言える研究で、世界で初めての試みである。

5 中性子星の中での K 中間子凝縮

観測された中性子星の質量はかなり一定している。これはある程度重いとブラックホールになるためと考えられている。中性子が詰まった後でもストレンジネスをもつ粒子、特に K 中間子はボソンなので凝縮という形で原理的にいくらでも詰めることが出来る。そう

であれば重い中性子星はすぐブラックホールになってしまい存在しないという現実を説明出来る。このためには K 中間子と核に強い引力が働いていることが条件である。どういう力が働いているかは K 中間子核を研究することで明らかに出来る。現在具体的な実験の準備を進めている。

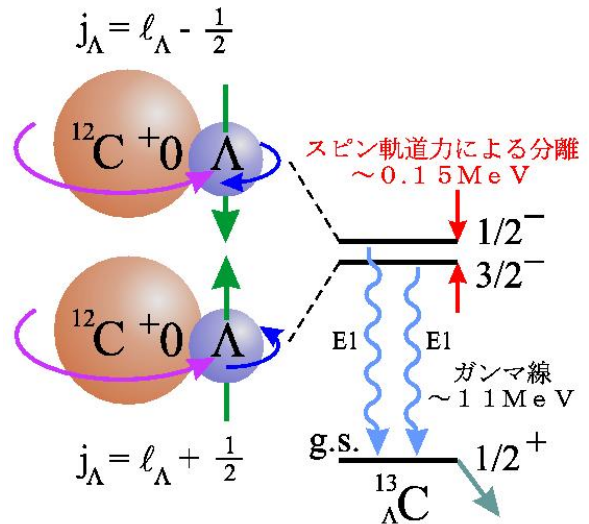


図2 ハイパー核のスピン軌道力

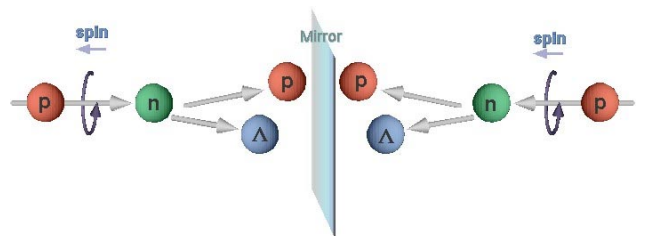


図3 $pn \rightarrow \Lambda p$ 反応の概念図。この反応ではパリティの破れによって左側が起り易いと考えられている。

参考文献

- 1, I. Ogawa, et al., *Nucl. Phys. A* 663-664, 2000, 869
K. Fushimi, et al., *Astropart. Phys.* 12, 185-192, 1999
- 2, H. Ejiri, et al., *Phys. Rev. C* 63, 065501, 2001
- 3, S. Ajimura, et al., *Phys. Rev. Lett.* 86 (2001) 4255
- 4, T. Kishimoto, *Nucl. Phys. A* 629 (1998) 369
- 5, T. Kishimoto, *Phys. Rev. Lett.*, 83 (1999) 4701

*研究グループのホームページアドレス
<http://wwwkm.phys.sci.osaka-u.ac.jp>

素粒子原子核実験講座 久野グループ

研究領域
研究課題

レプトン物理

- 1 レプトン・フレーバー非保存現象の探索
- 2 位相空間回転を用いた大強度ミュオン源とニュートリノファクトリーの開発
- 3 スーパーカミオカンデなどでのニュートリノ振動実験
- 4 荷電 K 中間子を用いた標準理論の検証

構成メンバー



久野良孝 (教授)



青木正治 (助教授)

A 研究活動の概要

久野グループでは、ミュオンやニュートリノなどのレプトンの性質を包括的に捉えることにより、標準理論を超える「より基本的な物理法則」への足掛かりを探る研究をしている。

1 レプトン・フレーバー非保存現象の探索

素粒子物理学の標準理論では、レプトン・フレーバーは反応前後で保存される。しかし、いろいろな標準理論の拡張モデルでは、レプトン・フレーバーは一般的に保存するとは限らない。超対称性理論などによれば $\mu \rightarrow e\gamma$ や $\mu-e$ 転換過程の分岐比の予想値は実験上限値よりも1-2桁小さいのみである。これらの現象を発見することにより、標準理論を超える新しい物理法則を発見する突破口を得ようとしている。

まず、久野グループでは米国 BNL 研究所で予定されている MECO 実験グループの一員として、レプトン・フレーバー非保存過程の探索を計画している。

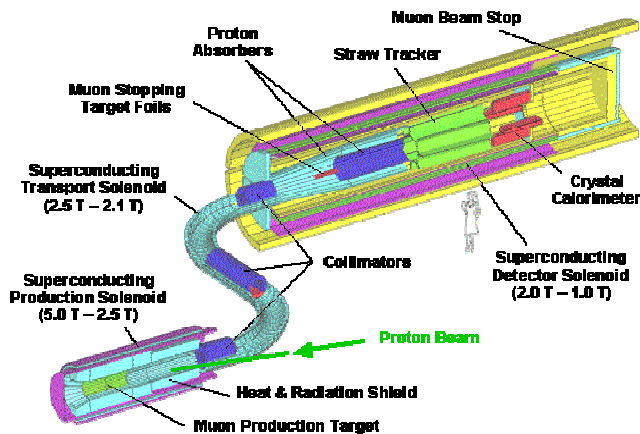


図1 米国BNLでのMECO実験の装置断面

MECO 実験では、 $\mu-e$ 転換過程の崩壊分岐比を 10^{-16} 以下の精度で決定することを目標としている。これは現在の実験上限値の4桁以上の改善である。これを達成するために、大強度ミュオン生成と測定器の革新的な技術開発が必要となる。前者としては超伝導ソレノイド電磁石を用いた大強度ミュオン源が必要となり、後述する PRISM 計画の開発と共通し、積極的に貢献している。後者としてはストローチューブを用いた低物質量の飛跡検出器の開発等が急務であり、久野グループでは継ぎ目のないストローチューブを使った新しいガス・チェンバーの開発を行っている。

その他に、 $\mu^- \mu^+$ 転換過程探索実験の可能性を検討している。これは、ミュオン・フレーバーが2単位変化し、ニュートリノ放出伴わない2重 β 崩壊のミュオン版といえる。これまで技術的な困難のために直接測定しようとする試みは無かった。現在その提案を現実のものとするべく準備中である。

Y. Kuno *et al.*, Rev. Mod. Phys. 73, 151 (2001)

2 位相空間回転を用いた大強度ミュオン源とニュートリノ・ファクトリーの開発

ミュオンを用いたレプトン・フレーバー非保存過程探索の研究を更に発展させるためには、より大強度で高品質なミュオン源が必要となる。超伝導ソレノイド電磁石を用いた大立体角パイオン捕獲と加速空洞による位相空間回転を組み合わせることにより、大強度で狭いエネルギー分布を同時に実現する技術 (PRISM; Phase Rotated Intense Slow Muons) を提案している。2007年に茨城県東海村に完成予定の大強度陽子加速器計画に設置する予定である。現在、システム全体の設計および必要な要素技術の開発を行っている。この大強度・高輝度ミュオン源を使って、レプトン・フレーバー非保存過程探索だけでなく、幅広い学際的な応用が見込める。

PRISM からの大強度・高輝度ミュオンビームを FFAG 加速器でさらに加速することにより、ミュオ

ン崩壊からの大強度ニュートリノ・ビームを作ることが可能である（ニュートリノ・ファクトリー）。これはすでに日米欧で開発研究が始まっている。PRISM を完成させることが出来れば、日本は欧米に先んじてニュートリノ・ファクトリーの実現に一歩近付くこととなる。ニュートリノ・ファクトリーでは、CP 非保存探索などが可能となる。

これに関連して、久野グループはミュオン・イオン化冷却の国際実験（MICE）にも参加している。

Y. Kuno, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sec. A 451, 233 (2000)

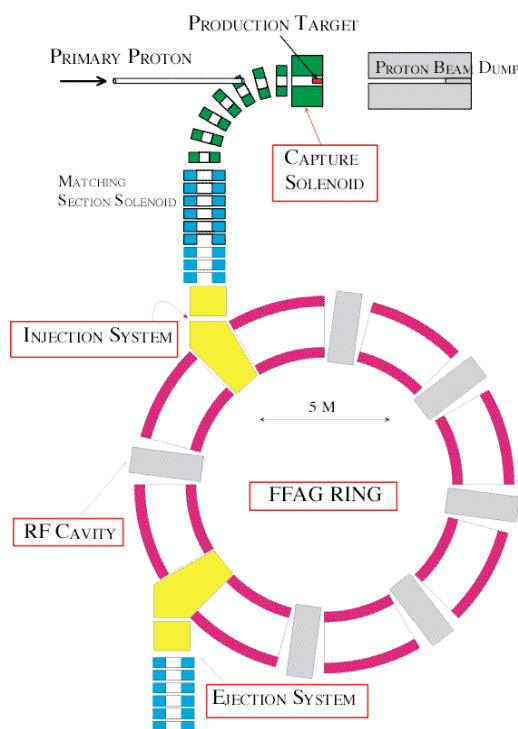


図2 PRISM のレイアウト

3. スーパー・カミオカンデなどでのニュートリノ振動実験

岐阜県神岡町にある 5 万トンの水容器からできているスーパー・カミオカンデでは、太陽ニュートリノと大気ニュートリノの観測を続けてきた。この結果により、これらのニュートリノには有限の質量があり、また他種のニュートリノと大きな確率で混合しているという大発見をした。残念なことに平成 13 年 11 月の事故により、光電子増倍管が大量破損した。半数の光電子増倍管数を復旧するのに 1 年、完全に復旧するのは 6 年が必要であると言われている。

久野グループでは、特にこれまで、大気ニュートリノから生じた上向きミュオンを研究して、比較的高いエネルギー領域についてその振舞を調べている。これにより質量や混合確率について新たな知見が得られることが期待されている。

S. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. 86, 5656 (2001)

4. 荷電 K 中間子を用いた標準理論の検証

荷電 K 中間子の稀崩壊の一つである $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ は、その分岐比を測定することにより、小林・益川理論を検証することができる。標準理論では、この崩壊モードの予想分岐比はおよそ 10^{-10} であり、その観測の為には非常に高い精度でバックグラウンドを制御することが必要となる。久野グループは、米国 BNL 研究所で行われた E787 実験に参加し、世界で初めてこの崩壊モードを観測することに成功した。現在までに確認されている事象は全部で 2 個である。

さらに、荷電 K 中間子の $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊において、崩壊平面に垂直なミュオンのスピン偏極成分を測定し、時間反転不変性の検証ができる。高エネルギー加速器研究機構の 12 GeV 陽子シンクロトロンを用いた実験では、1 2 回の回転対称性を持つトロイダル電磁石を活用することにより、系統誤差を高い精度で制御した実験を行うことに成功した。現在、この崩壊では世界最良の実験結果を達成している。

S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. 79, 2204 (1997)

M. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. 83, 4253 (1999)

過去 3 年間に獲得した研究費の主なものは、まず科学研究費として (a) 科学研究費基盤研究 (A) (2) 「位相空間回転による二次粒子ビームの高輝度高品質化の研究」(平成 10-12 年)、(b) 科学研究費基盤研究 (A) (国際学術) 「位相空間回転イオン化冷却による高強度高輝度二次粒子ビームの国際的研究」(平成 11-12 年)、(c) 科学研究費基盤研究 (A) (2) 「大強度ミュオン源によるミュオン・レプトン・フレーバー非保存探索の新展開」(平成 13-14 年) である。日米科学協力事業として (d) 「位相空間回転とミュオン冷却を用いた大強度ミュオン源の開発」(平成 12 年-14 年) がある。

B 研究グループのリソース紹介

1. 受賞

○青木正治 原子核談話会新人賞 1994 年

2. 関連する実験施設

- 高エネルギー加速器研究機構
- 米国 Brookhaven 国立研究所 (BNL 研究所)

3. 過去の研究成果

- 「 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の発見」
- 「 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊での時間反転不変性の破れ」
- 「 ^{12}C のミュオン捕獲で生じた ^{13}B の偏極測定」
- 「 $K_{\mu 2}$ 崩壊における右巻きカレントの探索」

 *研究グループのホームページアドレス
<http://www-kuno.phys.osaka-u.ac.jp>

素粒子・核物理学講座 下田グループ

研究領域 原子核物理学、重イオン核反応、不安定核の構造
研究課題 1. 安定領域から遠く離れた不安定原子核の構造解明
2. 汎用性の高い核スピン偏極法の開発
3. 超流動ヘリウム中の不純物の振る舞い

構成メンバー



下田 正 (教授)



出水秀明 (助手)



清水 俊 (助手)

A 研究活動の概要

高エネルギー大強度ビーム加速器の発達に伴い、陽子の数 (Z) と中性子の数 (N) の比 (Z/N) が安定な原子核に比べて極端に異なった不安定な原子核を人工的に合成出来るようになってきた。それらは、比較的安定な原子核とは大変異なった構造を持っているらしいことが最近明らかになりつつある。このような原子核の構造が理解できるかどうかは、核力場におけるフェルミオン有限多体系を扱う方法が有効かどうかを検証することにつながり、大変挑戦的課題と位置づけられている。また、これらの不安定核は高温・高密度の星の内部で爆発的に起こる核融合反応において重要な役割を果たしていると考えられており、宇宙での元素合成の筋道を明らかにするためにも、その核構造の解明が強く求められている。

私たちは、新世代の不安定核ビーム供給施設で得られるようになった大強度不安定核ビームを用い、その核スピンの向きを揃える (偏極させる) ことによって、不安定核の構造を調べたり、不安定核の放出する放射線を手がかりに液体ヘリウムの物性を調べるといった新しい実験的研究を展開している。

1 不安定核における魔法数消失のメカニズムの解明

安定領域から遠く離れた原子核では、原子核の安定性と構造に大きな役割を果たしている「魔法数」が変化しているのではないかとされている。私たちは魔法数が消えてしまうメカニズムを解明するために、不安定核の励起準位を系統的に調べる実験を行っている。それには、不安定核をスピン偏極させ、その β 崩壊の非対称度 (β 線を放出する方向のかたより) と β 崩壊に引き続いて起こる中性子崩壊を同時に観測することによって、娘核の励起状態の量子数を決定するという、私たち独自の実験手法を用いる。現在、 $N=8$ という魔法数に取り組んでいる。 Li 核のアイソトープ中で最も中性子が多い ^{11}Li 核に上記の方法を適用し、 ^{11}Be 核の励起状態の準位エネルギー、スピン、パリティ、崩壊巾などを決定する。これらの観測量から、核子が核内で感じる核力が、

このように極端に中性子が多い核ではどのようになっているかを明らかにし、 $N=8$ 魔法数が何故消失するのかを解明する。実験はカナダ国立素粒子原子核研究所 TRIUMF (バンクーバー) に 2000 年に完成した不安定核ビーム施設 ISAC で行っている。2001 年 12 月現在、私たち専用のビームラインが完成し、図 1 の実験装置を持ち込んだ予備的なテスト実験を終了した。本測定は 2002 年度内に完了予定。これに引き続き $N=20$ 、 $N=50$ という魔法数の消失の問題に挑戦してゆく。

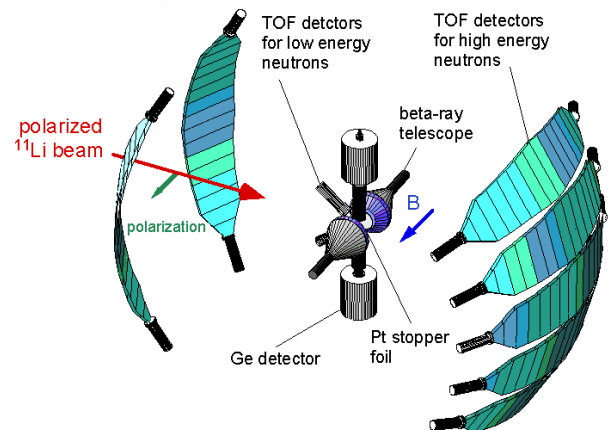


図 1 不安定核構造研究のための実験装置。横向きにスピン偏極した ^{11}Li ビームが図の左手より入射し、中央の Pt フォイル中で停止する。 ^{11}Li の β 遅発中性子崩壊に伴う β 線、中性子線、 γ 線をそれぞれの検出器で同時に測定する。中性子のエネルギーは飛行時間法 (TOF) により求められる。

T. Shimoda et al., TRIUMF Research Proposal E903(2000)
H. Miyatake et al., Submitted to Phys. Rev. C (2001)

2. 新しいスピン偏極法の開発

不安定核のスピンを偏極させることが出来れば、前項で述べた実験以外にも様々な応用が期待される。私たちは強力な偏極生成法の開発を行ってきた。レーザーを用いた直接光ポンピング法、偏極電子移行法、傾斜薄膜法の 3 つである。最初の方法はアルカリ原子核に限られるが、後者 2 つは原子核の種類に

依存しない汎用性の高い方法である。前項で述べた実験の ${}^{11}\text{Li}$ 核に対しては、1 番目の直接光ポンピング法を適用した。従来と異なり、原子の基底状態における超微細構造相互作用分だけ波長の異なるレーザー光を2つを同時に用い、 ${}^{11}\text{Li}$ ビームのエネルギー幅とレーザー光の波長幅が合うよう光変調器 (EOM) を2-3段重ねで用いることによって、約70% に核偏極したビームを得ることに成功した。この方法では世界最高記録である。2 番目の偏極電子移行法は、まずアルカリ原子 (Rb) を光ポンピング法により高偏極させておき、不安定核ビームと Rb を衝突させることにより、偏極電子を不安定核イオンに移行させ、超微細構造相互作用により核偏極を生成しようというものである。この方法は原理的に広範な核種に適用可能であるが、これまで重イオンビームに適用した例はない。そこで、テスト実験装置を大阪大学において建設し、この方法の有効性を実証する実験を行った。その結果、安定核 ${}^{13}\text{C}$, ${}^{14}\text{N}$, ${}^{15}\text{N}$ について、入射ビームの60% 程度が偏極測定装置に到達し、5% 程度の核偏極度を持つことが確認された。テスト装置の主要部分を TRIUMF に移設し、前項で述べた実験をアルカリ以外の核に対して適用する計画である。3 番目の傾斜薄膜法も汎用性の高い偏極法である。20 keV というかつてない程の低エネルギーにおいても5% 程度の核偏極を生成出来ることを初めて示すことが出来た。

S. Shimizu et al., Rev. Sci. Instr. **71**, 2045 (2000).

Y. Hirayama et al., Proc. Int. Workshop on Polarized Sources and Targets, Nashville, Sept. (2001).

T. Shimoda et al., in press in Nuclear Physics A (2001).

3. 超流動ヘリウム中の不純物

超流動ヘリウム中に不純物イオンが導入されると、イオンは数十個のヘリウム原子からなるマイクロクラスター snowball に閉じこめられるであろうという話は40年前から議論されてきた。この snowball の動きを放射線を用いて観測すれば、超流動ヘリウムと snowball との相互作用などのミクロスコピックな研究が可能になる。snowball は不安定核のスピンの偏極を保持するためのイオントラップとしても応用出来るであろう。このような動機でこの研究が

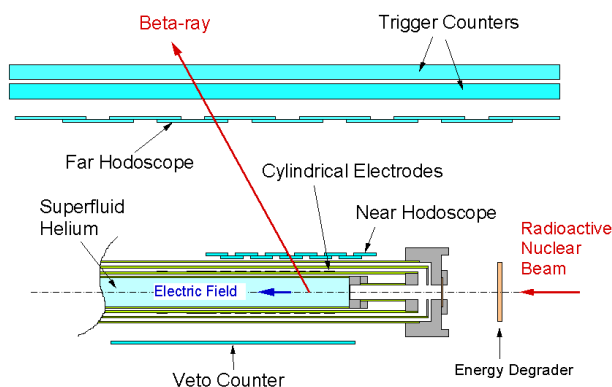


図2 超流動ヘリウム中の不純物の動きを観測するための実験装置

始まった。図2に実験装置を示す。高エネルギー不安定核ビームが右手より超流動ヘリウムに打ち込まれ、不安定核イオンを中心として形成される snowball (電荷を持つ) は電場によって左手に輸送される。snowball 一つ一つの位置は、不安定核が崩壊して放出する β 線の軌跡を追うことで測定できる。図3に示すのは、放射性核 ${}^{12}\text{B}$ が β 線を放出した位置 (横軸) と時間 (縦軸) の相関をプロットしたものである。10 mm 付近の縦縞状に見えるイベントが中性化したもの (電場によって動かない) からの β 線を、斜めの縞のイベントが電場によって輸送される snowball からの β 線を示す。縞の傾きが速度に対応する。時刻30ミリ秒で電場を切っているため、その後 snowball は60 mm の位置で静止している。こうして、打ち込まれたイオンのうち30-40% のものが snowball を形成し、残りは中性化して snowball にならないということを初めて突き止めた。また snowball 中では ${}^{12}\text{B}$ 核のスピンの偏極は確かに保持されているようである。

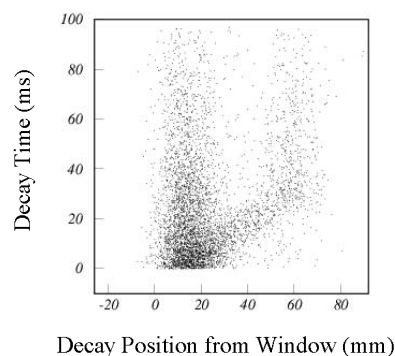


図3 β 線を放出した時点での ${}^{12}\text{B}$ の位置と時間 (ビームを止めた瞬間から) の相関。

N. Takahashi, et al., Z. Phys. B98, 347 (1995).

T. Shimoda, et al., Nucl. Phys. A588, 235c (1995).

N. Takahashi and T. Shimoda, "Physics of Snowballs --- Impurity Ions in Superfluid Helium", Nucleon-Hadron Many-Body Systems, Ed. by H. Ejiri and H. Toki, (Oxford University Press, 1998), pp.190-209.

