

科学研究費補助金「特定領域研究（A）」  
平成13年度発足特定領域申請書

申請領域名

質量起源と超対称性物理の研究

領域代表者

筑波大学物理学系 教授 金 信弘（きむ しんほん）

# 目次

1	申請領域の研究の必要性	1
2	申請領域の国内・外の研究状況	8
3	申請までの準備研究・調査の状況	9
4	特定領域研究を推進するにあたっての基本的な考え方	14
5	特定領域研究の内容	15
5.1	総括班：質量起源と超対称性物理の研究計画調整	15
5.2	計画研究 A1：高エネルギー陽子・反陽子衝突によるヒッグス粒子の探索	16
5.3	計画研究 A2：B ファクトリーを用いた質量起源の探求	18
5.4	計画研究 A3：タウレプトンの物理	21
5.5	計画研究 A4：K ファクトリーを用いた $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の測定	24
5.6	計画研究 A5：荷電および中性 K 中間子の稀崩壊の精密測定	27
5.7	計画研究 A6：ヒッグスセクターと超対称理論ダイナミックスの現象論的研究	29
5.8	公募研究 B1：次世代加速器実験のための実験技術開発	32
5.9	公募研究 B2：次世代加速器実験で期待される新しい物理の理論研究	32
6	研究期間	33
7	領域代表者および事務担当者	34
8	参考資料一覧	35
8.1	領域代表者および計画研究の研究代表者の最近の主要研究業績	35
8.2	文献のリスト	41

## 1 申請領域の研究の必要性

素粒子物理学は、物質の究極の構成要素である素粒子の探究とその反応メカニズムの解明を目指す学問である。二十世紀後半の素粒子物理学は、「標準理論 (The Standard Model)」と呼ばれる素粒子反応の基本理論の確立を最大の目標として発展してきた。標準理論は、(1) ゲージ普遍性の原理、(2) 電弱相互作用の自発的対称性の破れによる質量の生成、(3) 素粒子 (クォークとレプトン) の三世代の階層構造という三つの柱からなっている。このうち、第一のゲージ原理は、物質の構成要素であるクォークとレプトンというフェルミオン間の相互作用がゲージボゾンと呼ばれるスピン 1 のボゾンの交換によって起こることを明らかにした。その正しさは、弱い相互作用のゲージボゾン ( $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ ) と強い相互作用のゲージボゾン (グルーオン) の加速器実験による発見に代表される数々の実験事実によって実証されている。一方、上記第三、フェルミオンの階層構造 (世代) が、自然界の粒子と反粒子のアンバランスに重要な関わりがあるとする「小林・益川理論」については、文部省高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の Bファクトリーでその検証が着々と進んでいる (文献 1)。標準理論について未だ確認が得られていないのは、フェルミオンやボゾンがなぜ質量を持っているのかを説明する自発的対称性の破れの (ヒッグズ機構とも呼ばれる) メカニズムである。「ヒッグス粒子の真空凝縮によってゲージボゾン