N. Takahashi, et al., Physica B, 284-288, 91 (2000).

以上は過去数年間にわたって私たちの研究グループのメンバーおよび大学院生が主体 (筆頭著者) となって進めた研究内容をまとめた。

B 研究グループのリソース紹介

1. 特色のある実験装置

- 不安定核ビーム生成ビームライン (大阪大学核物理研究センターに当グループの設計に基づき建設)
- 永久磁石を用いた超小型 ECR (Electron Cyclotron Resonance) イオン源 (自作)
- 高精度原子偏極分光装置 (自作)
- 高分解能大立体角中性子検出器 (自作)

*研究グループのホームページアドレス
<http://adam.phys.wani.osaka-u.ac.jp>

素粒子・核物理学講座 南園グループ

研究領域
研究課題

- 原子核物理学、短寿命同位元素ビーム科学、核物性物理学
1. 核モーメントによる陽子・中性子ドリップライン近傍核の核構造
 2. 基礎相互作用の対称性および核内メソン、クォーク効果の研究
 3. β -NMR による超微細相互作用、核物性研究
 4. 核スピン偏極した短寿命重核の生成法とスピン制御法の開発
 5. 不安定核のポストアクセラレーション

構成メンバー



南園忠則 (教授)



松多健策 (助教授)



福田光順 (助教授)



三原基嗣 (助手)

A 研究活動の概要

1. 陽子及び中性子ドリップライン近傍核の核構造

陽子及び中性子ドリップラインに位置するエキゾチックな原子核を含む不安定原子核の殻構造、核物質密度分布を研究している。不安定核の磁気モーメントや電気四重極モーメントを β 線を指標とするNMR (β -NMR) によって測定し、核構造を探ると共に、中間エネルギー重イオン反応の相互作用断面積から核子密度分布を解明する。最近、陽子過剰の ${}^8\text{B}$ の四重極モーメントから陽子ハロー構造を発見し、反応断面積から密度分布も決定した。低核子密度位置での核子の挙動には安定核には見られない現象が観測されるが、核モーメントの測定から中性子の有効電荷に変化が見られる事を発見した。

- T. Minamisono, et al., Phys. Rev. Lett. **69**, 2058 (1992)
 K. Matsuta et al., Phys. Lett. B **459**, 81 (1999)
 M. Fukuda et al., Nucl. Phys. A **656**, 209 (1999)
 K. Matsuta et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 3735 (2001)

2. 弱核子流の構造、核内メソン、クォーク効果

弱核子流の誘導テンソル項はG-パリティを破る。我々はベータ線角度相関の超精密測定を通じてこのG-パリティ対称性を検証している。また、精密角相関よりメソン・クォーク効果やバリオンスケールリングを定量している。(図1に $A=12$ 鏡映核の整列相関項を示す。)

- T. Minamisono, et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 4132 (1998)
 T. Minamisono et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 1644 (1999)
 K. Minamisono, et al., Phys. Rev. C **65**, 15501 (2002)

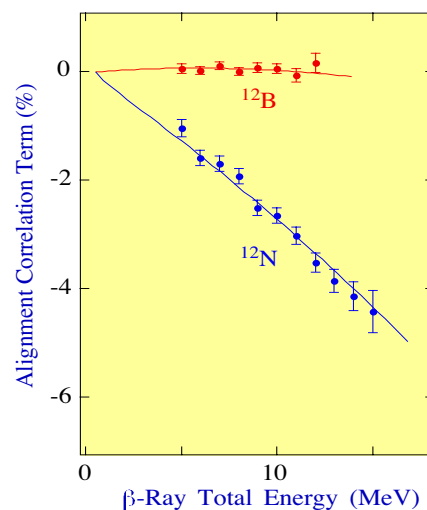


図1 ベータ線角分布の核スピン整列相関項

3. 結晶内の超稀薄不純物の電子構造解明

強磁性体、イオン結晶、金属、半導体中の格子点及び格子間隙超稀薄不純物の電子構造を研究している。 β -NMR の手法により結晶内部磁場、電場勾配、臨界現象、スピン格子緩和時間などを観測し、これらを指標に、電子バンド構造の実験的及び理論的研究を進めている。最近、Si 中の ${}^{12}\text{B}$ が格子点付近にSi 原子とのダンベル構造を作り、ms の時間スケールでケージ運動や解離現象を起こす事を見出した。

- T. Minamisono et al., Z. Naturforsch. **53a**, 293 (1998)
 K. Sato, H. Akai et al., Hyperfine Inter. **120/121**, 145 (1999)
 K. Matsuta et al., Hyperfine Inter. **120/121**, 719 (1999)
 T. Izumikawa et al., Proc. of 10th Int. Conf. on

Hyperfine Inter., Leuven, Belgium, Aug. 28 - Sept. 1, 1995, ed. M. Rots et al., 187 (Baltzer Science Pub., 1996)

4. 偏極短寿命重核生成法とスピン制御

上記のモーメント、核物性やベータ線角度相関実験には、不安定核をスピン偏極させる技術が不可欠である。このために核反応やビーム・フォイル相互作用を利用した偏極法を開発している。また不安定核の電気四重極モーメントを効率良く測定するため多重高周波磁場による核スピン反転技術を開発した。

(β -NQR) ベータ線角度相関実験ではスピン偏極を生成した後、NMR の技術を駆使して核スピントensorsのランク制御を行う。

K. Minamisono et al., Nucl. Phys. **A654**, 955c (1999)

K. Matsuta et al., Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A **402**, 229 (1998)

5. 不安定核のポストアクセラレーション

1 ~ 4 の諸研究をさらに発展させるために、低エネルギーの短寿命核ビーム生成装置を開発している。短寿命核をバンデグラフ静電加速器で生成して、これを高周波四重極 (RFQ) 型線形加速器で再加速する。RFQ は準備が整ったので、今後短寿命核を引き出すためのターゲットイオン源と輸送系を開発する。

K. Matsuta et al., Hyperfine Inter. **97/98**, 519 (1996)

K. Matsuta et al., Rev. Sci. Instr. **71**, 777 (2000)

B リソース紹介

1. 実験装置

○ 5 MV バンデグラフ型静電加速器

(HIVEC 社製 KN-4000-upgrade)

p, d, ^3He , ^4He を 5MeV まで加速。150 μA の大強度ビームを供給できる。1965 年建設。毎年オーバーホールを行い、現在も建設当時の性能を保持。4つのビームコースで年間 3000 時間運転。

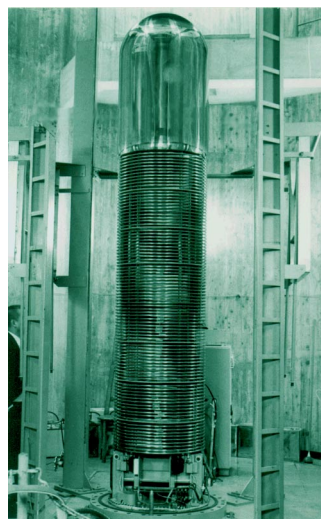


図2 バンデグラフ静電加速器 (5MV)

○ 高精度核スピン制御ベータ角相関測定装置

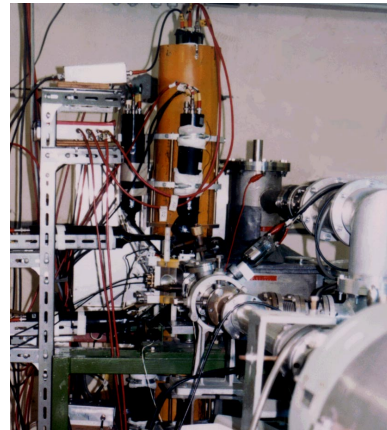


図3 核スピン制御ベータ角相関測定装置

○ RFQ 型線形加速器

Z/A = 1/7 までの重イオンを核子当たり 135 keV まで加速する。愛称 LITL。

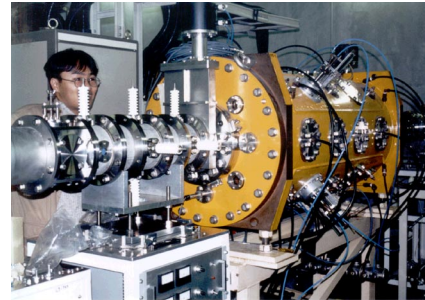


図4 LITL (RFQ 型線形加速器)

2. 過去の研究成果

「第二種核子流の決定」

ベータ線角度相関の測定から弱核子流の内 G-パリティを破る誘導テンソル項が弱磁気項に比べ十分小さい事を明らかにし、弱核子流の構造を決定した。今後、量子色力学の予言する小さな破れを検証する。

「核内核子質量の再規格化の定量」

核内で核子質量が 10%以上も軽くなっている事をベータ線角度相関から明らかにした。

「陽子ハロー発見」

クーロンポテンシャルのために存在しないと言われていた不安定核の陽子ハローを ^8B の四重極モーメントから発見した。

「不安定核の核モーメント決定」

p-及び sd-シェル領域の不安定核の核モーメントを次々に決定。世界的に期待されている。

*研究グループのホームページアドレス

<http://133.1.141.22/>

素粒子・核物理学講座 山中卓グループ

研究領域	高エネルギー物理学
研究課題	1 K中間子を用いたCP対称性の破れの研究 2 B中間子を用いたCP対称性の破れの研究 3 ニュートリノ振動

構成メンバー



山中 卓 (教授) 原 隆宣 (助手)

A 研究活動の概要

我々は素粒子の持つ性質、および素粒子間に働く力の法則について、特に弱い力における対称性の破れについて実験を行って研究をしている。

1. K中間子を用いたCP対称性の破れの研究

自然界にある4つの力のうち弱い力だけは、空間反転(パリティ変換、P)に対する対称性と粒子・反粒子の入れ替え(荷電共役、C)に対する対称性を完全に破っている。さらに二つを合わせたCPの変換に対しても、わずかに対称性が破れている。

このCPの破れは1964年にCPの固有値が-1と考えられていた寿命の長いK中間子がCPの固有値が+1である2個のπ中間子に崩壊する現象から発見された。この現象は、中性のK中間子 K^0 とその反粒子 $K^0\text{-bar}$ がお互いに移り変わるときにCPの破れを生み、寿命の長いK中間子にわずかに混じったCP+の成分がCP+のππに崩壊して起きる。現在まで生き残ったスーパーウィークモデルと呼ばれる理論と、小林・益川が提唱した標準理論は、こうした混合におけるCPの破れのメカニズムを説明する。

しかし標準理論はさらに、CPの固有値が-1のKの成分でもCP+の状態に崩壊できると预言している。それに対し、スーパーウィークモデルは直接的CPの破れは起きないとしている。

そこでこれらの理論のどちらが正しいか調べるために、米国フェルミ研究所において、米国の大学・研究所と共同でKTeVという新しい実験を行った。実験は800GeVの陽子を標的に当てて大量のK中間子を生成し、その崩壊を長さ約100mの精密な測定装置を(図1参照)用いて観測した。実験の準備は1992年から進め、1996-7年に一回目のデータ収集、1999-2000年に二回目のデータ収集を行った。

直接的CPの破れの有無を調べるために、次の四つの崩壊の分岐比の二重比、

$$R = \frac{BR(K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-) / BR(K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-)}{[BR(K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0) / BR(K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0)]} = 1 + 6\text{Re}(\epsilon'/\epsilon)$$

を測定した。その結果、 $\text{Re}(\epsilon'/\epsilon) = (28.0 \pm 3.0 \text{ (stat)} \pm 2.8 \text{ (syst)}) \times 10^{-4}$ [1]と、約7シグマ

で有意に0から離れていることがわかった。この結果と、ヨーロッパのCERN研究所の実験結果により、直接的CPの破れの存在が確立された。これにより、スーパーウィークモデルは完全に否定され、標準理論がより確からしくなった。

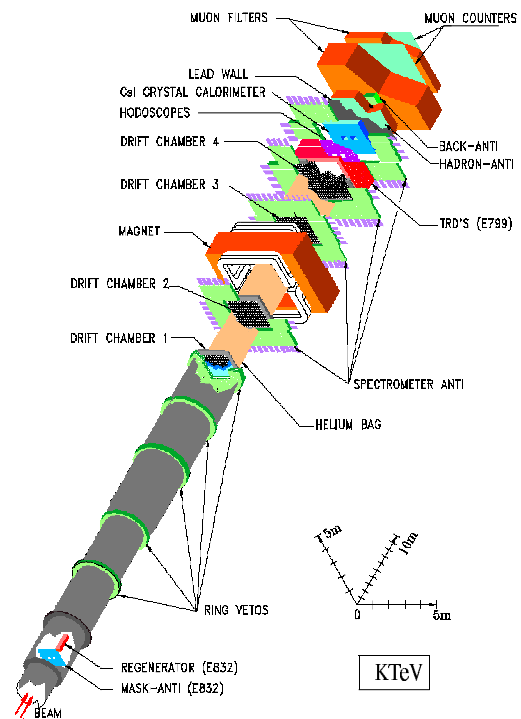


図1 KTeV 実験装置

さらにKTeV実験では稀な崩壊を用いたCPの破れの研究も行い、 $K_L \rightarrow \pi \pi e e$ の粒子間の角度分布におけるCPの破れの発見[2]、CPの破れの効果の大きい稀崩壊の探索を初め、十数種類のKの稀崩壊について新たな結果を得た[3,4,5]。

次のステップは、理論的な誤差が小さい $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu\text{-bar}$ 崩壊を用いて、CPの破れの大きさを決めている標準理論のパラメータを精密測定することである。そのため、まず現存する12GeVの陽子加速器を

用いた KEK の E391a 実験を行って予測される分岐比の約 1/10 の感度で経験を積み、次に現在建設中の 50GeV の陽子加速器を用いた実験の計画と準備を行う。これによって、この崩壊を百事象以上集め、パラメータを数パーセントの精度で求める予定である。

- [1] A. Alavi-Harati et al., Phys. Rev. Lett. 83, 22 (1999).
- [2] A. Alavi-Harati et al., Phys. Rev. Lett. 84, 408 (2000).
- [3] A. Alavi-Harati et al., Phys. Rev. Lett. 86, 397 (2001).
- [4] A. Alavi-Harati et al., Phys. Rev. Lett. 84, 5279 (2000).
- [5] A. Alavi-Harati et al., Phys. Rev. D 61, 072006 (2000).

2. B 中間子を用いた CP 対称性の破れの研究

CP の破れは、今まで K 中間子の系でしか観測されていなかった。しかし、標準理論によれば、B 中間子の方が CP 非対称性の効果が大きく現れる。

そこで、茨城県つくば市にある高エネルギー加速器研究機構(KEK)で Belle 実験を建設し、実験を行っている。これは、8GeV の電子と 3.5GeV の陽電子を正面衝突させ、 $b\bar{b}$ クォーク対の共鳴状態である $\Upsilon(4S)$ を作り出す。 $\Upsilon(4S)$ は B^0 中間子とその反粒子である $B^0\text{-bar}$ 中間子に崩壊する。B 中間子は飛びながら、さらに崩壊するが、そこで $J/\psi K_s$ など、CP の固有値が分かっている崩壊を選ぶ。その時 CP の破れがあれば、 B^0 が $J/\psi K_s$ に壊れる率と反粒子の $B^0\text{-bar}$ が $J/\psi K_s$ に壊れる率に違いが生じる。壊れた粒子が B^0 だったか $B^0\text{-bar}$ だったかは、 $\Upsilon(4S)$ から対で壊れた相手方の粒子の崩壊を用いて決められる。実際には、B の対は同時には崩壊しないので、一方が B^0 と同定されてから他方が $J/\psi K_s$ に壊れるまでの時間差の分布と、一方が $B^0\text{-bar}$ と同定された場合の時間差分布の違いとして観測される。(図 2 参照)

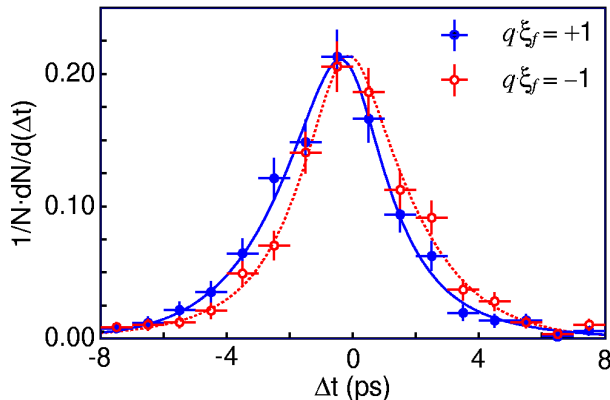


図 2. $B \rightarrow J/\psi K_s$ の崩壊時間差分布

なお、実験では時間差を測るのは難しいので、B 中間子の飛ぶ距離の差として観測する。我々のグループはこのための要となるシリコン崩壊点検出器の開発を行い、このメインな崩壊の解析も行った。その結果 CP の破れを表すパラメータとして、 $\sin 2\phi_1 = 0.99 \pm 0.14$ (stat) ± 0.06 (syst) と、0 から有意に離れている結果を得た[6]。この結果と米国 SLAC の BaBar 実験の結果はともに、B 中間子においても CP が破れていることを明らかに示すものである。

その他にも $B \rightarrow B\text{-bar}$ 中間子の混合パラメータの決

定[7]や B 中間子の種々の崩壊[8,9,10]を初め、いろいろな結果を出している。そしてこれら解析と平行し、現在使用されているシリコン崩壊点検出器よりも高放射線耐性、高事象収集率、高崩壊点分解能を目標とする次期崩壊点検出器が Belle 実験への導入に向けて研究開発されている。さらに電子陽電子の衝突の率を上げて統計を上げているので、これによってより精密な測定と稀な崩壊が観測できる。

また、加速器の強度をさらに上げて超精密な測定を行う計画も進めており、別の非対称なパラメータを測定することによって、標準理論のパラメータを様々な角度から検証および決定することを目指している。

そして、このようにして B 中間子から求めた CP の破れのパラメータと $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ などから求めた結果が一致するかどうか大きな焦点となってくる。それは、もしこれらが一致しないと、CP の破れに標準理論を越えた新しい物理がかかわっている証拠となるからである。

- [6] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87, 091802 (2001).
- [7] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 86, 3228 (2001).
- [8] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87, 101801 (2001).
- [9] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87, 111801 (2001).
- [10] K. Abe et al., Phys. Rev. Lett. 87, 161601 (2001).

3. ニュートリノ振動

ニュートリノには電子ニュートリノ、ミューオンニュートリノ、タウニュートリノの 3 種類あり、それらはどれも質量を持たないと考えられてきた。この仮説を検証するために、岐阜県の神岡鉱山にあったカミオカンデと呼ばれる、巨大な水槽と光電子増倍管からなる実験の解析に携わっていた。その後、統計を上げるために作られた、さらに大きな水槽からなるスーパーカミオカンデ実験の建設と解析に携わった。

地球の大気の上空という球面上で一様に作られたニュートリノが球の中の測定器に届く単位立体角あたりの数は、その方向に依存しないはずである。しかし、スーパーカミオカンデのデータの解析の結果、明らかな角度依存性があることを発見した[11]。これは、ミューオンニュートリノができてから測定器まで飛ぶ間に他のニュートリノに変わっていることを示す。これはニュートリノが異なる質量を持ち、異なるニュートリノ間で混じりあうことによって初めて起きる、ニュートリノ振動という現象である。この発見によって、ニュートリノは質量を持たないとしてきた標準理論は、修正を余儀なくさせられた。

スーパーカミオカンデを用いた研究を続けてきた瀧田氏の栄転と長島氏の退官に伴い、我々のグループのこの研究への寄与は 2000 年度末をもって打ち切られた。

- [11] Y Fukuda et al., Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998).

B. 研究グループのリソース紹介

学内：PC ファームなどによる計算サーバー

学外：Fermilab KTeV、KEK Belle 実験装置など

* <http://osksn2.hep.sci.osaka-u.ac.jp/>

基礎物理学講座 原子核理論グループ

研究領域	ハドロン多体系の物理
研究課題	1 ハドロン励起と原子核有効相互作用 2 弱電磁相互作用と核構造 3 QCDに基づくハドロンの構造

構成メンバー



佐藤 透 (助教授) 大坪久夫 (教授) 若松正志 (助教授)

A 研究活動の概要

孤立したハドロン多体系である原子核は、ミクロな宇宙と見なすことができる。この系のエネルギーが低エネルギーから高エネルギーへと移るに従い、この系のダイナミクスを規定する自由度は核子、中間子、バリオン励起、クォークへと姿を変える。これらの各段階での相互作用、反応、構造の理論構築が大きな研究目的である。他方、マイクロ・ラボラトリとしてのミクロな宇宙である原子核における弱電磁相互作用の現象を通して行う相互作用の基本法則の検証も大事な研究テーマである

1 核子以外の自由度を含む原子核および核子の電磁、弱い相互作用過程の研究

(1) 中間子発生を伴うエネルギー領域における原子核の有効相互作用の確立と少数多体系での核反応理論の構築が重要な中期計画である。これにより、高エネルギー原子核反応物理の基礎付けができあがることになる。

すでに、原子核をハドロンの自由度により記述する際に、完全に仮想的プロセスをユニタリー変換により消去することにより、低エネルギー原子核構造の概念を含む原子核理論の基本的相互作用の記述に成功した。これにより従来困難であった大きなエネルギー移行を伴う原子核における反応をも矛盾なく取り扱うことができる枠組が得られた。この理論の有用性を示す典型的な問題は、2核子系における弱い相互作用とパイオン吸収反応との関係である。

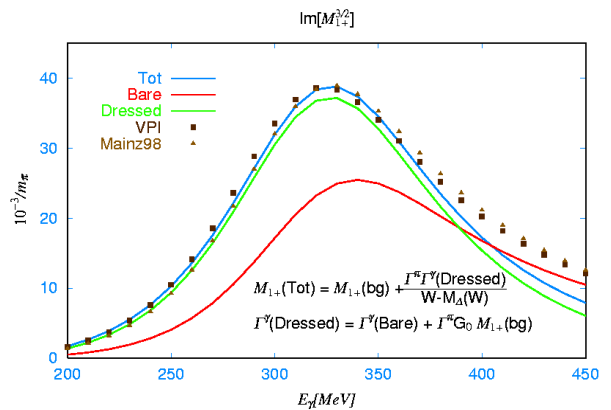
M. Kobayashi, T. Sato and H. Ohtsubo, Prog. Theor. Phys. 98 (1997) 927-951

(2) 電磁相互作用は原子核・ハドロン構造を調べる上でクリーンなプローブである。電磁相互作用に伴う反応の分析を通して原子核のみならず、核子、核子共鳴の構造および原子核内での性質の変化を研究する。そのような例として、中間子交換模型を πN , (γ, π)反応の理論的分析に適用し、 Δ 共鳴の電磁形状因子を分析し、もっと信頼できる $\gamma N \Delta$ の磁気双極子結合定数、電氣的4重極結合定数を決定した。その際、核子共鳴と同時に非共鳴過程を記述する有効相

互作用に対してユニタリー変換理論が重要な役割を果たすことを示した。今後、更に核子の高励起に伴う反応のメカニズムを解明して行く。

T. Sato and T.-S.H. Lee, Phys. Rev. C54 (1996) 2660-2684.

T. Sato and T.-S.H. Lee, Phys. Rev. C63 (2001) 055201-1-13



(3) 少数粒子系を正確に記述することは、第1原理から原子核の低励起状態の研究の基礎付けに重要であるのみならず、原子核の種々の基本的相互作用の検証に不可欠である。従来の粒子数ごとに対応する方法に対して、より一般的な記述として、連分数法を用いて少数粒子系の束縛状態の記述を提案した。モンテカルロ法を適用することにより励起状態をも解析可能であることを示し、更に量子モンテカルロ法に現れる符合問題を処理する方法を提唱した。今後、更に発展させたい。

H. Masui and T. Sato, Prog. Theor. Phys. 100 (1998) 977-991.

2. 弱電磁相互作用と核構造

原子核における弱い相互作用は、ある種の条件が満たされる場合には、素粒子の基本的な弱い相互作用の研究の実験室となり得る。太陽ニュートリノ観測から正確なニュートリノフラックスを求めるために不可欠な重陽子におけるニュートリノ反応の精密な

分析や核子-核子衝突における弱相互作用によるハイペロン生成、更に軽粒子数保存に関するミュー原子における電子変換の精密な理論的分析も重要な研究課題である。

(1) 小数核子系における弱い相互作用

ニュートリノと重陽子の荷電、中性電流による反応を、中間子交換電流をとりいれ研究した。この結果はSNOにおける太陽ニュートリノ検出実験に用いられ重要な役割を果たした。さらに太陽ニュートリノの重要な源である陽子-陽子衝突によるベータ崩壊を調べた。この結果は地上実験の可能性と基本的弱相互作用の解明に大きな寄与をすると考えられる。S. Nakamura, T. Sato, V. Gudkov and K. Kubodera, Phys. Rev. C63 (2001) 034617-1-18.

(2) 核子-核子衝突によるハイペロン生成過程バリオン間の弱い相互作用の研究手段として、核子-核子衝突によるハイペロン生成反応を提唱した。ここでは、中間子交換模型を用い、ハイペロン生成断面積、偏極量などを調べ、それらが、バリオン間弱相互作用について有用な情報を与え得ることを示した。H. Nabetani, T. Ogaito, T. Sato and T. Kishimoto, Phys. Rev. C60 (1999) 017001-1-4

3 カイラルソリトンクォーク模型に基づくハドロン構造の研究

格子ゲージ理論による直接計算が不可能な現状では、カイラル・クォーク・ソリトン模型は、核子のパートン分布に対する信頼できる予言を与えることができるほとんど唯一の有効模型である。しかしこれまで研究されてきたフレーバー数が2のカイラル・クォーク・ソリトン模型では、様々な実験が既に示唆している核子中のストレンジ・クォークの励起の可能性は全く無視されていた。核子中のストレンジ・クォーク分布の問題は多くの人々が興味を持っている問題であるが、完全に海クォーク的な性格を持つストレンジ分布に対して信頼できる予言を与えることができる模型はこれまで存在しなかった。幸い、カイラル・クォーク・ソリトン模型は比較的簡単にフレーバーSU(3)の模型に拡張可能で、しかも真空偏極の効果を非摂動的に計算できるという模型の場の理論的性格のゆえに、海クォーク的な性格を持つストレンジ・クォーク及びその反クォーク分布に対しても他の模型では不可能な十分信頼できる予言を与えることができると期待している。

(1) Skyrme 模型には存在しない核子の擬ベクトル結合定数に対する集団回転角速度の一次の補正が、この模型と不可分の関係にあるカイラル・クォーク・ソリトン模型には存在することを発見し、謎であった Skyrme 模型の g_A 問題の原因を明らかにした。またここで観測された Fermion-Boson 対応の破れの理論的な原因は、ソリトンの集団回転運動を正準量子化するときの集団演算子の時間による順序付けに関係していることを明らかにした。

M. Wakamatsu and T. Watabe, Phys. Lett. B312 (1993) 184-190; B325 (1994) 467-472,

M. Wakamatsu, Prog. Theor. Phys. 95 (1996) 143-173.

(2) 低エネルギーQCDの最も重要な性質であるカイラル対称性を最大限に取り入れたバリオンの有効模型であるカイラル・クォーク・ソリトン模型に基づき、核子のスピン・フレーバー構造を調べた。模型は、核子中のクォーク凝縮の非自明な空間構造、中性子の電荷分布へのクォーク・反クォーク仮想励起の効果、陽子と中性子の質量差等、他の模型では説明できないユニークな物理量を、統一的に説明できることを示した。

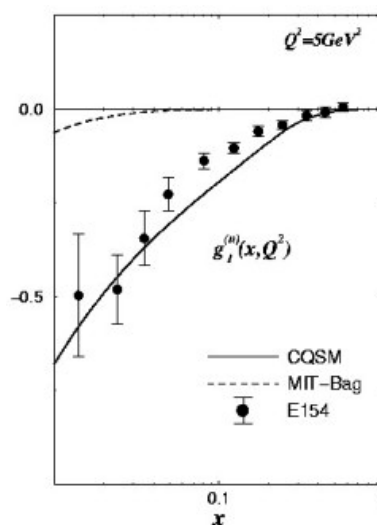
M. Wakamatsu, Nucl. Phys. A577 (1994) 335c-340c.

(3) カイラル・クォーク・ソリトン模型の枠組みの中で核子のパートン分布関数を計算する技法を開発した。この模型は既に低エネルギー観測量の解析で固定されている一つのパラメーター以外には全く自由パラメーターを含まない。

それにもかかわらず、それは陽子中の反クォーク分布 $d(x) - u(x)$ に対する NMC データや、陽子、中性子、重陽子の縦偏極構造関数等に対する EMC や SMC グループの最新の実験データの定性的に注目すべき特徴の全てを、分布の形も含めて非常に良く再現することを示した。

M. Wakamatsu and T. Kubota, Phys. Rev. D57 (1998) 5755-5766; D60 (1999) 03020/1-33,

M. Wakamatsu and T. Watabe, Phys. Rev. D61 (2000) 017506/1-4.



B 研究グループのリソース紹介

(1) これらの研究を進める上で不可欠な膨大な数値計算の処理のために、高速なワークステーション群を設置している。また、必要に応じてネットワークを通じてスーパーコンピュータを使用することができる。

(2) 大阪市立大学、米国アルゴンヌ国立研究所、米国サウスカロライナ大学等の国内外の研究機関との共同研究を進めている。

* 研究グループのホームページアドレス

<http://www-nuclth.phys.sci.osaka-u.ac.jp>

基礎物理学講座 素粒子理論グループ

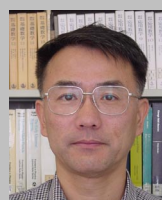
研究領域

素粒子物理学、場の理論、弦理論、重力理論

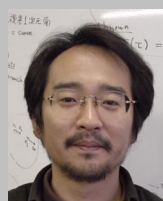
研究課題

- 1 素粒子の解明、基本法則の構築。
- 2 質量、対称性、及びその破れの起源を見極める。
- 3 超弦理論により素粒子物理、重力を統合、量子重力を確立する。
- 4 ゲージ理論と重力理論の統一。
- 5 暗黒物質、宇宙論を含め、宇宙物理への橋渡しをする。
- 6 場、弦理論の物性物理、統計物理、数理物理への応用。

構成メンバー



高杉 英一 (教授) 東島 清 (教授) 細谷 裕 (教授) 窪田 高弘 (助教授) 糸山 浩 (助教授)



太田 信義 (助教授) 田中 実 (助手) 中津 了勇 (助手) 土屋 麻人 (助手)

A. 研究活動の概要

素粒子理論グループは、スタッフ9人を含め、総勢40人近い大グループであり、その研究活動は素粒子理論のすべての分野にわたり、様々な角度からフロンティアに寄与している。素粒子理論は、クォーク、レプトンの性質とその相互作用を記述する現象論から、未知なる粒子や力の発見、統一的に自然法則を記述するゲージ理論の構築、宇宙論への適用、重力理論をも包含する雄大なる統一理論、自然の基本的描像をも変えてしまう超弦理論、そして物理世界を舞台に飛躍する数理物理の世界まで、じつに様々なトピックをカバーする。驚くべきことに、これら広範なテーマが密接に絡み合いながら、この5

0年、素粒子理論は飛躍的な進歩を遂げてきたのである。

阪大素粒子理論グループの最も大きな特徴は、上記に述べたすべての分野の第一人者が一ヶ所に集まり、学生とともに、激しい議論をたたかわせ、独創性のある研究に従事していることである。実験物理、観測物理と密接にかかわり合う研究者から理論的整合性を第一原理とする超弦理論研究者まで、全員が、素粒子論全体を見渡し、お互いに議論する。この素晴らしい環境は、2001年3月、それまでB棟とF棟の二つの建物に別れていたグループが、B棟に文字通り合体したことで、益々促進された。広いサロンでは、セミナーのみならず、常時、小グループの活気のある議論が飛ぶ。学生の人も、合体に

より、素粒子論を全体的視野から学ぶようになった。素粒子論内部で、専門化、分極化が起こりつつある現今、阪大グループは日本でもまれな総合グループとして機能し、日本全体に誇れるものとなっている。

B. 過去からの主な成果

阪大グループから、数々の研究成果が生まれてきた。少しの例をあげよう。

1. 謎の粒子・ニュートリノ

自然界にはニュートリノという謎の粒子が存在する。半世紀以上前、その存在が仮定されたときは、ニュートリノは質量零の粒子と想定された。しかし、最近の実験によって、ニュートリノは有限の質量を持つことが確立された。高杉らは、すでに 1980 年から 1985 年にかけて、ニュートリノが質量を持つ場合、様々なニュートリノの間で混合が起こりクォーク系よりもっと一般的なかたちで、CP 対称性が破れることを初めて明らかにした。また、ニュートリノと反ニュートリノが混じるマヨラナ型の質量が有る場合には、ニュートリノを伴わない 2 重ベータ崩壊が起きる。高杉らはこの場合、現在では標準となっている二重ベータ崩壊の半減期の公式を導いた。

M. Doi et al., Phys. Lett. B102, 323 (1981).
M. Doi et al., Phys. Lett. B103, 219 (1981).
M. Doi et al., Prog. Theor. Phys. Suppl. 83, 1 (1985).

2. 物質の質量・カイラル対称性

素粒子論ではゲージ対称性やカイラル対称性などさまざまな対称性が重要な役割を果たしているが、同時に対称性の自発的破れがどのようにして起きるかを明らかにすることが重要である。カイラル対称性はフェルミオンが質量を持つことを禁ずる。東島は、1984 年、素粒子の間に働くゲージ場の力が強くなると、タキオンと呼ばれる虚質量を持つ束縛状態が現れ、真空が不安定になりカイラル対称性が自発的に破れることを、漸近自由な場の理論の場合に示した。

K. Higashijima, Phys. Rev. D29, 1228 (1984).
K. Higashijima, Prog. Theor. Phys. Suppl. 104, 1 (1991).

3. 対称性崩壊・細谷メカニズム

重力やゲージ相互作用、すべての力と物質を包括する超弦理論は、理論的整合性から 10 次元の時空

から出発せねばならない。つまり、こうした高次元理論では 4 次元以外の空間は小さく縮まっているため遠くからは観測できないが、縮まった空間の性質は 4 次元空間における理論の対称性に反映されると考える。一方、現在、実験によって検証されつつある統一ゲージ理論においては、ゲージ対称性はいつも部分的にこわれていく。超弦理論でも、当初大きいゲージ対称性がどのように現実に観測されている小さなゲージ対称性にこわれていくか、という問題が残る。この点に、一つの答えを与えたのが細谷である。1983 年から 1989 年にかけて、縮まった空間が多重連結の場合、量子論におけるアハラノフ・ボーム効果が非可換ゲージ場でおこり、ゲージ対称性が部分的にこわれること、また、これが純粋な量子効果として起こりうることをしめした。この現象は細谷メカニズムと呼ばれ、ゲージ場そのものと空間のトポロジーだけで対称性が破れるという際立った性質があり、その後、多重連結時空における対称性崩壊の非常に重要な機構となっている。

Y. Hosotani, Phys. Lett. 126B, 309 (1983).
Y. Hosotani, Ann. Phys. (N.Y.) 190, 233 (1989).

4. 超弦理論を定義する行列模型

土屋らは 1997 年から 1999 年にかけて、超弦理論を摂動論の枠組みを越え、非摂動的に定式化するため IKKT モデルと呼ばれる行列模型を提唱した。連続的な弦の力学が、無限次元の行列の力学と同等であることを示したのである。我々の時空は、行列の固有値にほかならないとの解釈も提唱している。これにより、超弦理論への新しい理論的アプローチが確立されただけでなく、超弦理論を数値的に非摂動的に探究する道も開かれた。

N. Ishibashi et al. Nucl. Phys. B498, 467 (1997).

C. 最近の研究から

様々な研究がなされている。一部を紹介する。

1. ニュートリノの CP 位相と質量 (高杉)

ニュートリノ混合行列の典型的なものには、Bi-Maximal 混合と呼ばれるものがある。この混合行列は大気ニュートリノ混合と太陽ニュートリノ混合の割合がともに最大の値を预言する。しかし、最近の SNO の実験データを加えた解析からは、太陽ニュートリノ混合は最大ではない。高杉は、この混合を導く質量項が GUT エネルギースケールで実現されると考え、実験が行われている弱い相互作用のエネルギースケールでの混合を求めた。ここでのパラメータはニュートリノの質量とその位相である。この繰り込みの効果で太陽ニュートリノ混合が最大から

ずれること、またCPの破れの位相の値が導かれることを示した。

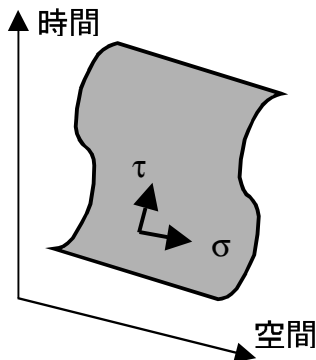
2. 弦理論の規定する時空構造の理解 (中津)

重力理論や場の理論に現れる特異点を弦理論はどのように認識するのだろうか？残念ながら、AdS/CFT対応仮説や4次元超対称QCDの奇妙な duality に満足いく証明、もしくは説明を我々はまだ知らない。これらの現象は、超重力理論や場の理論を越えて、弦理論が関わる。特に、開弦+閉弦系における開-閉弦の間の duality が本質的な役割を果たすと考えている。

弦の場の理論において、開弦、閉弦の各場には各々の worldsheet (curve) の moduli 空間を反映する homotopy 代数の構造がある。この代数の変形は時空構造に深く関係する。時空の特異点に関する開-閉弦の間の duality を弦の場の理論で記述することが目標である。これらの homotopy 代数が重要な役割を果たすと予想される。このような議論はまだなされていないが、duality の正しい理解は概念的にも、実際的にも必要である。

3. 超対称非線形シグマ模型の研究 (東島)

非線形シグマ模型は、場が曲がった空間上に値をとる理論であり、N次元球面上の非線形シグマ模型



などがよく知られている。このような理論はそれ自身で場の量子論の研究対象として興味深いものだが、中でも2次元時空上の非線形シグマ模型は、曲がった空間上を運動する弦模型を記述するので、特に重要である。

図のように1次元的に広がった弦が曲がった空間(ターゲット空間)上を運動する様子を時間も入れて考えると、 τ と σ で張られる2次元の世界面上で定義された非線形シグマ模型と見なすことができる。

超弦理論との関連において、とりわけ重要なのは2次元上の場の理論として見たときに、2種類の超対称性を持つ超対称非線形シグマ模型である。東島

はこのようなシグマ模型を、ゲージ理論の手法により構成し

- ◆ どのような時空構造が許されるか
- ◆ くりこみ群により理論がどう変化するか
- ◆ どのような共形場の理論になるのか

など、さまざまな角度から研究している。

4. 超弦理論、ブレイン、量子重力、非摂動的場の理論の解析 (太田)

量子重力をきちんと理解することは、理論物理学の直面する最も重要な課題の1つである。私はその最も有力な理論である超弦理論による量子重力の問題の解明と、超弦理論の理論構造を明らかにすることを目標としている。超弦理論は決して弦だけの理論ではなく、ブレインと呼ばれる広がった物体を含んでおり、そのダイナミクスの解明が超弦理論そのもの、さらに量子重力理論の解明に重要である。ブレインを用いることにより場の理論の非摂動的な解析も可能である。また古典的重力の場合にはリーマン幾何学が重要であったが、量子重力では非可換幾何学も重要であるとの観点からその研究も進めている。具体的な成果として、超弦理論におけるブレイン系の一般的構成法の確立、超対称性の一般的解析、AdS/CFT対応や行列理論を用いたブラックホールの非摂動的解析、非可換場の理論の非摂動的性質の解明、その理論のソリトン解の構成とその性質の解明などの結果を得ている。

- N. Ohta, Phys. Lett. B403 (1997) 218;
- N. Ohta and J.-G. Zhou, Nucl. Phys. B522 (1998) 125;
- N. Ohta and P.K. Townsend, Phys. Lett. B418 (1998) 77;
- T. Kitao, K. Ohta and N. Ohta, Nucl. Phys. B539 (1999) 79.
- N. Ohta et. al., Phys. Lett. B445 (1999) 287;
- R.-G. Cai and N. Ohta, Phys. Rev. D61 (2000) 124012;
- A. Fujii, Y. Imaizumi and N. Ohta, Nucl. Phys. B615 (2001) 61.

5. 現実の物理法則としての超対称模型 (田中)

最小超対称標準模型は標準模型を越える新しい物理の候補として最も有力なものである。この模型の特徴として次の3点が挙げられるであろう。

- (i) 超対称粒子の存在、
- (ii) ヒッグス2重項が2つ存在すること、
- (iii) 新しいフレーバー混合およびCPの破れの源を含むこと、

である。様々な実験との関係を重視しつつ、これらの点について研究を行っている。

6. 超対称ゲージ理論の非摂動論的解析 (窪田)

場の量子論の非摂動論的な側面を解明する研究は、過去 25 年ぐらいのあいだに様々な展開を見せて来たが、1994-5 年を境にして新たな段階に入った。それは Seiberg-Witten の研究に刺激されて、双対性、D-brane, AdS/CFT 対応等々の新しい概念、理論的手段を用いての解析の道が開かれたからである。

Seiberg-Witten のもともとの論文は、 $N=2$ の超対称性を持つ Yang-Mills 理論、QCD に関してであった。この理論の真空状態は moduli-parameter で記述されるが、この moduli 空間の中には特殊な点が存在する。それは超共形対称性が実現されている点であり、この点ではゲージ理論のベータ関数がゼロになる。くりこみ群の流れを赤外に追って行けば、物質場の質量や、Higgs 場の真空期待値も赤外固定点での値に近づく。これら諸量が赤外固定点での値に近づく度合と、ベータ関数がゼロに近づく度合との比率は、臨界指数として重要な意味を持つのだが、Seiberg-Witten 理論の知見により、これらの臨界指数はなんらの近似なしに、厳密に計算することが出来る。またこれらの臨界指数は、代数幾何学での、ある種の分類理論とも密接な関係があることが分かって来ている。

以上のように、ゲージ理論を非摂動論的に厳密に取り扱う場合、超共形対称性が重要な役割を担っていることが分かる。同じような状況は近年の AdS/CFT 対応の研究にも見られる。この理論では、四次元の超共形対称性を持つゲージ理論の非摂動的な側面が、五次元超重力理論の古典的な側面と密接な関係にあることが論じられている。この場合、いわゆる Large- N 極限を取るという前提のもとでの議論が主である。このような極限を取らない場合については、実は二次元の共形場理論と三次元重力の関係が知られていた。三次元重力理論を Chern-Simons ゲージ理論として扱うならば、二次元理論の Virasoro 代数を容易に導けることが分かる。AdS/CFT 対応は、超弦理論の分析の上でも極めて重要であり、Large- N 極限をどこまで緩めて行けるのか、現在、活発に研究を進めようとしている。また、共形対称性を持たないゲージ理論と重力理論との双対性についてもここ数年、少しずつではあるが我々の理解が深まりつつある。

T. Kubota and N. Yokoi, Prog. Theoret. Phys. 100 (1998) 423.

Y. Yoshida and T. Kubota, Phys. Rev. D60 (1999) 40131.

7. ブラックホールと重力波 (高杉)

ブラックホールの近くでの場の揺らぎの方程式 (Teukolsky equation) の解析的解を求めることは長年の夢であった。解析解を求めるために多くの研究者が多大な研究を行った。特にチャンドラセカール

は最後の生涯をこの研究にかけ、ポテンシャル問題として問題を定義し、解の性質を一冊の本にまとめた。高杉らはこの問題にチャレンジし解析解を求めることに成功した。この解を用いて、チャンドラセカールが数値的に導いた様々な性質を解析的に導出した。また、この解の応用として、ブラックホールと中性子星からなる二重星からの重力波の正確な波形を解析的に求める事ができた。

S. Mano, H. Suzuki, E. Takasugi Prog. Theor. Phys. 95, 1079 (1996); 97, 213(1997).

H. Tagoshi, S. Mano, E. Takasugi, Prog. Theor. Phys. 98, 829 (1997).

H. Suzuki, E. Takasugi, H. Umetsu, Prog. Theor. Phys. 102, 253(1999); 103, 723(2000)

8. 超弦理論の非摂動論的定式化 (土屋)

超弦理論は量子重力を含む統一理論として最も有望なものであるが、現在のところ摂動論的に安定な真空のまわりの摂動論としか定式化されておらず、このような真空は無数個存在するので、予言能力を持ち得ない。この状況を打破するためには、非摂動論的に理論を定式化し、そのダイナミクスから真の真空を決定しなければならない。以前から行列模型が弦理論を非摂動論的に定式化するものと考えられ、実際 toy モデルでは成功を収めていた。1996 年に IKKT は超弦理論の一体の作用から出発して、超弦の多体系を自然に記述し、超弦理論の非摂動論的定式化であると考えられる行列模型 (IIB 行列模型) を提唱した。その後、福間、川合、北沢、土屋はこの模型の Schwinger-Dyson 方程式から超弦理論の光円錐場の理論を導出し、この模型が超弦理論の摂動論を確かに再現することを示し、この模型が実際に超弦理論の非摂動論的定式化になっていることを確かめた。注目すべき点は、この模型はゼロ次元空間上の場の理論の形をもつため、時空はアブリオリにはなく、ダイナミカルに生成されるものと捉えるところである。このため、この模型を解くことによってなぜ我々の時空が 4 次元なのかさえも説明できるはずである。この目標とあわせて、素粒子理論の標準模型がもつゲージ群や物質の世代数なども自然に導こうと現在いくつかのグループが挑戦を続けている。

N. Ishibashi et al., Nucl. Phys. B498(1997)467

M. Fukuma et al., Nucl. Phys. B510(1998)158

T. Hotta et al., Nucl. Phys. B545(1999)543

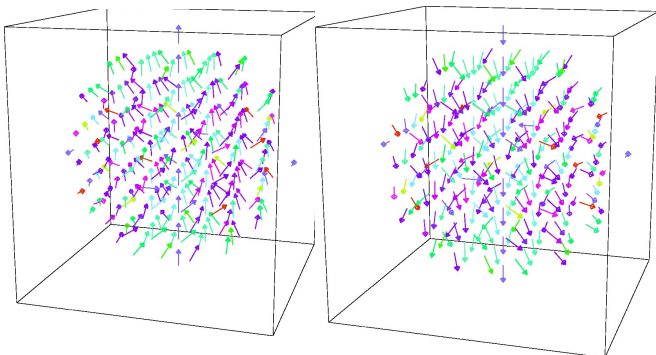
9. 宇宙の中の重力とゲージ場 (細谷、窪田)

重力と非可換ゲージ場との絡みつきは奥深い。単に理論的整合性の問題としてだけでなく、現実の宇宙における物理的実体として観測しうる。古典論、準古典論のレベルでもその効果が見られる。

重力によって引きつけられ、純粋なゲージ場だけからなるモノポールもその一つだが、非可換ゲージ場と時空の絡みつきから、4次元特有の宇宙発展が帰結しうる。

電磁相互作用と弱い相互作用は Weinberg-Salam 理論によって統一される。この理論は $SU(2) \times U(1)$ というゲージ対称性をもっている。一方、時空の発展は Einstein の重力理論で記述される。我々の宇宙は Robertson-Walker 宇宙であり、空間的にはほぼ一様等方であり、今も膨張している。空間的に閉じている場合、時空のトポロジーは $R \times S^3$ である。

Weinberg-Salam 理論では、ゲージ群が $SU(2)$ を含むだけでなく、Higgs 場の真空も S^3 の構造を持つ。 S^3 は $SU(2)$ と同型で、ゲージ群、Higgs 真空、空間の三つが同じ群構造をもち、絡み合いながら時間発展することになる。実際、この絡みつきが初期宇宙で起こっていたかもしれないことを、細谷、窪田は指摘した。更に面白いのは、Weinberg-Salam 理論ではゲージ群が $SU(2) \times U(1)$ で、最終的には $U(1)_{EM}$ に破れることである。このため、宇宙発展の過程で、必然的に磁場生成が起こる。その大きさは、宇宙の膨張とともに小さくなるが、初期では大きな役割を果たしたと考えられる。



我々の空間は S^3 、生成される磁場は一定の大きさを持つが、その方向は空間の場所によって変化する。図では、 S^3 の北半球、南半球をそれぞれ、単位球の内部で表し、二つの単位球の表面をひっつけて S^3 全体を表す。一定の大きさの磁場が矛盾なく配位できる。これは、3次元空間でのみ可能である。数学では、Hopf 写像と呼ばれる。

H. Emoto, Y. Hosotani, T. Kubota, hep-th/0201141.

10. 2次元ゲージ理論とスピン系 (細谷)

2次元ゲージ理論は4次元 QCD と様々な共通点をもつ。2、3種のフェルミオン場がゲージ相互作用する系では、カイラル対称性が自発的に破れ、カイラル凝縮と閉じ込め現象がおこる。細谷は、1996年

から1998年にかけて各フェルミオン質量への依存性も含め、閉じ込め現象の詳細を2次元 $U(1)$ ゲージ理論において調べた。さらに、1999年、2種の零質量フェルミオンが相互作用する $U(1)$ ゲージ理論は反強磁性スピン鎖と同等であることも証明した。

Y. Hosotani, J. Phys. A30 (1997) L757.

R. Rodriguez and Y. Hosotani, J. Phys. A31 (1998) 9925.

D. 将来へ向けて

素粒子理論グループでは、9人のスタッフが、各々独自に自分の目標を定め、それに向かい、ときには独立に、ときには共同で、常時、議論し、お互いにもりたて、批判もし、新しい独創的な成果をあげようとしている。我々は、グループとして一つ、二つの目標を限定したりはしない。それよりも各人に最大限の自由を保障し、お互いに啓発しながら、創造性を発揮してゆく。素粒子物理学、ひいては物理学全体の理解のために、実験や観測と直接結びつく現象論から、場の理論、弦理論を主体とした統一理論の構築まで、幅広い探究を我々は目指している。

* 研究グループのホームページアドレス

<http://www-het.phys.sci.osaka-u.ac.jp>

物性理論グループ

研究領域 物性物理学の理論的研究
構成メンバー 赤井久純(教授) 小川哲生(教授) 菊池誠(教授) 齋藤基彦(教授)
阿久津泰弘(教授) キース スレヴィン(助教授) 時田恵一郎(助教授)
廣岡正彦(助教授) 松川宏(助教授) 小谷岳生(助手) 坂本好史(助手)
永尾太郎(助手) 安藤功兒(連携併任教授)

A 研究活動の概要

凝縮系の示す様々な性質を計算機物理学の手法や、解析的な手法を用いて研究している。対象は物質中の不純物原子核、ナノスケール物質や高分子・蛋白質、金属、半導体、化合物、液体などのほか、これらの表面、界面など様々なスケールの系が含まれる。このような系における凝集、磁性、電気的性質、輸送現象、相転移現象、摩擦現象、非平衡量子相転移、またこれらを理論的に扱うための手法の開発が研究テーマである。

1 赤井 久純(教授)

金属・合金、半導体、金属間化合物の物性を第一原理に基づいた計算によって理解し、それに基づいて未知の物質の物性を予測することが研究課題である。さらに、ナノ構造におけるマテリアルデザインをめざして、第一原理計算によるナノマテリアルデザイン——計算機ナノマテリアルデザイン——の手法を確立することを目標としている。半導体の世界においては、超構造やヘテロ界面、量子井戸や量子ドットなど、狙った構造を高い精度で形成する技術が格段に進んできている。そこでは自由なナノマテリアルデザインの発想を現実のものとしていくことが可能になりつつある。電荷だけではなくスピンの自由度を制御して新しい物理とその応用を目指そうというスピントロニクス材料のデザインはそのような例である。なかでも希薄磁性半導体と呼ばれる一群の物質はキャリア誘起強磁性という興味深い性質を示し、スピントロニクス材料として最も有望な物質群の一つと考えられている。これらの希薄磁性半導体について、第一原理計算に基づいて磁性発現の機構を解明し、種々の磁気状態と電子状態との関連を明らかにしてきた。現在、このような希薄磁性半導体やそのヘテロ構造、超構造における輸送現象や光磁気効果の理論的研究を進めている。また、これらの研究とともに、物性を微視的に調べるための強力な手法である核物性の理論的研究を、原子核実験グループと協力して行っている。



《ホームページ URL》 <http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~akai>

2 小川 哲生(教授)

凝縮系における動的
非線形応答・時空間発展現象、特に量子多体系の励起状態が関与する諸現象を、微視的立場と現象論的立場の双方から理解し予測することを目標としている。すなわち、「非線形性」と「時空間変化」とが関連する物性物理学が関心の中心である。基底状態のみならず励起状態をも考察するため、量子ダイナミクスや緩和・散逸の問題にも関わることになる。見方を変えて言うと、フェルミオン場(電子系、電子-正孔系など)とボゾン場(光子場、フォノン場、励起子系、熱浴など)とが結合・相互作用している系を対象とし、これら2つの量子統計性の異なる系の間の競合・協調、コヒーレンス・デコヒーレンスなどが巨視的效果として現れる量子現象に着目している。



具体的には、【励起子系のボゾン理論】少数励起子系の Holstein-Primakoff 型ボゾン化法と非線形光学応答、少数励起子系の Dyson 型ボゾン化法、多励起子系のボゾン表示と巨視的量子現象。【光誘起相転移の量子ダイナミクス】光誘起核生成・光誘起界面ダイナミクスの統計理論、格子変形を伴う励起クラスターの融合・凝集・分裂の理論、寿命を持つ量子多体系の相分離・パターン形成ダイナミクス。【量子多体系の非線形応答理論】フェルミ面効果の結合クラスター法による取り扱い、フェルミ熱浴とボゾン熱浴の理論。【量子固体における不純物トンネル現象と物質波コヒーレンスの理論】などである。

《ホームページ URL》 <http://wwwactv.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~ogawa/cover.html>

3 菊池 誠(教授)

統計力学と非線形動力学を基礎として、物理と生物・統計・情報・工学等との境界領域の研究を行な

っている。たとえば、蛋白質はアミノ酸間の複雑な相互作用の結果として天然構造へと折れ畳むが、天然状態はあくまでも熱平衡状態であり、したがってその構造と折れ畳み過程の解明は基本的に統計力学の問題である。また、高速道路交通流を非線形動力学系とみなしたときには、渋滞発生は非平衡相転移と捉えることができる。境界領域の面白さは、たとえば生物学者と物理学者がそれぞれの視点を持ち寄るところにあるので、境界領域の問題に対してあくまでも物理学の立場を強調しつつアプローチするのが我々の基本的な研究姿勢である。全体を貫く“物理としてのキーワード”は“相転移”であると言うことができる。また、研究の主な手法としては数理モデルに基づく計算機シミュレーションを用いている。



具体的な問題としては、(1)蛋白質の折れ畳みと機能、(2)生体分子モーターのメカニズム、(3)高速道路交通流のシミュレーションとデータ解析、(4)モンテカルロ・シミュレーションの新手法の開発、(5)相転移と臨界現象の基本的問題の計算機シミュレーションなどである。

《ホームページ URL》 <http://wwwcompv.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~kikuchi/>

4 齋藤 基彦 (教授)

液体ヘリウム面上の2次元電子系や半導体ヘテロ構造中の電子系などの低次元電子系の物性を理論的、数値的に明らかにし、実験の解析をする。

【1】液体ヘリウムの液面上または半導体ヘテロ構造中の2次元電子系が電子間の相互作用のために、ウィグナー結晶を作っているときのさまざまな性質を調べる。具体的には、(a)半導体ヘテロ構造で不純物散乱など静的な散乱を受けるとき、ウィグナー・フォノンの分散関係に不純物に由来するギャップが出来、吸収線の形状がフォノンの分散を反映した非対称になること、(b)液体ヘリウム3上の電子系のプラズマ振動吸収の実験において見いだされた吸収線幅が $1/T$ に比例するなどの結果と良い一致を見た。(c)フォノンの分散を非調和項を取り入れて計算し、フォノンがソフト化する条件より、ウィグナー結晶の融解条件を求めた。得られた結果は Si-MOSFET の実験と定量的な一致が得られた。(d)ヘリ



ウムの薄い膜上に生成されるウィグナー結晶の融解の条件を求めた。この系は電子間の相互作用を人為的に調節できるという意味で面白い系である。後にこの理論は実験をよく説明することが確かめられた。

【2】半導体に強い電場を加えたときシュタルク・ラダーと呼ばれる量子的に離散的な状態が生じる。この状態の発生する条件をさまざまな場合について調べた。たとえば半導体ヘテロ接合などで2次元的にドットが周期的に配置されている場合に強電場、強磁場、あるいはその双方が加えられたときについて電子状態の計算を行った。得られた結果は、(a)加えた方向によって、シュタルク・ラダーの周期は不規則に変化するはずだが、状態密度などには方向依存性があまり無い、(b)価電子帯と伝導帯の双方を考えると、電場の強さに応じて、両者に関連したラダーが生ずること、(c)磁場を加えるとホフシュタッターの蝶々図形と複雑に絡み合うエネルギー構造を持つことなどが分かった。また強電場が加わったとき、電気伝導の計算を行い、電気伝導の量子化について議論した。たとえば(d)伝導度の量子化とシュタルク・ラダーの量子化の双方が複雑に絡み合うこと、(e)不純物が入ったとき量子化のなまり具合の観察をした。【3】経路積分法を自由エネルギーを計算できるような有限温度に拡張し、調和型の中で最も一般的な試行関数で計算できるように拡張した。そして光学的ポーラロン、表面波ポーラロン、電子間の相互作用がある場合などに適用した。

《ホームページ URL》 <http://ann.phys.wani.osaka-u.ac.jp/info.html>

5 阿久津康弘 (教授)

《ホームページ URL》 <http://wwwactv.phys.sci.osaka-u.ac.jp/index-a.html>

6 キース スレヴィン (助教授)

アンダーソン金属絶縁体転移を研究している。日常の世界では物体は古典力学の法則に従って動くが、微視的な規模では、物体、例えば、電子は量子力学の法則に従って動く。量子力学では電子は波のようにも振舞い、干渉現象を示す。ランダムポテンシャル中では、この干渉効果が電子の拡散運動を抑制し、さらに、普通は導体である物質を絶縁体に変えることもある。この現象はアンダーソン局在と呼ばれる。金属相から絶縁相への転移は連続的な転移であり、アンダーソン転移と呼ばれる。この転移は連続しているので繰り込み群理論を使って理解することができる。私はコンピュータシミュレーションと有限サイズスケ



ーリングなどの理論を用いて、この転移のユニバーサルな特徴を研究している。

《ホームページ URL》 <http://ann.phys.wani.osaka-u.ac.jp/>

7 時田 恵一郎 (助教授)

非線形力学, 統計力学, 計算物理学などの手法を用いて、いわゆる「複雑系」の数理的理解を目指している。これらの対象は一見全く異なる研究分野であるが、比較的単純な素子が多数集まり、複雑な相互作用で影響しあうことにより創発するマクロな現象という点で数理的に密接な関係があり、それらを統一的な視点で眺めることにより逆に個々の理解が深まるという場合が少なくない。

具体的には、【大自由度理論生態学】ランダムな相互作用を持つ進化力学系の大域的振舞い、生物種の多様性の起源、表現型における中立突然変異の役割、【蛋白質の折り畳みと逆折り畳み】逆折り畳み問題 (= 設計問題) の並列高速最適化手法、配列淘汰、天然構造創発の問題、【神経回路網, 学習, 情報処理系】ホップフィールドモデルのエネルギーランドスケープと無限ステップレプリカ非対称 (RSB) 解、学習、情報処理系の統計力学、【組合せ最適化問題】巡回セールスマン問題 (TSP)、スタイナー問題、等に関心があり研究を進めている。

《ホームページ URL》 <http://www.actv.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~tokita/>



8 廣岡 正彦 (助教授)

凝縮系 (液体ヘリウム) の相転移のダイナミクスを、ミクロな立場から考察する。この系を記述するのに適した正準共役な力学変数として、密度揺らぎの演算子と位相演算子を見つけたが、粒子間の相互作用が強いためこれを用いた摂動計算はまだ成功に至っていない。近年、トラップされた原子のボース凝縮が実験により達成され、新たな物理対象になっている。この新しい系に対しても、正準共役な集団変数を定義することが出来る。今のところボース凝縮系は Gross-Pitaevsky 方程式をつかって巨視的量子状態として現象論的に C 数の取り扱いがなされているが、集団変数を用いた微視的立場



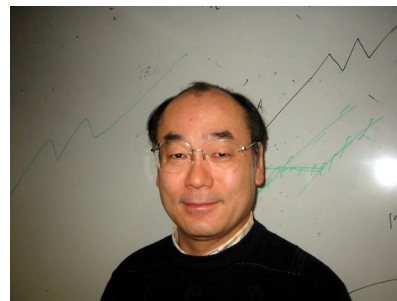
からこの興味ある系をとりあつかう。

《ホームページ URL》 <http://ann.phys.wani.osaka-u.ac.jp/>

9 松川 宏 (助教授)

固体界面間の滑り摩擦は最も身近で重要な物理現象のひとつであり古くから多くの研究が行われてきた。界面摩擦に類似の現象は、電荷・スピン密度波や超伝導体磁束格子のピン止めと運動など、固体内でも観測される。ピン止めは静摩擦、動く時のエネルギー散逸は動摩擦であり、固体内摩擦現象である。これら多様な系の摩擦現象には様々の共通する性質 (普遍性) があるが、その物理に関しては基本的な多くの問題が未解決である。その原因として、摩擦が基本的に非平衡現象であることがあげられる。しかし、近年の非平衡系の科学・物性科学の進歩は、新しい手段、視点からの摩擦の研究を可能にし、新展開が起こりつつある。一方、近年の技術の進歩や環境問題の深刻化はより精密な摩擦制御を要求し、また、ナノテクノロジーなどの今後の基幹技術はナノ・マイクロスケールでの摩擦など、これまで考えられてこなかった新しい摩擦の問題を引き起こし、その解決が急務となっている。それらは物性科学の問題としてもほとんど未開拓の分野であり、学問的にも極めて興味深い。我々は次の目的を持って摩擦の物理の理論的数値的研究を行っている。i) 階層構造をなす異なるスケールの界面摩擦をそれぞれのスケールに適したモデルに基づき調べ、次にそれらを結びマイクロレベルからマクロ摩擦機構を解明する。ii) 固体内摩擦系を含めた統一的視点からの研究を行い、摩擦機構の統一的理解をはかる。さらに摩擦の普遍性と多様性を明らかにし、摩擦の予測・制御につなげる。

《ホームページ URL》 <http://ann.phys.wani.osaka-u.ac.jp/~hiro/>



10 小谷 岳生 (助手)

【材料科学の基礎としての電子状態計算の方法の探究】第一原理的な電子状態計算のアルゴリズムの探求と適用の研究を行っている。密度汎関数法の枠組みにおいて局所密度近似を用いないで、交換項および静的乱雑位相近

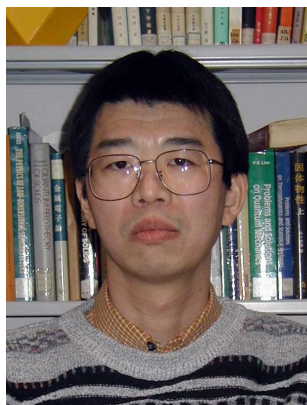


似における相関項を取り入れた多体論的な計算法を開発している。現状では簡素化されたモデルを用いてのみ取り扱えるような電子相関等の問題をも現実の電子系で取り扱えるようにすること、あらゆる電子系のふるまいを計算機上で再現すること、そして自由な物質デザインを可能にすることが究極の目標である。

《ホームページ URL》 <http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/~kotani/>

1.1 坂本 好史 (助手)

相互作用の競合する系では、温度とか濃度といった外部から制御できる変数を変えると、競合のバランスが変わって、系の状態の大きく変化する可能性が出てくる。このため、例えば、長周期構造のような複雑な整合相や不整合相といった多数の安定な構造が出現したり、それらの間の相変化が生じたり、あるいは相は変わらなくとも顕著な温度変化をする物理量があったりというように、物質を構成している微視的な要素の間の相互作用の競合が多彩な巨視的現象として現れてくることがある。どのような競合がどのような機構でどのような現象を生じてくるのかを系統的に調べることによって、具体的な系で起こる個々の現象を理解していこうとすることが基本姿勢である。固体表面における再構成とその相転移、マイクロクラスタにおけるサイズ依存性、巨大分子の吸着による構造変化、高い圧力に誘起された準安定構造などを具体的な考察の対象としている。



《ホームページ URL》 <http://ann.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

1.2 永尾 太郎 (助手)

ランダム行列理論は、量子重力、格子ゲージ理論から生態系、金融工学におよぶ広い応用範囲をもつが、それら様々な応用から要請される基礎数理の解明を行い、一方で新たな応用分野を開拓する。現時点では、具体的に以下のような研究を行っている。【1】ランダム行列による現象論を微



視的動力学から導出する手法として、超行列の方法と半古典量子論があるが、これらの厳密な基礎づけを行う。超行列の方法は格子ゲージ理論および固体物理学における Anderson 局在を、半古典量子論は量子カオス系を扱うためのものである。【2】数理ファイナンスにおける金融相関行列への応用を指向して、ユニタリ不変性の破れたランダム行列アンサンブルを解析する。固有値相関、固有ベクトルの分布の評価を行い、スケーリング理論にからめた議論を行いたい。【3】表面成長過程など非平衡統計力学への応用のため、関係する多体ランダムウォークのウォーカー相関を評価する。そのために、対応関係にあるランダム行列の離散化モデルを、離散測度上の直交多項式の数理に基づいて解析する。

《ホームページ URL》 <http://www.actv.phys.sci.osaka-u.ac.jp/>

1.3 安藤 功兒 (併任教授)

スピンの機能を利用する電子材料の開発とその物性評価、ならびにそれを用いた光・電子デバイスの実現の研究を行っている。具体的には、【1】多量の遷移金属を含む半導体の合成とその光学的評価、【2】集積化型磁気光学デバイスの開発、そして【3】強磁性金属を用いたトンネル磁気抵抗素子とその不揮発性磁気メモリへの応用の研究である。



遷移金属を含む半導体は希薄磁性半導体と呼ばれている。この物質では、遷移金属の d 電子と母体である半導体の sp バンド電子が混成しているため、強く磁性に依存する特異な光学的特性や電気伝導特性が観測される。希薄磁性半導体はバンドギャップ以下のエネルギーの光に対して透明で、かつ大きな磁気光学効果を示すため、高速光通信用磁気光学デバイスに利用できる可能性がある。また、非常に薄い酸化物絶縁層を二つの強磁性金属で挟んだトンネル構造では、その電気抵抗値は強磁性金属層の磁化の向きによって大きく異なることが知られている。これを強磁性体のヒステリシス効果と組み合わせることにより、大容量の高速不揮発性メモリが実現できる。スピンの機能を用いる光・電子デバイスの研究はスピンエレクトロニクスと呼ばれる新しい研究領域である。磁性と伝導・光学特性の相乗作用による多彩で興味ある物性の宝庫であるのみでなく、次世代の新機能光・電子機能素子を実現する可能性を秘めている。そのため、基礎的な物性研究とそのデバイス化のための研究開発との双方を意識した研究を進めている。

《ホームページ URL》

B 研究グループのリソース紹介

過去の研究成果の例

1. 移金属合金の電子状態の理論

不規則合金の電子状態を扱うための手法の開発，および計算機コードを開発した。この手法を用いることによって，様々な不規則系の電子状態と物性を第一原理に基づいて計算することが可能となった。例として色々な 3d 磁性遷移金属合金の飽和磁化を平均 d 電子数の関数としてプロットした，いわゆるスレーター・ポーリング曲線を，構成原子の原子番号以外のパラメータを用いずに計算した結果を図 1 に示す。同じ手法は金属間化合物混晶や希薄磁性半導体の電子状態の計算等にも広く用いられている。

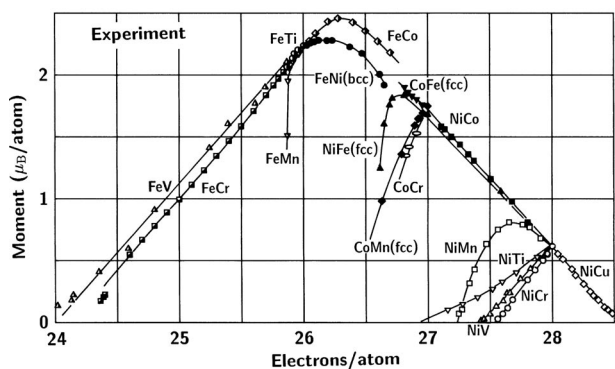
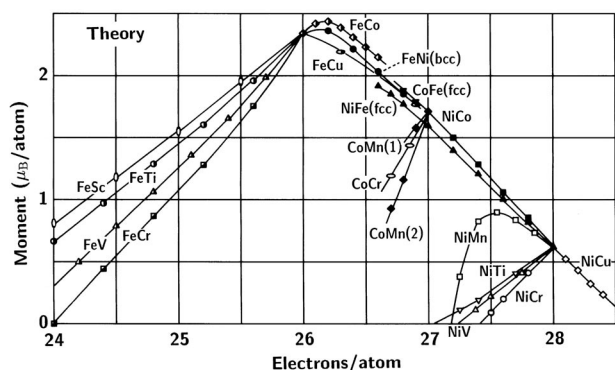


図 1 スレーター・ポーリング曲線。横軸平均 d 電子数，縦軸は飽和磁化の大きさが計算された結果，下が実験である。

2. 量子ラチェットの理論

ラチェットとはマクロな非対称性の無い系からある

方向の流れを取り出す装置であり，マイクロマシー

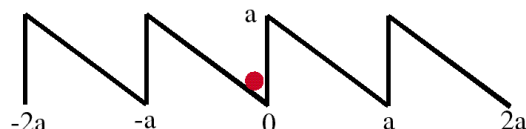


図 2 非対称周期ポテンシャル中の粒子

ンや分子モーター等の機構として注目を集めている。これまでは古典力学に基づくモデルが提案されてきたが，低温でより小さなスケールの系を作れば量子効果が重要になると期待される。我々は二つの量子ラチェットのモデルを提案した。一つは時間とともに周期的にオン-オフを繰り返す，非対称周期ポテンシャル (図 2) 中のブラウン粒子からなるモデルである。このモデルではポテンシャルがオンの間は粒子は一つのポテンシャルの谷の中で量子力学的な振動をする。オフの間は自由運動をする。熱浴との相

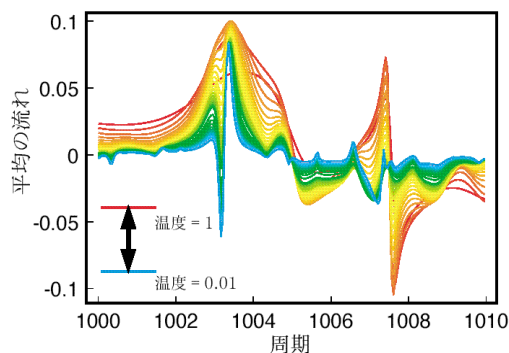


図 3 平均の流れのポテンシャル off の周期依存性

互作用があると運動は全体として周期的になり，オンの間の振動は各周期で揃い，その結果オフの間の速度の方向もそろい，平均の流れを生じる (図 3) [1, 3]。2 番目のモデルでは時間的には一定の非対称周期ポテンシャル中の粒子に弱い交流外場を加える。ポテンシャルは外場にあわせて周期的に左右に傾き，粒子は左右に傾いたときそれぞれ左右隣のポテンシャルの極小点へトンネル効果で動く。ポテンシャルが非対称であると，この左右へのトンネル確率が非対称となり熱浴との相互作用がある条件を満たせば流れを生じる [2, 3]。熱浴との相互作用の結果生じた新しい量子力学的効果ということができる。

- 1) S. Yukawa, M. Kikuchi, G. Tatara and H. Matsukawa, J. Phys. Soc. Jpn, 66, 2953 (1997).
- 2) G. Tatara, M. Kikuchi, S. Yukawa and H. Matsukawa, J. Phys. Soc. Jpn, 67, 1090 (1998).
- 3) S. Yukawa, G. Tatara, M. Kikuchi and H. Matsukawa, Physica B284-288, 1896 (2000).

学際物理学講座 交久瀬グループ

研究領域
研究課題

質量分析学

- 1 新奇マイクロクラスターの創生及びその物性研究
- 2 月、惑星、彗星探査用質量分析計の開発と「その場観察」
- 3 質量分析法による環境ホルモン分析

構成メンバー



交久瀬五雄（教授）石原盛男（助教授）伊藤啓行（助手）豊田岐聡（助手）

A 研究活動の概要

質量分析法は物理学、宇宙科学、環境科学など多くの分野において利用されている。我々は特徴のある質量分析計を独自に開発し、それらを用いて新しい研究分野の開拓を目指している。現在 3 つの分野で研究を行っている。①大型質量分析計を用いた新奇原子クラスターの創生、それらの電子状態、解裂パターン、寿命などの物性研究。②月、惑星、彗星等のサンプルを直接その場観測し有機物の存否、同位体存在度等を求め宇宙科学の知見を広めるための、ロケット搭載用小型軽量質量分析計の開発。③位置検出器を装着した高感度質量分析計を開発し内分泌かく乱物質（環境ホルモン）を測定し、環境科学への応用等である。

1. 新しい原子クラスターの創生及びその物性

10keV 程度の Xe イオンで物質を衝撃すると、色々なサイズのマイクロクラスターが生成する。この方法によって生成したクラスターは内部エネルギーが大きく質量分析計内を飛行中に分裂するものがある。分裂パターンや寿命からクラスターの安定性、電子状態、内部エネルギー等を求めることができる。どのクラスターも寿命 (λ) が同じであると $e^{-\lambda t}$ で減少

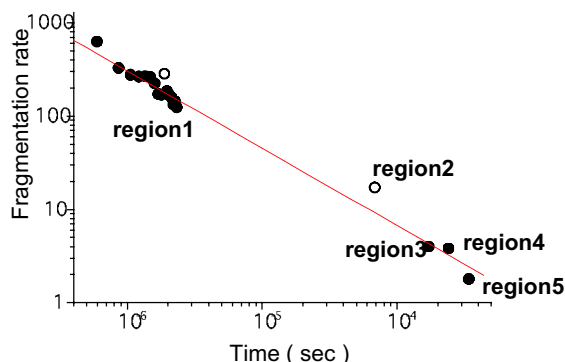


図1 分裂経路： $\text{Hg}_{13}\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Hg}_{12}\text{Ag}^+ + \text{Hg}$ における分裂割合の時間依存性

するはずであるが、例えば、 $(\text{Hg})_{13}\text{Ag}^+$ の分裂割合は図1に示すように両対数表示で直線になっている。これはクラスター種が同じでも色々な寿命(エネルギーレベル)のものが混在している事を示している。

2. 高性能小型軽量質量分析計の開発と宇宙科学への応用

ロケットに搭載し月、惑星、彗星等に質量分析計を送り込みその場観察する事は地球物質の汚染がなく信頼のおけるデータが得られる。彗星は汚れた雪だるまのようなもので生命のもとになった有機物質が存在しているのではないかと考えられている。有機物を同定するには 3000 以上の分解能を有する質量分析計が必要である。一方、ロケット搭載のために、重さ (1kg 以下)、大きさ (30x30x8cm) には厳しい制限がある。これらの諸要求を満足する質量分析計として、イオンが同じ軌道を何回も周回する多重周回型飛行時間型質量分析計(TOF)を制作した(図2)。

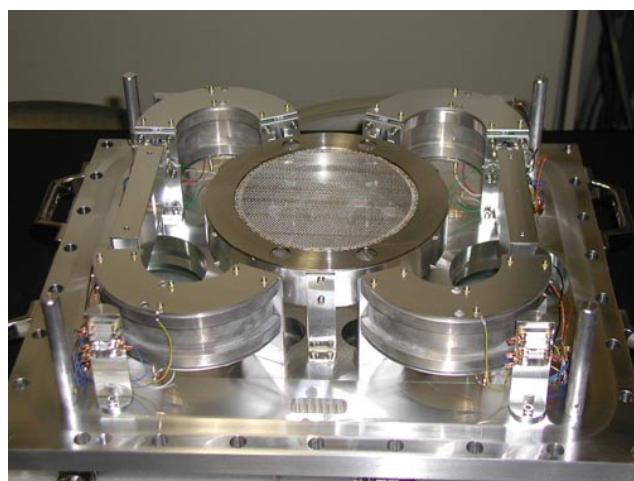


図2 多重周回型飛行時間型質量分析計 2号機 (1号機の写真はトピックスにあります)

イオンが出発点に戻って来た時、位置、方向が周回前と全く同じになる様なイオン光学系を採用すると、

何回でも周回可能で、分解能は周回数に比例して良くなる。図3に100.5回から500.5回周回させたときのCO-N₂のスペクトルを示す。分解能は35万である。このTOF装置にイオントラップを装着すると反応断面積の小さな反応も測定する事ができ、宇宙空間での分子反応が研究できる。現在改良型の調整中である。

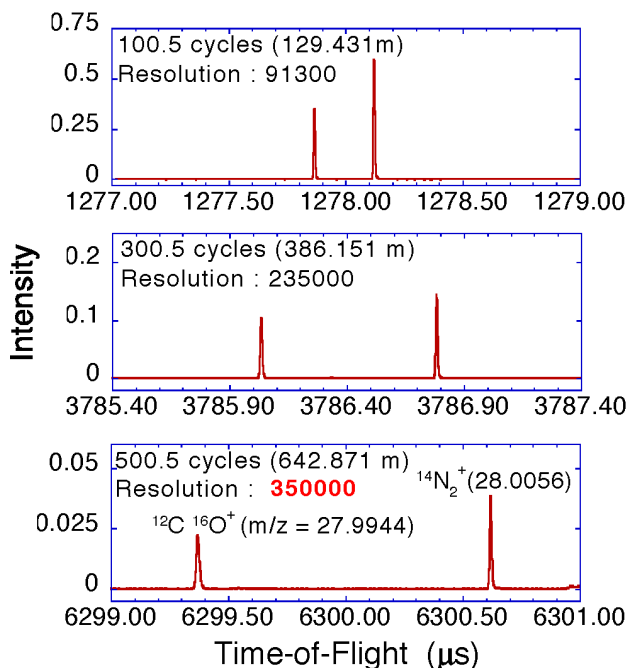


図3 100.5、300.5、500.5回周回させたときのCO-N₂のスペクトルと分解能

3. 内分泌かく乱物質（環境ホルモン）測定用ガスクロマト質量分析計の製作。

旧厚生省が定めた内分泌かく乱物質は67種類であるが、内分泌かく乱が疑われている物質はもっと多い。これらの環境ホルモンが何処にどれだけ存在するかを測定するための高感度ガスクロマト質量分析計を設計製作中である。高感度にするために位置検出器を装着した。位置検出器はMCP（マイクロチャンネルプレート）+蛍光版+CCDカメラである。検出器の所で質量分散が得られるようにイオン光学にズームシステムを採用した。

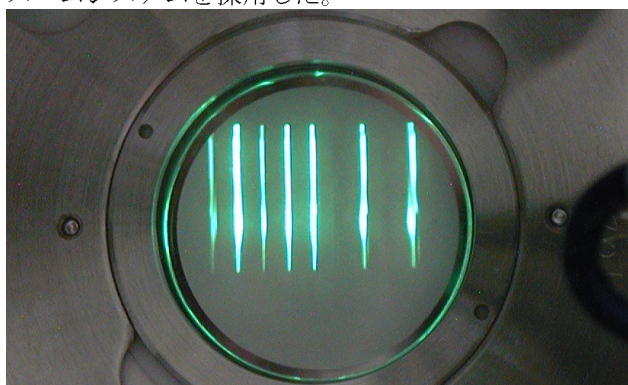


図4 予備実験でXeイオンを位置検出器を用いて観測した時のスペクトル

B 研究グループのリソース紹介

1. 受賞

- 質量分析学会賞 平成12年(質量分析学会) 交久瀬五雄
- 関東地区発明表彰奨励賞 平成5年(社団法人発明協会) 石原盛男
- 質量分析奨励賞 平成6年(質量分析学会) 石原盛男
- ポスター賞 平成6年(質量分析学会) 豊田岐聡、木村正廣、松尾武清
- " 平成7年 豊田岐聡、木村正廣、松尾武清
- " 平成8年 栄欧樹、交久瀬五雄、市原敏雄、伊藤啓行、櫻井達、松尾武清
- " 平成12年 佐藤貴弥、伊藤啓行、市原敏雄、交久瀬五雄

2. 特許28件

3. 特色のある実験装置

- 磁場偏向型大型2重収束質量分析計2台 (磁場半径120cm、50cm)(イオン光学自前)
- 多重周回型飛行時間型質量分析計2台 (原型と改良型)(イオン光学自前)
- クローバー型飛行時間質量分析計(自作)
- イオン光学計算ソフト: TRIO-DRAW

4. 過去の研究成果

「蛋白質のポイントミュレーション検出」

肝臓のドミノ移植で有名な家族性アミロイドニューロパチーを引き起こす異常トランスサイレチンを検出し、発症前診断法を確立した。その他、異常ヘモグロビン検出多数。

Y.Wada et al. Biochem. Biophys. Acta, 873, 316-319 (1986)

「金属クラスターの殻構造とフィッション様分裂」

金、銀、銅クラスターの安定性は自由電子が井戸型ポテンシャル中に束縛されているとするとうまく説明できる事を実験的に証明。これは原子核の殻構造と同等で原子核の核分裂に相当する分裂を銀の2価クラスターで発見した。

I. Katakuse et al. Int. J. Mass Spectrom. and Ion Processes, 74, 33-41 (1986)

I. Katakuse et al. Int. J. Mass Spectrom. Ion Processes, 97, 47-54 (1990)

「水銀クラスターのスーパーシェルの発見」

上記電子の殻構造より1階層上のスーパーシェルを水銀クラスターに発見。

H. Ito et al. Phys. Rev. B, 48, 4741-4745 (1993)

*研究グループのホームページアドレス

<http://matsuo.phys.wani.osaka-u.ac.jp>

学際物理学講座 木下グループ

研究領域
研究課題

複雑系物理学ならびにレーザー分光学

1. 新しいレーザー技術とレーザー分光法の開発
2. レーザー分光法を用いた不規則系の光物性の研究
3. 非平衡系における秩序形成過程の解明
4. ランダム媒質中の電磁波状態とそれによって生じる光機能の研究

構成メンバー



木下修一（教授）



渡辺純二（助教授）



栗田厚（助手）



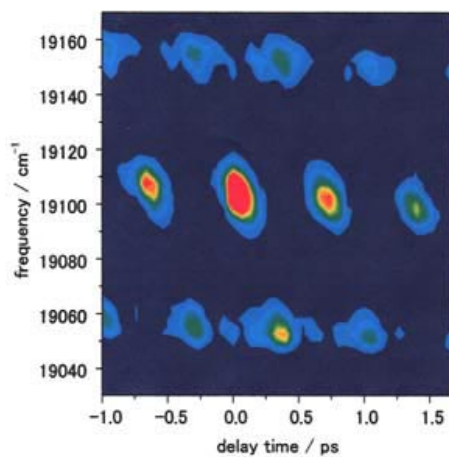
吉岡伸也（助手）

A 研究活動の概要

各種分光学に適するレーザーや分光法の開発と、それらによる種々の現象や物質に関する光物理学の研究を行っている。特に非晶質・生体物質などの不規則系や非平衡開放系における秩序形成過程の解明など、複雑系を扱う新しい学問の構築に挑戦している。

1. 新しいレーザー技術とレーザー分光法の開発

極限的に短い光パルスを発生する各種のレーザーを開発し、また、フーリエ変換波形整形法を用い、光の振動数、位相、偏光を自由にコントロールする光技術の開発を行っている。また、これらのレーザーを用いた超短時間領域での物質のダイナミクスの測定法や各種非線形分光などの新しい分光法の開発を行っている。最近の成果は7.7フェムト秒の時間幅をもつチタンサファイアレーザーを製作したこと、および、チタンサファイア再生増幅器を用いて、周波数領域での4光波混合の実験から物質のダイナミクスとパルスの時間一位相情報が測定できる新しい



マルチパルスに対する周波数領域 4 光混合スペクトル

分光法を開発したことである。

有吉哲夫ほか、分光研究 **46**, 196 (1997).

H. Kitano et al., Opt. Commun. **157**, 128 (1998).

Y. Watanabe et al., Rev. Sci. Instrum. **72**, 3772 (2001).

2. レーザー分光法を用いた不規則系の光物性研究

通常の光散乱法に加え、フェムト秒光カー効果分光法やホールバーニング分光法といった非線形分光法を用い、固体・液体・タンパク質などの不規則系のダイナミクスや相転移に伴うソフトモードの研究を行っている。特に、相転移やガラス転移における協同的な揺らぎの発現機構やマイクロな運動とマクロなダイナミクスがどのように結びついているかを研究している。最近特に注目される結果としては、液体分子の配向揺らぎに伴うモードが光散乱スペクトルの原点付近にローレンツ型の準弾性散乱スペクトルとして観察されるが、そのスペクトルのストークス・反ストークス成分の強度比から、このモードに対する光散乱過程が揺動散逸定理を満足しないことを明らかにした実験がある。

S. Kinoshita et al., Chem. Phys. Lett. **301**, 183 (1999).

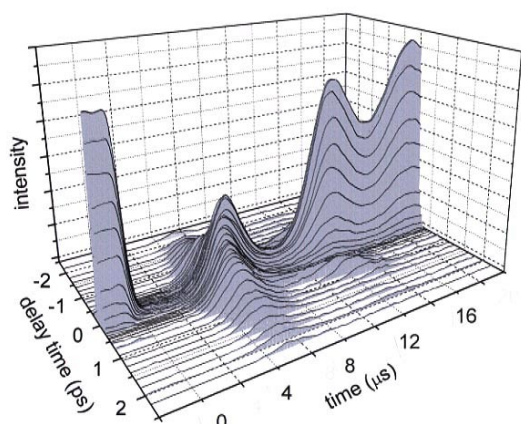
J. Watanabe et al., Chem. Phys. Lett. **333**, 113 (2001).

3. 非平衡系における秩序形成過程の解明

自然界におけるさまざまな秩序形成過程の機構をレーザー分光の手法を利用しながら解明している。実際に扱っている系はモード同期レーザーのパルス形成過程、融液からの結晶成長過程、振動反応系、強弾性ドメインやコレステリック液晶相の形成過程などである。最近の成果としては、フェムト秒レーザーの共振器内に損失変調器をいれ、一時的な損失を与えた後にパルスの立ち上がりを観測した実験がある。その結果、損失を大きくすると、コヒーレントなパルスが一旦インコヒーレントになって広がり、その後ダブルパルスになり、やがて定常的なパルスに発展していく様子が見られた。この最初の広がり

が非平衡系特有の不安定化現象に相当していると考えられている。

S. Kinoshita et al, Jpn. J. Appl. Phys. 40, 6430 (2001).

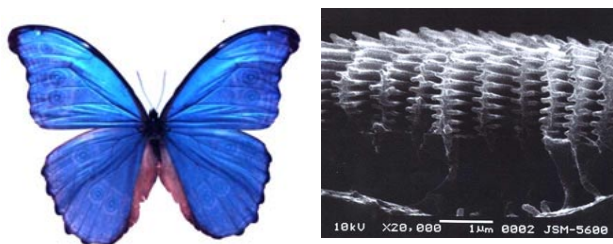


フェムト秒チタンサファイアレーザーのパルス形過程におけるパルスの自己相関関数の時間経過。

4. ランダム媒質中の電磁波状態とそれによって生じる光機能の研究

波長と同程度のスケールの微小構造を持つ媒質中での光は、マクロな媒質中では見られないさまざまな興味深い振舞いを示す。構造が周期的な場合は、フォトニック結晶として最近研究が進んでいるが、構造がランダムな場合については、まだ十分に解明されていない。ランダム媒質中では、光は多重散乱され、散乱が強い場合は光の Anderson 局在が起こると考えられている。我々は、ランダム媒質に特有の効果として、これに光反応材料を混ぜ込むと、入射光の波長・波面・偏光を記憶する機能が付加されるという、メモリー効果を発見した。これは、ランダム媒質中の電磁場を、強度相関関数という形で直接測定する手段を与えることを明らかにし、その基礎的特性の研究を進めてきた。また、このメモリー効果は高密度の光情報記録にも利用できると考え、応用を念頭に置いた研究も進めている。

以上は最近、私たちの研究グループが進めてきた研究内容をまとめたものである。このほか、生体内の秩序形成過程の産物である構造色についても精力的に研究している。特に、モルフォチョウの青い翅、



Morpho didius とその鱗粉の電子顕微鏡写真

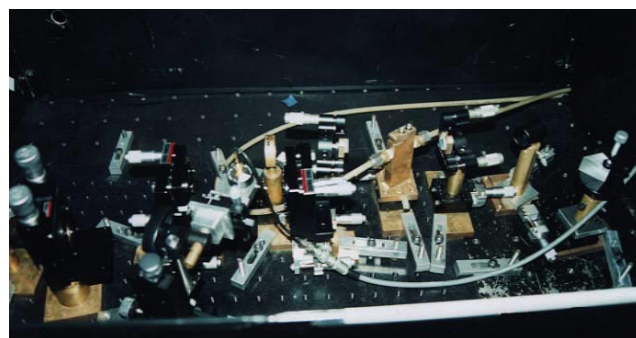
オオゴマダラの金色の蛹、クジャクの羽などの構造色の仕組みを電子顕微鏡、光学測定、計算機シミュ

レーションなどで調べている。我々は自然界の構造色が光の干渉に関連した波長以下の規則構造と回折に關与する不規則構造のバランスによって成り立っていることを明らかにした。また、2000年と2001年に国内の構造色の研究者を集めて「構造色シンポジウム」を組織し活動している。構造色に関してはこれまでに、テレビ、読売新聞、日刊工業新聞等に取り上げられている。

B 研究グループのリソース紹介

1. 特色のある実験装置

- 7.7fs チタンサファイアレーザー (自作)
- サンダーコック型ファブリーペロー干渉分光計
- チタンサファイア再生増幅器



7.7fs チタンサファイアレーザー (自作)

2. 過去の研究成果

「光散乱と発光の過程はともに光を吸収して放出する2次の光学過程であるが、その原理的な違いを励起波長依存性の実験から明らかにした。前者が光吸収と放出が一つながりの量子過程であるのに対し、発光は2ステップ過程として解釈できる。」

J. Watanabe et al., J. Chem. Phys. 87, 4471 (1987).

T. Kushida et al., Phys. Rev. A41, 6042 (1990).

S. Kinoshita et al., Phys. Rev. A42, 2751 (1990).

「吸収や発光スペクトルのスペクトル形状と励起状態ダイナミクスとの関係を実験的、理論的に解明した。」

S. Kinoshita et al., J. Chem. Phys. 89, 6612 (1988).

S. Kinoshita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 56, 4162 (1987).

「時間応答とスペクトルとは揺動散逸定理で結びついているが、これを光カー効果と光散乱分光法を用いて、ニトロベンゼンを試料として実験的に確かめた。」

S. Kinoshita et al., Phys. Rev. Lett. 75, 148 (1995).

* 研究グループのホームページアドレス

<http://mph.phys.osaka-u.ac.jp>

学際物理学講座 ナノ構造物性（野末）グループ

研究領域
研究課題

ナノ構造物質の物性の実験的研究

1. 配列したナノクラスターの電子物性
2. 半導体界面の2次元電子系および極微細加工によるナノ構造物質の電子物性
3. 複雑ネットワーク物質のナノ構造と物性

構成メンバー



野末泰夫（教授）



鷹岡貞夫（助教授）



音 賢一（助手）



王 勇（助手）

A 研究活動の概要

種々のナノ構造物質を作製し、主にその電子系の性質を光、磁性、伝導、磁気共鳴、 μ SRなどの様々な測定法により研究している。

1. 配列したアルカリ金属ナノクラスターの創製と強相関電子物性

この研究は、ナノサイエンスの物理学のひとつでもあり、また、学際分野にも含まれる新しい領域の開拓を目指すものである。図1に示したように、多孔質結晶のアルミノケイ酸塩ゼオライトのLTAでは、配列したナノ空間を利用すると、種々のナノクラスターを配列させることができる。

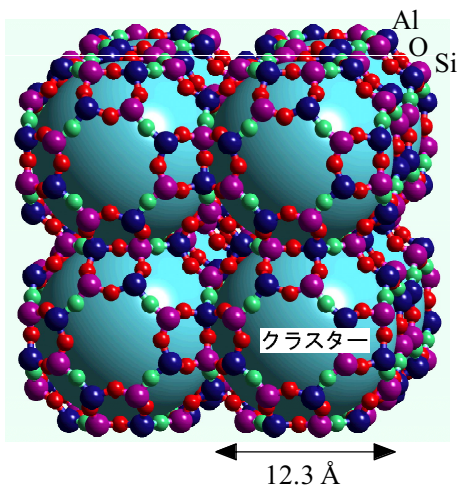


図1 ゼオライト LTA 中の単純立方構造で配列したスーパーケージ（内径 11 Å）に安定化されたクラスターの模式図。

外部からアルカリ金属を細孔内に吸蔵させると、クラスターが安定化され、その量子準位をアルカリ金属の s 電子が占有して局在電子状態を形成する。これらのクラスターが互いに隣接すると、その間の

相互作用によって強相関電子系が実現し、強磁性や金属絶縁体転移などの、通常の s 電子系からは想像できない新奇な性質が現れる。図2に、ゼオライト LTA に様々な濃度でカリウム金属を吸蔵させた時の低磁場低温での磁化を示した。クラスター当たりの吸蔵原子数（= s 電子数）が2個を越えると突然自発磁化が観測される。

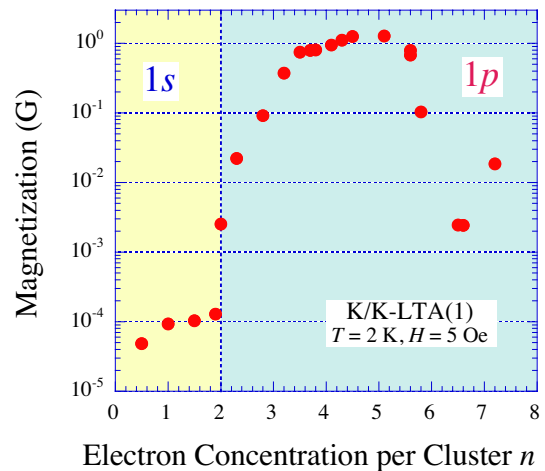


図2 ゼオライト LTA 中の単純立方構造で配列したカリウムクラスターの低温低磁場における磁化の s 電子数依存性。

ゼオライトは種類も沢山あり、細孔がダイヤモンド構造で配列しているものや一次元チャンネルの空いているものがある。その中に様々な物質を詰め込むことができる。これらの研究を更に発展させるために、アルカリ金属を始めとする種々の金属クラスターや、種々の半導体クラスターを様々なゼオライト結晶のナノ空間に作製し、新奇で良質な配列ナノクラスター試料の作製を行う。さらに、その磁性、光物性、磁気共鳴、 μ SR、比熱、伝導などの多面的物性測定を行う。

- Y. Nozue, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68**, 3789 (1992)
 Y. Nozue, *et al.*, Phys. Rev. **B48**, 12253 (1993)
 T. Nakano, *et al.*, Eur. Phys. J. **9**, 505 (1999)
 T. Nakano, *et al.*, Physica B **281&282**, 688 (2000)
 Y. Ikemoto, *et al.*, J. Mag. Mag. Mat. **226-230**, 229 (2001)

2. ナノ構造閉じ込め電子系の量子伝導

半導体結晶成長と極微細加工技術を用いることで、半導体中に2次元電子系や1次元量子細線などが作製できるようになり、その結果、ナノスケールのサイズに電子を閉じ込めた系が作製されるようになった。これらの低次元電子系の伝導には、量子ホール効果や電気伝導度の量子化などに代表されるマクロなスケールでも見られる量子現象が現れる。さらに、低温・強磁場の極限条件下では電子の多体効果により分数量子ホール効果が生じるなど多彩な量子伝導現象が観測される。我々は電子ビームリソグラフィやAFMリソグラフィ(図3)などの半導体微細加工を駆使して低次元電子系を作製し、極低温・強磁場および微小電圧・電流での電気伝導計測や遠赤外磁気分光を手段として利用して、これらのナノ構造閉じ込め電子系の量子伝導の詳細を明らかにしている。さらに、閉じ込め電子系における新しい現象を探索

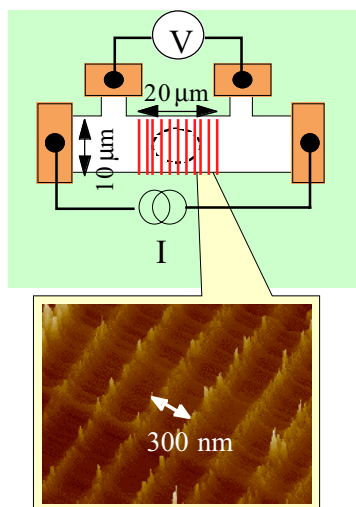


図3 GaAs/AlGaAs 2次元電子系試料の表面をAFM局所陽極酸化法で酸化して作製した1次元周期ポテンシャル系の電気伝導測定法。1次元周期ポテンシャルの間隔は300 nmである。

3. 量子ホール効果とエッジ状態

半導体の試料端付近の空乏層と呼ばれる部分では電子は試料端でのポテンシャルを感じて閉じ込められている。この閉じ込めポテンシャルにより束縛されつつ伝導を担う極微細線などのように、低次元電

子系では電気伝導にポテンシャルの空間分布が大きく影響する。我々は半導体2次元電子系の量子ホール効果におけるエッジ状態の非局所伝導現象と磁気キャパシタンスの研究から、試料端での電子の閉じ込めポテンシャルの広がりを調べられることを見出した(図4)。今後、量子ホール効果を試料端ポテンシャル研究のツールとして活用し、様々な半導体ナノ構造での閉じ込め電子系が感じるポテンシャルを調べ、電気伝導との関連を明らかにしたい。

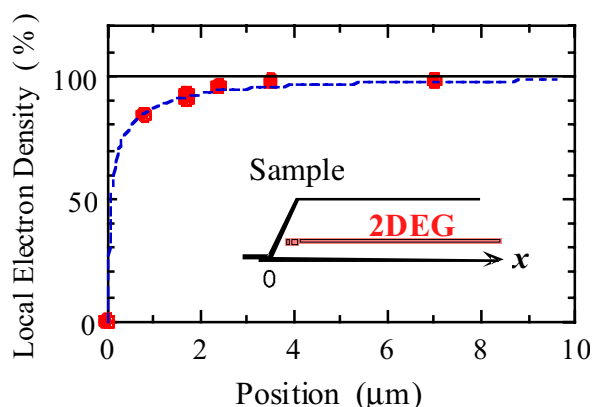


図4 量子ホール効果のエッジ状態の広がりの測定から求めた2次元電子系の端での局所電子濃度。

- K. Oto, *et al.*, Physica B, **298** (2001) 18.
 K. Oto, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **34**, (1995) 4332.

B 研究グループのリソース紹介

1. 受賞

- 野末泰夫 第8回日本IBM科学賞(物理分野)
「アルカリ金属クラスターの強磁性の発見とナノ構造物質の開拓」1994年
- 音賢一 井上研究奨励賞(井上科学振興財団)「エッジ状態による2次元電子系の非局所量子伝導」1994年度

2. 特色のある実験装置

- 物理特性測定装置
- 磁気特性測定装置
- 電子スピン共鳴装置
- 電子ビーム露光TFE-SEM
- グローブボックス
- スプリット超伝導電磁石/遠赤外フーリエ分光装置
- 超伝導電磁石/トッロード希釈冷凍機
- 紫外可視赤外分光装置
- ラマン散乱測定装置

*研究グループのホームページアドレス
<http://www-nano.phys.wani.osaka-u.ac.jp>

基礎原子核物理グループ（原子核実験施設）

- 研究領域 素粒子・原子核実験（クォーク核物理、原子核構造学）
- 研究課題 1. レーザー電子光、陽子ビーム等を用いたクォーク核物理の実験的研究。
2. 核子間力の荷電対称性を基礎に、核構造に内在する荷電スピン対称性の実験的解明。
3. 先端的放射線計測システムの開発。
- 構成メンバー



能町正治（教授）



藤田佳孝（助教授）



菅谷頼仁（助手）

A 研究活動の概要

物質の根源の世界である原子核の成り立ちをより深いレベルから解明する。原子核の構成粒子である核子はクォーク・グルーオンからなる複合粒子であるが、低いエネルギーではその姿を直接あらわすことはない。そのため、これまでは原子核を核子と中間子の系として扱うことにより大きな成功をおさめることができた。しかし、原子核に内在する対称性はクォーク・グルーオンの系の対称性に起因する。われわれは、複雑な量子系である原子核をさまざまな側面から実験的に研究することにより、原子核物理の基礎となる核子の構造や核力の性質を、より深いレベルから統一的に解明することをめざす。

1. レーザー電子光を用いたクォーク核物理の実験的研究

レーザー電子光によるクォーク核物理を核物理研究センターなどとの協力で行なっている。兵庫県の大型放射光施設（SPring-8）の8 GeV 電子リングに紫外レーザーを打ち込む。電子ビームに跳ね返された光子は最大 2.4 GeV のエネルギーを持つ（レーザー電子光）。このレーザー電子光の波長は核子の大きさに比べ短く、核子や原子核の構造を研究に威力を発揮する。1999年にレーザー電子光の最初の生成以来、 Φ 中間子の光生成などの実験を行なっている。

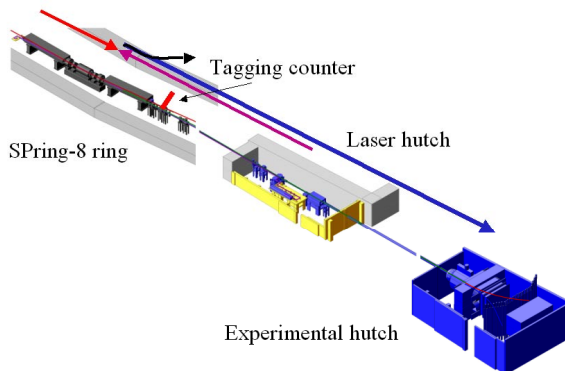


図1 レーザー電子光実験施設

- T. Nakano *et al.*, Nucl. Phys. A684, 71 (2001)
T. Nakano *et al.*, Nucl. Phys. A670, 332 (2000).

2. 陽子ビーム等を用いたクォーク核物理の実験的研究

核物理研究センターのリングサイクロトロンからの陽子ビームを用い、パイ中間子生成エネルギー領域における核子・核子の非弾性散乱の研究を行っている。このエネルギー領域での核子間力は π や Δ などの核子以外の自由度による寄与が大きい。我々は、これらの自由度が核力へ及ぼす寄与を測定した。

- K. Yasuda *et al.*, Phys. Rev. Lett. 82, 4775 (1999)
M. Nomachi *et al.*, Nucl. Phys. A629, 213c (1998)
K. Yasuda *et al.*, Nucl. Phys. A684, 400 (2001)
Y. Maeda *et al.*, SPIN2000, 669 (2001)

3. 量子マイクロ構造体としての原子核「荷電スピン対称性」と「相互作用」研究

陽子と中性子はほぼ質量も等しく、核子が、電荷を帯びているか否かという事で区別され、本質において同じ粒子と考えられている。つまり「原子核は、陽子と中性子の総数（質量数）が同じであれば、同じ構造を示す」との仮定「荷電スピン対称性」が成り立つ。これら原子核のユニークさを生かし、「強、弱、電磁」それぞれの力に基づく「相互作用」と「荷電スピン対称性」を結びつけた研究を進めている。

この「荷電スピン対称構造」を調べるため、質量数が同じで、陽子、中性子数が互いに異なる原子核の励起状態の精密比較が必要となる。そのため、強い力の作用の下で陽子と中性子を入れ替える荷電交換反応と、励起のみを起こす非弾性散乱実験を高分解能で行った。結果の比較から「荷電スピン対称構造」を高励起状態まで見だし、かつ励起量子状態の荷電スピン値を同定した。荷電スピン値同定は、宇宙物理や、核子励起 \otimes との関連においても重要である。

Y. Fujita *et al.*, Nuclear Phys. **A687**, 311c (2001)
 H. Fujita *et al.*, SPIN2000, 614 (2001)
 Y. Fujita *et al.*, Phys. Review **C59**, 90 (1999)
 Y. Fujita *et al.*, Phys. Lett. **B365**, 29 (1996)

逆に「荷電スピン対称構造」を仮定すると「強、弱、電磁」それぞれの力に基づく「核内相互作用」が、類似的、または異なった核内の状態変化を引き起こす様子を理解出来る。弱い力によるβ崩壊、電磁力によるα崩壊の結果を、強い力の作用の下で起こる原子核反応の結果を比較し、軌道作用子、中間子交換流の核内における働きを直接検証している。

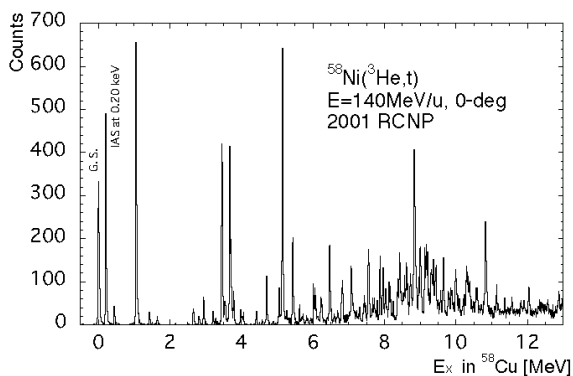


図 2 世界最高エネルギー分解能の荷電交換反応による原子核内励起状態の探索。微細構造の発見が荷電スピン対称構造研究を可能にした。

Y. Fujita *et al.*, Nuclear Phys. **A690**, 243 (2001)
 Y. Fujita *et al.*, Phys. Review **C62**, 044314 (2000)
 H. Ueno *et al.*, Phys. Lett. **B465**, 67 (1999)
 Y. Fujita *et al.*, Phys. Review **C55**, 1137 (1997)

上記研究は国際協力の成果である。荷電交換反応実験を大阪で行い、弱い力によるβ崩壊をスイス CERN とドイツ GSI で、電磁力による研究をドイツダルムシュタット工科大学で行っている。またインディアナ大学での陽子非弾性散乱の実験を踏まえ、南アフリカ NAC 研究所での実験を計画している。

4. 先端的放射線計測システムの開発

高いエネルギーや角度の分解能を達成する事により、実験精度が飛躍的に高めることができる。大阪大学核物理研究センターの大型磁気分析器で高分解能達成の為、新ビームライン (WS コース) を提案し建設した。WS コースにより分散整合、角度分散整合が達成され、荷電交換反応を使う実験に於いては、以前の同種の実験を一桁上回る世界最高のエネルギー分解能を達成している。

H. Fujita *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A469**, 55 (2001)
 Y. Fujita *et al.*, J. Mass Spectrom. Soc. Japan **48**, 306 (2000)
 Y. Fujita *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **B126**, 274 (1997)

SPring-8 のレーザー電子光を使った実験等のために開発した事象弁別のための高性能エレクトロニクスは、SPring-8 における実験にとどまらず、アメリカのブルックヘブン研究所での K 中間子の稀崩壊実験でも使っている。さらに気球・天文衛星のγ線検出システムや、SPring-8 での物質構造解析用の X 線検出システムにも応用されようとしている。これらの開発は宇宙科学研究所・スイス CERN・アメリカブルックヘブン研究所・高エネルギー加速器研究機構・SPring-8 等の研究機関や民間企業との共同研究によって行われている。

研究グループが開発したエレクトロニクスの例

- 汎用 I/O モジュール (バッファメモリ)
- 汎用論理回路モジュール
- FLASHADC モジュール
- BNL、K 稀崩壊実験のための Mean-timer モジュール
- BNL、K 稀崩壊実験のためのトリガーモジュール
- 気球実験のためのデータ読み出しモジュール

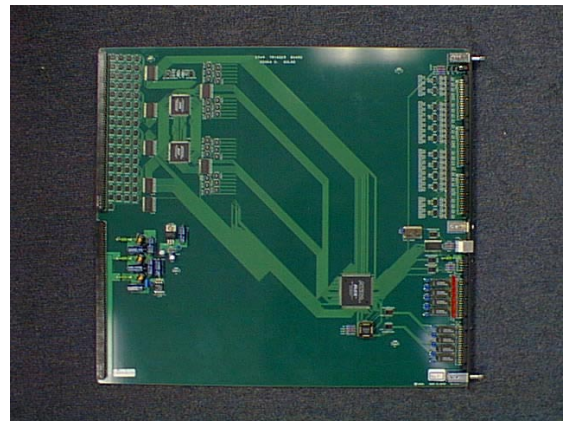


図 3 ブルックヘブン研究所で使用しているトリガーモジュール

Y. Sugaya *et al.*, IEEE Trans. Nucl. Sci. **48**, 1282 (2001)
 Y. Sugaya and M. Nomachi, Nucl. Inst. and Meth. **A437**, 68 (1999)

B 研究グループのリソース紹介

受賞

藤田佳孝 1998 SUNAMCO medal (ドイツ GSI での不安定核質量測定の研究に対して)

IEEE Real-time conference の International Advisory committee (能町)

研究グループとして獲得した研究費は、山田科学振興財団「ニュートリノ研究とマルチ光ファイバレーションレーターの研究」(平成 12-13 年)、がある。

*研究グループのホームページアドレス
<http://www.lns.sci.osaka-u.ac.jp/fn-physics/>

将来への展望

物性物理学 (実験)

私たちは、「強相関電子系」と「ナノサイエンス」という2つの大きな研究の流れに、学際領域の研究をとりいれて、さらなる奔流へと発展させていくことを計画している。これまでに、私たちは磁性と半導体研究の実績を築き上げ、現代の物性物理学実験の一つの源流を生み出したと自負している。この伝統を生かしつつ、一方で、新しい研究テーマへ果敢に挑戦しながら、この2大分野の研究を強力に推進したいと考えている。

物性物理学の実験における根幹は、分野に関わらず、1) 新しい物質群を自ら作り上げること、2) 構造解析および物性測定が他に比類なく高度であること、あるいは独自であること、と私たちは考えている。ここから、新しい発見が生み出され、そして他に波及しうる普遍性のある物理学の研究成果が得られると確信している。さらに、基礎的な物性物理学の研究成果も、他分野への応用あるいは社会への還元を今後は求められるであろう。このことも考慮する必要がある。以上の観点から、今後、5年間は以下の研究を構想する。

A 強相関電子系

近年の強相関電子系の発展はめざましく、周辺分野も含めて、今後もさらに大きく発展することが期待される。強相関電子系の研究の発展に関わっている分野は、磁性物理学の他に、半導体物理学、光物性物理学など多岐にわたる。私たちは、独自の手法による高品質単結晶や新物質群の作成と、高精度・高感度、極限条件下、および多面的な物性測定により、強相関電子系における新しい現象の発見と物理現象の解明を強力に推進してゆきたい。

<重い電子系>

CeCu₆における最も重い電子系の発見や超伝導状態でのドハース・ファンアルフェン (dHvA)

効果の最初の観測は、純良単結晶育成技術と超低温・強磁場での精密高感度測定によってもたらされた大きな成果である。この重い電子系となる希土類・ウラン化合物では、電子間のクーロン斥力によって引き起こされる強い電子相関が関係して、電気伝導と磁性および超伝導などに興味ある性質が観測されることが明らかになってきた。特に、重い電子系の超伝導では、従来のBCS理論によるs波超伝導ではなく、奇パリティ (p または f 波) の超伝導や d 波超伝導などの異方的な超伝導が現れることが明らかになり、注目されている。そこで、重い電子系の物理を詳しく調べ、新たな発展をめざすために以下の研究を強力に推進する。

- ・希土類およびアクチナイド化合物の純良単結晶の育成
- ・dHvA 効果, 電気抵抗, および比熱の超低温・強磁場における高精度・高感度測定と強磁場磁化測定

<配列ナノクラスター>

この研究は、ナノサイエンスの研究のひとつでもあり、学際分野にも含まれる新しい領域である。多孔質結晶であるゼオライトの配列したナノ空間を利用すると、種々のナノクラスターを配列させることができる。アルカリ金属クラスターを配列させた系では、クラスターの局在電子と隣接クラスター間の相互作用によって強相関電子系が実現する。その結果、強磁性や金属絶縁体転移などの、通常のs電子系からは想像できない新奇な性質が現れる。そこで、これらの研究を更に発展させるために以下の研究を行う。

- ・アルカリ金属などの種々の金属クラスターや、種々の半導体クラスターを様々なゼオライト結晶のナノ空間に作成し、新奇で良質な試料作成を行う。
- ・これらの配列ナノクラスターの磁性、光物性、磁気共鳴、 μ SR, 比熱, 伝導などの多面的物性測定を行う。

B ナノ・マイクロサイエンス

サブナノメートルからマイクロメートルにわたる微小領域についての実験と理論の発展によって、新しい物質相と新奇な現象の発見がもたらされ、これがナノサイエンスという活気ある研究分野を切り拓いた。半導体物理学、結晶学、磁性物理学、結晶成長、表面・界面、格子欠陥などの研究領域が重なり合う、巨大で、かつ競争的な一大研究分野となりつつある。微小な空間における構造物性、伝導物性、光物性、スピン物性が物性物理学研究の主要なターゲットとなるが、キーポイントの一つは、新物質相の探索と、微小領域における構造および物性解析法を独自に備えることである。

<ナノ凝集体の構造物性>

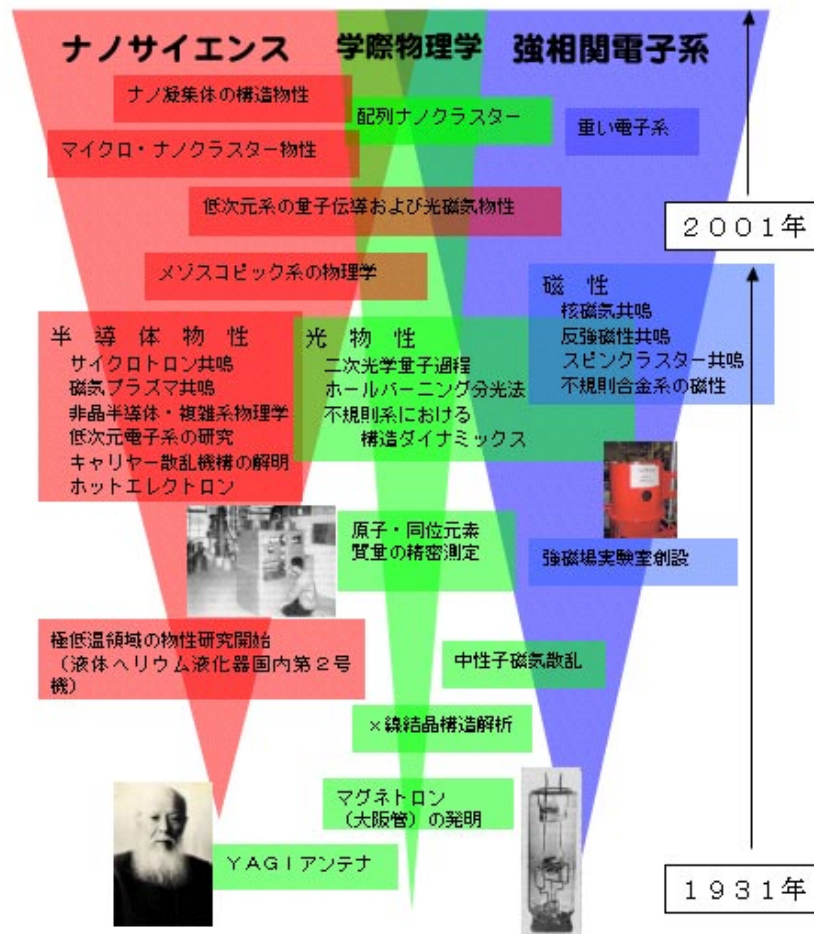
金属ナノ触媒を利用してシリコンの1次元結晶（ナノワイヤー、ナノチェーン）が成長することなどを発見している。これは、ナノメートルサイズの半導体物質の形態および内部構造を制

御できる結晶成長法の一つが見いだされたことを意味する。そこで、ナノ触媒と結晶との間の固液ナノ界面などを調べて、この1次元結晶の成長メカニズムを解明したい。次に、各種不純物のドーピングなどもおこない、この1次元結晶に閉じこめられた電子の量子閉じこめ効果、およびトンネリング効果による量子伝導などナノ物性を明らかにしていきたい。そこから新しいナノデバイスへの応用へ発展させたい。

一方で、ナノ領域の原子・電子系の現象を明らかにするためには新しい顕微手法の開発が必要となる。元素・原子分解能を有する電子顕微鏡による原子系ダイナミクス観察法を開発する。

<低次元系の量子伝導および光磁気物性>

半導体を舞台にして繰り上げられるメソスコピック現象を追求する。リソグラフィなどの微細加工技術を駆使して作り出したナノメートル・サイズの半導体ヘテロ界面における2次元電子系の特殊な伝導物性と量子光学特性を研究



物性物理学（実験）のこれまでの研究の流れと今後のストラテジー

する。まず、量子ホール状態におけるエッジ状態やバリスティック伝導とアンダーソン局在の相関について研究を進める。また、二次元電子系の電子状態については磁気光共鳴法によっても研究を進める。とくに、量子ドット・2層量子ドット系については、外部からの選択的な光励起の下におけるテラヘルツ光吸収を測定することで光誘起ポテンシャル変調に関する研究を行う。今後、微小系における物性解析手法を新たに開発していくとともに、以下の研究を強力に推進する。

- ・ 微細加工技術を駆使して、特殊な量子ドットや量子リングを作製し、電子の様々な量子閉じ込め状態の形成を試みる。
- ・ サイクロトロン共鳴および光検知サイクロトロン共鳴などの磁気光共鳴法を、微小領域で空間分解測定が可能なように発展させる。

<マイクロおよびナノクラスター物性>

質量分析により、マジック数をもつ金属イオンクラスターを見いだした。この実績をもとに、今後、真空中に孤立した分子イオンやナノクラスターイオンを作成し、その解離反応を質量分析から解明していく。イオン生成は、独自に開発したイオントラップ生成スペース制御法を利用する。また光吸収による元素系ナノクラスター、例えば(AgC)_nなどの融合・分裂のメカニズムの解明を行う。

質量分析は、最も基本的な物理量の測定技術であり、ナノサイエンスへの応用はもとより、広く学際的に利用していきたい。月・惑星探査に適した小型・高分解能質量分析計の開発、内分泌攪乱物質測定用ガスクロマトグラフィー質量分析装置の開発などを通じて、宇宙科学からバイオサイエンスまでの自然科学の広い分野に貢献していく。

物性物理学 (理論)

物性理論グループにおいては「計算機ナノマテリアルサイエンス」および「非平衡相転移現象の基礎と制御」を中期的な大枠として研究を進めていく。「計算機ナノマテリアルサイエンス」は物性理論グループにおいて従来なされてきた個々の物質の物性探求を推し進め、ナノスケールにおける新しい物理現象の発見を目指すものである。一方、「非平衡相転移現象の基礎と制御」は平衡から著しく離れた状態における協力現象とダイナミクスを、多体系を構成する個々の要素の量子統計性や量子揺らぎの役割と、その巨視的状态への発展について総合的に研究を進めていく。

A 計算機ナノマテリアルサイエンス

物性が発現するそれぞれの長さのスケールにおいて、物性を支配する普遍的な法則は驚くほど少ない。それにもかかわらず、物質の多様性・個別性は無限の広がりを示し、一つの物質を研究する手法にブレークスルーが生まれる都度、新たな研究と応用の領域が広がってきた。それゆえに、物性物理学では個々の物質の物性を理解していく研究、すなわち物質の個別性の探求が特に重要である。マテリアルサイエンスはこのような個別性の探求に関する最も先端的な研究を担う。一方、物性発現のスケールは古典的構造材料から、今やナノスケール以下の人工的物理構造に由来する性質にまで広がりを示す。そのような広いスケールにわたる物性の理解と制御は物性物理学の基本的な課題である。

「計算機ナノマテリアルサイエンス」は、ナノ構造に焦点を合わせ、その物性の個別性の起源を信頼性の高い理論に基づいた計算機実験とシミュレーションにより明らかにし、さらに新しい構造と素材をデザインするための基礎および応用研究を推進し、ナノ物質を設計していくことを目的としている。材料科学の果たすべき役割は今後もますますその重要性を増すと予想されているが、社会構造の大きな変遷を反映して、環境に大きな負荷をかける工業的手法に基づいた材料開発はもはや許されない時代となっている。また、ナノ構造に由来する高次機能を持つ新材料の創出が期待されているが、従来の経験

と試行錯誤，ないしは内挿・外挿による推論や類推にもとづく材料開発・研究はナノスケールにおいてはまったく無力である．これらの理由から，理論と計算機によるナノマテリアルサイエンスは今後ますますその重要性を増し，物性理論研究の一つの中心となっていくと考えられる．ナノマテリアルサイエンスの立場から以下の課題について研究を推進する．

< ナノ構造スピントロニクス材料のデザイン >

○希薄磁性半導体，強磁性金属・半導体ヘテロ構造等を用いたスピントロニクス材料の電子状態，構造安定性，磁性，輸送現象を第一原理計算に基づいて調べ，さらに新しいナノスピントロニクス材料と構造をデザインする．また，デザインのための方法を開発する．

○ナノスピントロニクスの本質であるナノ構造の，非平衡条件下における，電荷・スピンの注入と輸送の機構を解明し，有効なスピントロニクス系をデザインする．

○高度にドーピングされた半導体やアモルファスのような強い不規則性を持った系の輸送現象を単純なモデルと高度な計算機シミュレーションを用いて取り扱い，金属絶縁体転移などの現象を解明していく．

○第一原理電子状態計算による自由なマテリアルデザインを達成するための基礎的方法論の開発．

< ナノ有機材料のデザイン >

○現実の蛋白質を再現できる粗視化モデルの確立を目指して，粗視化モデルの折れたたみシミュレーションを行う．折れたたみややすさを進化の観点から理解し，進化を取り入れたナノ構造デザイン手法を研究する．

○ナノスケールからマクロスケールにわたる現象の階層性を正しく取り込んだ摩擦の基礎的機構を統一的に解明し摩擦のユニバーサルティークラスを分類し，新たな摩擦制御技術を創生する．

○ナノトライボロジーの計算機シミュレーションによる研究と潤滑の分子論的デザインを行う．

B 非平衡相転移現象の基礎と制御

最近，実験的に相次いで発見されている物質秩序形成の「発展過程（時空間ダイナミクス）」を

研究の主対象とする．たとえば，ポリジアセチレン結晶，2価鉄ピコリルアミン錯体，量子常誘電体，Mn 酸化物等で観測されている光誘起あるいは熱誘起相転移現象では，結晶構造秩序・電子構造秩序・スピン状態秩序・双極子状態秩序・軌道角運動量状態秩序の変化を伴う局所微視的な励起状態領域が，光励起あるいは熱励起などの外界からの局所的刺激によって生成され，電子相関・電子(スピン)-格子相互作用・双極子-双極子相関・電子-軌道相互作用等を通じた協力現象によって，それらが物質全体に広がった大域巨視的な領域に移り変わっていく過程（時空間ダイナミクス）が重要である．これらは非平衡相転移現象・非平衡物質秩序形成の典型例である．このような非平衡協力現象において，多体系を構成する個々の要素の量子統計性や量子揺らぎの役割を明快に考慮した理論的研究は，世界的にもまだ無い．上にも記したように，光誘起相転移や光誘起物質秩序形成過程では，「ミクロスコピック領域」の何らかの変化が，どのように，またどのような「マクロスコピック領域」につながるのかが基本的な課題であるため，そこでは「量子力学的世界」から「古典力学的世界」へのクロスオーバーや移り変わり過程の問題に関連せざるを得ない．より具体的には，

(1) 光誘起非平衡相転移や光誘起物質秩序形成過程に，物質の量子力学的性質がプラスに働くのかマイナスに働くのか，(2) 熱揺らぎ（古典揺らぎ）と量子揺らぎとが，どのように競合するのか協調しうるのか，(3) 物質秩序の光制御において，物質の量子性を有効利用する手段や方法にはどのようなものがあるかなどの問題が，基礎的観点から重要であるにもかかわらず未解明のままである．これらの諸問題は理論的な興味を惹くだけでなく，物質の量子性が関連していると思われる相転移関連の実験事実が最近実際に見いだされているため，現実問題としても重要である．たとえば，ストロンチウムチタン酸化物などの量子常誘電体において，古典的描像では理解できない光誘起協力現象が見つかっている．さらに，絶縁体の高密度光励起状態すなわち多励起子系あるいは高密度電子-正孔系において，非平衡状態での気体-液体相分離現象が観測され，ボゾン系-フェルミオン系クロスオーバー転移（励起子 Mott 転移）との関連が議論されている．このような現象では，従来の

準古典描像を越えて、純量子力学的理論を用いた考察が不可欠である。その際、(a)物質中の短距離秩序形成における量子力学的効果、(b)局所的微視的秩序が大局的巨視的秩序に時間的・空間的に発展していく際の、量子-古典クロスオーバー、(c)光励起状態における物質秩序形成の際の、励起状態準粒子の量子統計性（ボゾン、フェルミオン）の効果に特に着目したい。

光誘起非平衡相転移や非平衡下での光誘起秩序形成における物質の量子力学的効果を、多角度から明らかにし、古典的理解を越えた詳細な理解と秩序制御における量子揺らぎの有効利用法の提案につながると期待する。課題は以下の通りである。

＜量子常誘電体の非平衡量子相転移と光誘起協力現象＞

- 量子常誘電体における光誘起非平衡物質秩序形成の現象論的理論の構築
- 量子常誘電体における光誘起非平衡物質秩序形成の微視的量子論の構築
- 量子常誘電体における光誘起秩序形成過程の時空間量子ダイナミクスの理解
- 量子力学的記憶効果（局所熱平衡仮定の破綻）を伴う系の光誘起ドミノ倒し理論の構築

＜絶縁体の高密度光励起状態すなわち多励起子系あるいは高密度電子-正孔系における、非平衡気体-液体相分離現象とボゾン-フェルミオンクロスオーバー転移（励起子 Mott 転移）＞

- 高密度励起子系などのボゾン-フェルミオン共存系の表現論の研究
- 平衡下のボゾン-フェルミオン共存多粒子系での相分離理論の構築
- 非平衡下のボゾン-フェルミオン共存多粒子系での相分離理論の構築
- 非平衡多励起子系での Mott 転移の臨界現象の理論

素粒子理論

電子と電磁法則が織りなすナノスケールの豊饒世界から、さらに10万分の一(10^{-15} m)のマイクロ世界に踏み込むと、陽子・中性子などのハドロンとクォークが重なり合う強い相互作用の世界が広がっている。さらに1000分の一の尺度(10^{-18} m)に進むと弱い相互作用の世界が見えてくる。これより先のマイクロ世界では、既知のすべての素粒子は質量を失い、弱電対称性の回復した世界となる。ここまでが人類が加速器を使って経験した範囲である。それでも、重力の量子論が予言する世界の自然な大きさ、プランク長(10^{-35} m)に較べると格段に大きなマクロ世界である。この途方もなくスケールの違った世界が共存できるのは、超対称性のお陰かもしれないとの説もあるが、実験的証拠は見つかっていない。電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用は大きさ 10^{-33} m 程度の世界で統一され、我々是一个の法則のいろいろな側面を見ているだけと考えられる。プランク長の世界では、素粒子は点ではなく糸のように広がった弦として見え、超弦理論が超マイクロ世界を支配するとも考えられる。だが、こうした究極の世界に踏み込む前にも、様々な鍵となる未解決の現象が目の前、極微の素粒子から宇宙の果てに立ちほだかっている。我々の将来研究は

素粒子と宇宙の現象

場の理論、重力理論、超対称理論

超弦理論

が中心となる。

＜素粒子と宇宙の現象＞

自然現象こそ素粒子論の原点である。クォークやレプトンの世界には未解決の問題が多い。ニュートリノの質量とその混合、クォーク間の混合、CP対称性の破れ、レプトン数、バリオン数の破れ、そしていまだに見つかっていないヒッグス粒子、これらは確実に我々の手の中にあり、10年ほどのうちに大きな理解が得られるであろう。また、もう少し極微、高エネルギーの世界へいけば、以下に述べるような超対称性のかたわれが見えだすかもしれない。更に、暗黒物質からガンマ線バーストにいたる宇宙の観測現象は、一体、既存の理論で説明できることなのかどうか、素粒子理論の変更をも要求して

いるのかどうかなど、よくわからないことが多い。我々は、実験・観測現象の解析から、理論的予測、実験・観測の提案までを実行する。

<場の理論、重力理論、超対称理論>

現在の素粒子理論はゲージ理論で、重力はアインシュタインの理論で記述される。いずれも場の理論である。これらは、更に、超対称理論、超重力理論、統一理論へと発展される。特に、ある種の超対称ゲージ理論では、厳密解も得られ、相互作用が強い場合にも量子論的な振舞がわかる。

超対称性が何らかの形で自然界に実現されているかどうかを知ることは、大きな課題である。素粒子の質量や対称性などの基本的問題を場の量子論によって理解すること、ゲージ理論と重力理論を統一することも重要である。そのため、超対称性の破れのメカニズムを探索しその帰結をみたり、2次元上の超対称非線形シグマ模型の研究を押し進め、超弦理論との関連も明らかにする。ブラックホールや重力波など強い重力場の関与する現象についても調べ、ゲージ理論と重力理論の絡み合いを重力的ソリトン、宇宙論への帰結、宇宙解をとおして探索する。

<超弦理論>

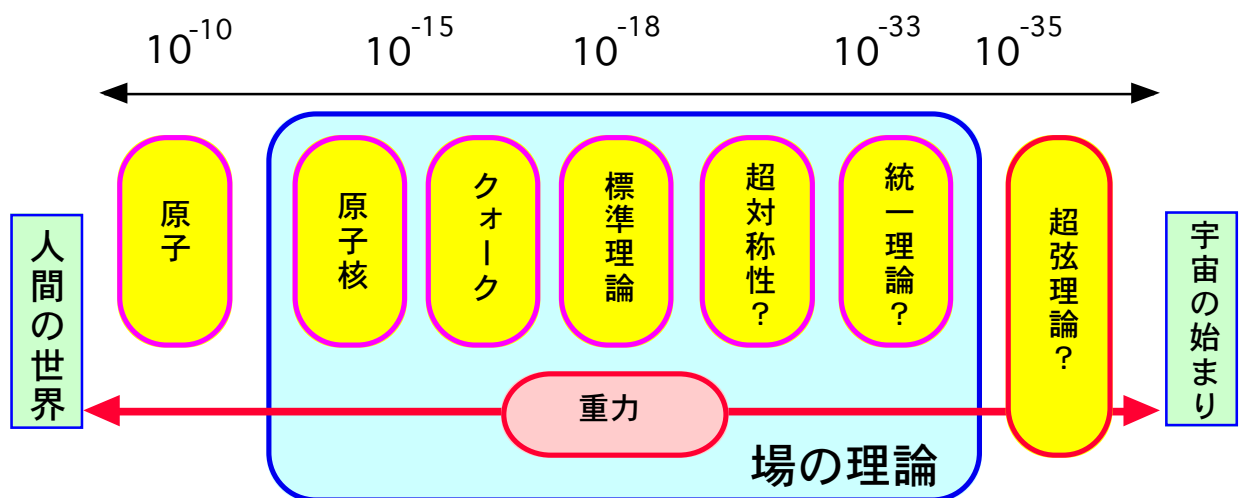
重力を含む統一理論の候補である超弦理論は10次元時空で定義される。1次元的に広がった弦が時間とともに10次元時空を運動してゆ

く様子は、弦が時空に描く2次元面を中心考えると、2次元面の各点に10個の座標が乗っている2次元場の理論と考えることができる。10次元時空が曲がっていれば、2次元の非線形場の理論になる。

我々が観測できるのは4次元時空であるから、6次元部分は我々の目に入らないほど小さく丸まっているか、我々が10次元時空の4次元部分空間に閉じこめられていて外に出られないのかどちらかである。超弦理論には、弦以外にソリトンの実体としてブレイン(branes)と呼ばれる部分時空が力学自由度として存在し、そのブレイン上では超対称場の理論が実現する。ブレインの性質を調べることにより、その上に実現する場の理論の非摂動的な性質を探ることもできる。

重力場は2階対称テンソルで表されるが、その相棒の2階反対称場が期待値をもつと、ブレイン上に非可換時空が実現し、空間に最小単位が存在することになる。

これらの見地から、2次元非線形場の理論、ブレイン上の超対称場の理論と超重力理論、非可換時空におけるゲージ理論などを探究する。又、行列模型により超弦理論を構成的に定義することもめざす。超弦理論を使い、ブラックホールエントロピー、ホーキング輻射、情報の喪失問題も解明する。



原子核理論

原子核はハドロン多体系であり、近似的に孤立した量子系である。従って、原子核はミクロな宇宙と見なすことができる。この系が低エネルギー状態から高エネルギー状態に移るに伴い、系の力学を規定する自由度は核子、中間子、バリオン励起、クォークへと姿を変える。各相における相互作用、反応、構造の理論の構築が1つの研究目的である。他方、孤立した系における種々の反応のレスポンスの分析から種々の基本法則の対称性の検証がもう1つの研究目的である。これらの目的に沿って以下の研究を行う。

- (1) 少数粒子系における弱相互作用反応の研究
ニュートリノ反応、ミューオン捕獲反応、ベータ崩壊。
- (2) モンテカルロ法による核構造の解析
- (3) 核内核子共鳴と中高エネルギー領域における核反応
- (4) 中間子核子反応における核子共鳴の構造の解明
- (5) 高エネルギー重イオン反応によるハイパー核の生成機構の解明
- (6) ハイパロン-バリオン弱相互作用
- (7) カイラルソリトンクォーク模型によるハドロン構造の解明
- (8) 核子のスピン構造関数と量子色力学
- (9) イグゾティック原子と弱い相互作用

<核子以外の自由度を含む原子核および核子の電磁、弱い相互作用過程の研究>

・中間子発生を伴うエネルギー領域における原子核の有効相互作用の確立と少数多体系での核反応理論の構築が重要な中期計画である。これにより、高エネルギー原子核反応物理の基礎付けができあがることになる。

・電磁相互作用は原子核・ハドロン構造を調べる上でクリーンなプローブである。電磁相互作用に伴う反応の分析を通して原子核のみならず、核子、核子共鳴の構造および原子核内での性質の変化を研究する。

・原子核における弱い相互作用は、ある種の条

件が満たされる場合には、素粒子の基本的な弱い相互作用の研究の実験室となり得る。太陽ニュートリノ観測から正確なニュートリノフラックスを求めるために不可欠な重陽子におけるニュートリノ反応の精密な分析や軽粒子数保存に関するミュー原子における電子変換の精密な理論的分析も重要な研究課題である

<カイラルソリトンクォーク模型に基づくハドロン構造の研究>

ここ10年ぐらいの間に、高エネルギー散乱実験を通じて、核子の全スピン $1/2$ のうち、クォークが担う部分は約20%程しかないという事実が確立された。この事実は「核子スピンの謎」と呼ばれてハドロンの物理の最大の課題の一つとなっている。この謎を解明することが私たちの研究の長期的目標である。

この目標達成のための理論的出発点を提供するのが、私達が発展させてきたカイラル・クォーク・ソリトン模型である。Diracの海の真空偏極の効果是非摂動論的に取り入れて、核子の束縛問題を解くことができるのが、この模型の最大の長所であり、それは既に核子の構造の物理における様々な成功をもたらしてきた。長期的目標を視野に入れつつ、模型をこの利点を生かしうるその他の様々な問題に適用するのが当面の戦略である。

それらの問題をいくつか挙げるならば、非ストレンジ・バリオンである核子の中にストレンジ・クォークはどのぐらい混在しているのか？核子のスピンのうち、クォークの軌道角運動量はどのぐらいの割合を占めているのか？それはどのような実験で確かめられるのか？核子の構造の物理でグルオンはどのような働きをしているのか？等々である。

素粒子・原子核実験

我々は、基本的な対称性や保存則の破れ、新粒子の探索、および量子多体系の物理について、素粒子と原子核の分野という広い様々な角度から実験を行い、研究を進める。これにより、物質宇宙や星の生成などについての理解を深める。

<レプトン数の非保存>

標準理論によれば、レプトン数（電子数、ミューオン数、タウ数）はそれぞれ保存するとされている。しかし、最近ミューオンニュートリノが他のニュートリノに移り変わるニュートリノ振動が発見され、この仮定は揺らぎ始めた。そこで我々は、ミューオン-電子変換、およびニュートリノ-反ニュートリノの関係、という二つの面からこの問題に取り組む。

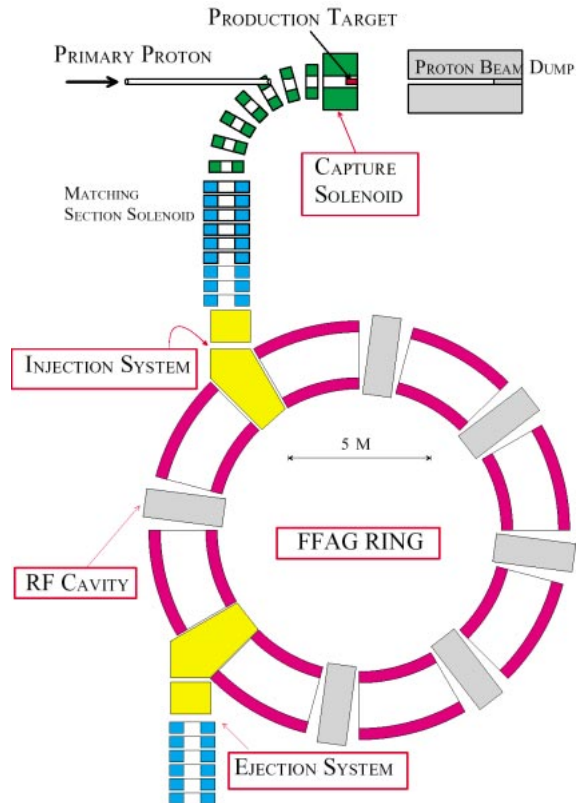
○ミューオン-電子変換

中性のニュートリノに対して、電荷を持つレプトンについても、SUSY-GUT と呼ばれる理論では、 10^{-18} より大きい確率でミューオンが電子に変わりうると予想されている。久野グループでは、ミューオン-電子変換の探索実験を行う。もし、こうしたレプトン数の破れを発見できれば、この宇宙に関する私たちの理解は大きく飛躍することになる。 10^{19} 個以上と膨大な数のミューオンを生成し、その中から僅か1~2個のミューオン-電子変換でできた電子を捕まえるためにPRISM(Phase Rotated Intense Slow Muon)と言う大強度・高輝度・高純度の低エネルギーミューオン源と、PRIME(PRIsm Muon Electron)と言う高性能のミューオン-電子変換検出装置の開発設計をしている。PRISM の模式図を示す。これによって、従来の一萬倍以上の大強度（毎秒 10^{12} 個）のミューオンビームを非常に運動量のそろった（高輝度）状態で生成して、効率良く標的に止めて電子に変換することができる。

今後さらに詳細を詰めた上で 2005 年前後までには実機を完成させてミューオン-電子変換実験を開始したい。PRISM ではミューオン-電子変換実験以外にもミュオニウム-反ミュオニウム変換実験や正電荷ミューオン-負電荷ミューオン変換実験等いろいろな素粒子実験が可能である。生命科学や非破壊検査への応用も考えられており、学際分

野での大きな発展が期待されている。

また将来的には、PRISM をベースとして大強度で高品質のニュートリノビームをつくり出す施設を考えている。



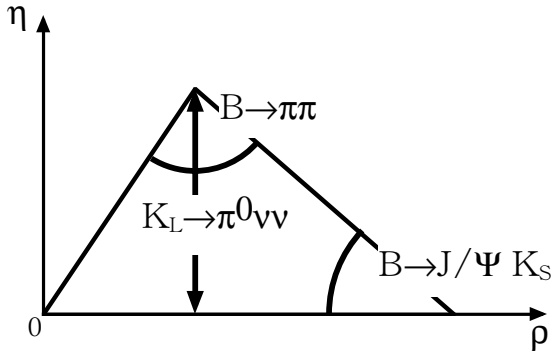
PRISM 模式図

○ニュートリノと反ニュートリノの結合

ニュートリノ振動の発見によってニュートリノに質量があることが判明したので、この質量が粒子と反粒子を結ぶマヨラナタイプであるかどうかは今非常に重要な研究テーマである。この為に、岸本グループではマヨラナタイプだと起りうる二重ベータ崩壊の研究を推進する。現在、奈良県の大塔村の地下実験施設におかれた CaF_2 検出器で研究が進めているが、ニュートリノ振動に対応する領域で二重ベータ崩壊を探索するには次世代検出器が必要である。そのために、核物理研究センターと協力して CANDLES と呼んでいる新しい検出器を開発する。

<CP 対称性の破れ>

K 中間子と B 中間子の実験より、標準理論による CP の破れの説明が確からしくなってきた。しかし、これはまだ CP の破れの入り口に立った



ユニタリー三角形

ところである。標準理論は、CP の破れがクォーク間の混合における複素位相によって起きると説明しており、その複素成分の大きさは η というパラメータで表される。さらに、クォークの混合に関わる ρ というパラメータがある。

標準理論が正しければ、CP の破れの大きさを決める η は、K 中間子を用いて測定しても、B 中間子を用いて測定しても、等しくなるはずである。逆に、K と B で結果が異なれば、それは標準理論を越えた物理が CP の破れを生みだしていることの証拠となる。例えば、現在有力視されている超対称性理論などは、こうした新たな CP の破れを予言している。

したがって、次の中期目標は、CP の破れのパラメータの精密測定を行い、標準理論を検証することである。そのために、山中グループでは次の二つの戦略を進める。

まず、KEK-Belle 実験において B 崩壊の事象数を大幅に増やし、稀な崩壊における非対称性を測定することにより、図に示す ρ - η 平面上の三角形の頂点の角度を測定することにより、 η を求める。このためには、より大強度のビームに耐えるシリコン検出器が必要であり、その開発を KEK などと共同で行う。また、種々の崩壊について詳しい解析を進める。

また、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ という稀な崩壊の分岐比を 10%の精度で測定する。この崩壊の分岐比は η^2 に比例しており、理論的誤差も 2%程度なので、これにより、 η の直接測定ができる。しかし、この崩壊の分岐比は約 3×10^{-11} と予測されているので、まず KEK で現存する陽子加速器を用いて実験を行い、 3×10^{-10} の感度でこの崩壊を探索する。そして、その経験を踏まえ、大強度加

速器を用いてこの崩壊を 100 事象以上観測する実験を計画し、遂行する。

これにより、もし標準理論を越えた物理による CP 非保存が発見されれば、ビッグバン以降、この物質世界を作り出すのに寄与した CP の破れの起源に結びつく可能性がある。

<原子核内の対称性>

u、d クォークの荷電空間における反転対称性 (G パリティ) の検証は、素粒子・核物理学の主要な課題の一つである。この G パリティの対称性や弱い相互作用におけるベクトル流保存則を、極低温状態にある原子核というマイクロラボの中で、大きな運動量移行を伴わない β 崩壊を通して検証する。 β 線検出による核磁気共鳴法 (β -NMR) を利用した、 $^{12}\text{B} - ^{12}\text{N}$ 鏡映核対での β 線角度分布の核スピン整列相関項では、G パリティには、標準モデルを超える大きな破れはないように見えるが、クォークの質量差に起因するわずかな破れの可能性を $^8\text{Li} - ^8\text{B}$ や $^{20}\text{F} - ^{20}\text{Na}$ 対での測定も含めて追求する。これは核内クォークの質量差を定量することにもなる。

<ストレンジネスの研究>

○ SU(3)対称性の破れ

核子と同じ仲間であるハイペロンを含む原子核は新しいクォークを入れる事で我々の核力に対する知識が何処まで正しいかを教えてくれる。岸本グループでは、こうしたハイパー核を用いてアイソスピンをストレンジネスまで一般化した SU(3)対称性とその破れと現実の力との関係を明らかにする。

○ 弱い相互作用によるハイペロンの生成

今まで、ストレンジネスを持つバリオン、即ちハイペロンは通常、強い相互作用を用いて作られていた。これに対し、 $p n \rightarrow p \Lambda$ 反応を用いて、弱い相互作用によるハイペロンの生成を行うことを目指す。これによって、弱い相互作用も SU(3)に拡張出来るかが明らかになる。そのため、岸本グループは核物理研究センターにおいて検出器の建設と特性を調べる実験を進めている。

○ 超高密度核物質とK中間子のボーズ・アインシュタイン凝縮

米国 BNL でK中間子核を高強度のK中間子ビームを用いて、超高密度核物質とK中間子のボーズ・アインシュタイン凝縮について研究する。岸本グループは今後2年程で準備を進め、実験を行う。これは、中性子星の中でのK中間子の果たす役割の解明につながる。

<宇宙のダークマター探索>

宇宙の質量はほとんどダークマターで占められている。ダークマターは超対称性対粒子である可能性が高く、発見されれば宇宙論、素粒子論、原子核物理に跨る問題が一举に解決する。この探索は非常に重要で今後推進していく。

<短寿命核の研究>

核反応を用いて短寿命核を大量に作り出し、エネルギーのそろったビームとして供給する「短寿命核ビーム施設」が本格稼働しはじめた。長期的には、短寿命核が関与する核反応を起こさせ、より特異な核構造の探求や星の中での核反応を解明する方向を目指す。

○ 短寿命核の構造研究

安定核から離れた極めて不安定な原子核では、核子密度分布の大きな広がり（ハロー構造）や魔法の数の変化といった現象が観測され、話題になっている。

下田グループは、カナダ国立素粒子原子核研究所（TRIUMF）において、スピン偏極した ${}^{11}\text{Li}$ 核ビームを生成し、娘核 ${}^{11}\text{Be}$ の構造の解明を行う。これによって、これまで「魔法の数」として信じられていた中性子数8が、極端に陽子が少ない核では魔法の数ではなくなるという機構を解明する。これまでに70%という高偏極（世界最高）を生成することに成功し、実験準備が整った（2001年12月に本実験開始予定）。今後Naのアイソトープでも同様の実験を行い、魔法数20の消失機構を研究する。

南園グループは、不安定核の構造を、反応断面積による核子密度分布の決定や β -NMRによる核モーメントの測定により多面的に研究する。これにより、コア偏極による有効電荷の核子密

度依存性や核構造の詳細を明らかにする。

○ 超流動ヘリウムを用いた研究

下田グループは、大阪大学核物理センターに自身の手によって完成した不安定核ビームコースで得られる様々な短寿命核ビームを用いて、液体ヘリウム中の不純物の移動度を測定し、ヘ大貫惇睦リウム中に生成されるマイクロクラスターの構造や、ヘリウム中での素励起の研究を行う。また、ヘリウム中でのレーザー分光を用いた核物理への応用を目指す。

<核内核子質量の再規格化>

南園グループは、運動量移行零近傍で核内核子質量やメソン質量の再規格化の検証を5年間継続する。既に、核スピン β 線角度相関の超精密研究を開始している。この再規格化の検証は高い運動量移行での媒質効果の研究に繋がるもので、「クオーク・グルーオンの閉じこめ」及び「カイラル対称性の破れ」研究の系統的発展を目指す。

<原子核能率を用いた物性>

β 線を指標とするNMR法は、放射線検出による高感度の結晶内部場観測法として極めて有効で電子構造の解明に強力な道具として使える。南園グループは、この手法により、NMR共鳴線のシフトや四重極相互作用、スピン格子緩和時間やその温度変化から、結晶中の電子構造、不純物の荷電状態、格子内位置や拡散といった挙動、損傷や格子欠陥の研究を展開すると共に、新強磁性体等の新物質設計に基礎的データを提供する。また、スピン偏極短寿命核の核スピン偏極保存容器としての結晶（スピन्दュワー）の開発を目指す。

新しい物理学のフロンティアを目指して
2002年3月発行
大阪大学・大学院理学研究科物理学専攻

「これまでの研究の歴史」執筆

東島 清 (素粒子・原子核理論)

南園忠則 (素粒子・原子核実験)

赤井久純 (物性理論)

大山忠司 (物性実験)

「最近の研究トピックス」まとめ

編集委員会

「将来への展望」まとめ

編集委員会、野末泰夫、東島 清

編集委員会

竹田精治 (総括責任者)

赤井久純、小川哲生、久野良孝、

細谷 裕、山中 卓

アドバイザー

大貫惇睦 (物理学専攻長)

大坪久夫、東島清

表紙アートワーク

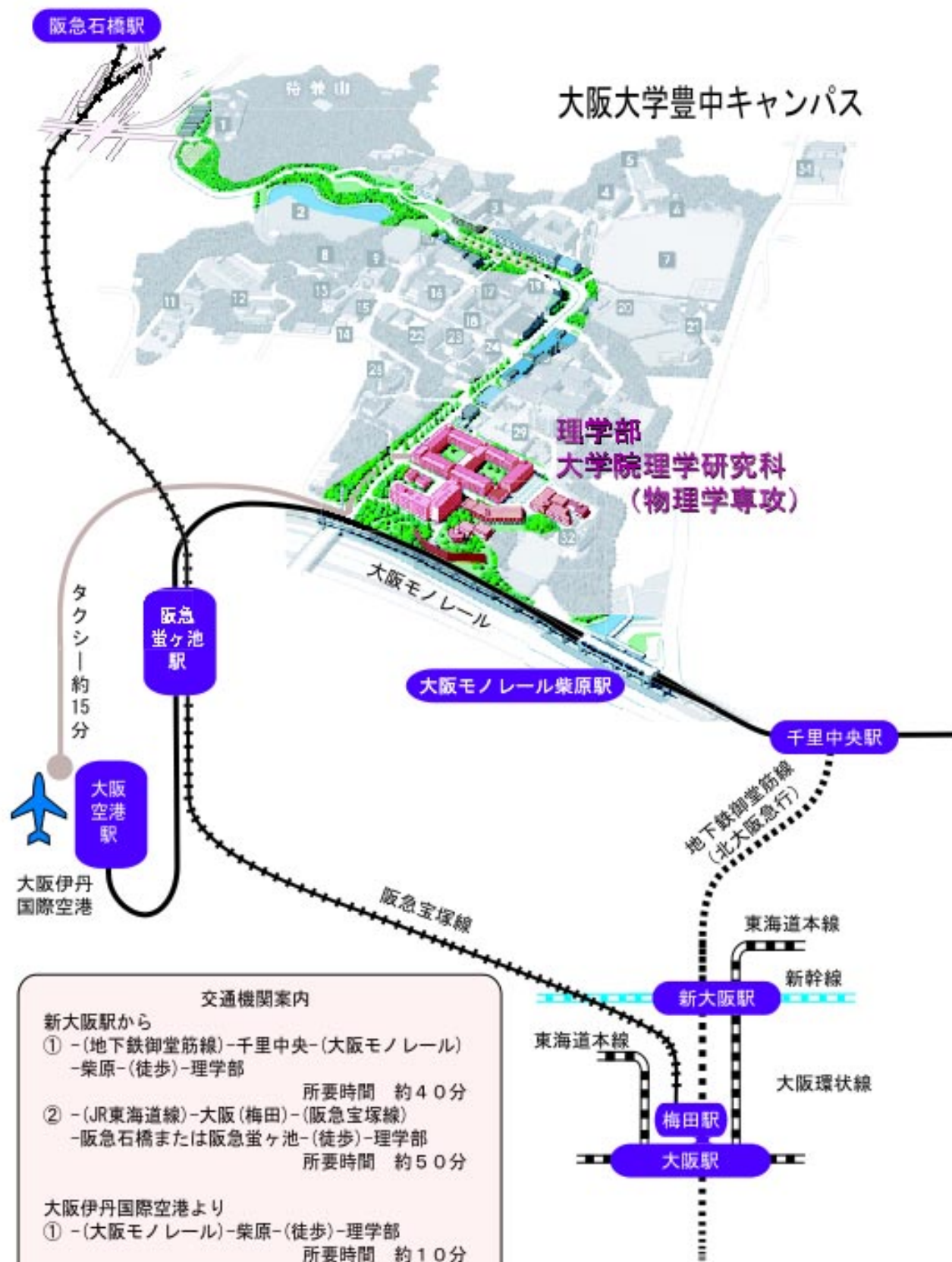
稲田佳彦、大貫惇睦

地図作成

杉山清寛

資料提供

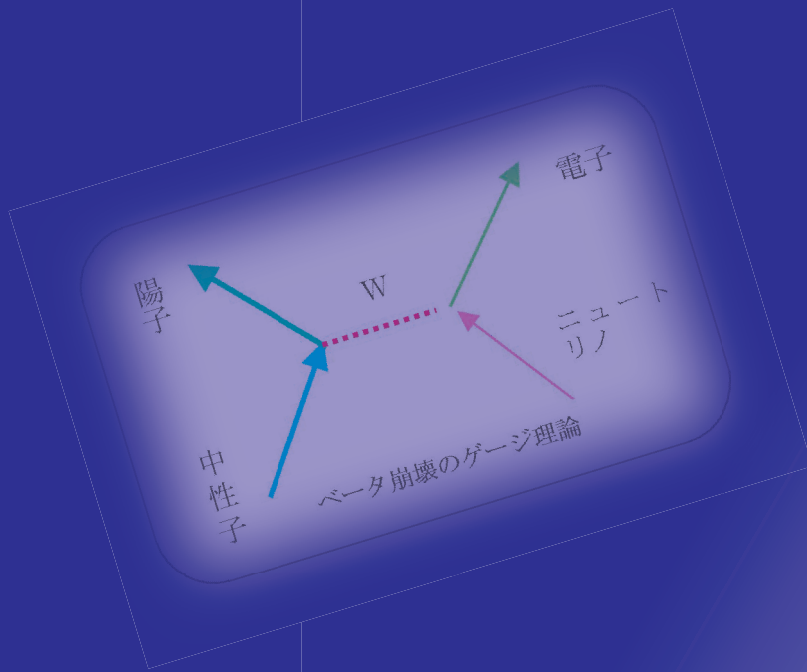
国立科学博物館



大阪大学豊中キャンパス

**理学部
大学院理学研究科
(物理学専攻)**

- 交通機関案内**
- 新大阪駅から
- ① - (地下鉄御堂筋線)-千里中央-(大阪モノレール)-柴原-(徒歩)-理学部
所要時間 約40分
 - ② - (JR東海道線)-大阪(梅田)-(阪急宝塚線)-阪急石橋または阪急蛸ヶ池-(徒歩)-理学部
所要時間 約50分
- 大阪伊丹国際空港より
- ① -(大阪モノレール)-柴原-(徒歩)-理学部
所要時間 約10分
 - ② -(タクシー)-理学部
所要時間 約15分



〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1
大阪大学大学院理学研究科物理学専攻

TEL : 06-6850-5377

FAX : 06-6850-5537

Home page : <http://www.phys.sci.osaka-u.ac.jp/index-jp.html>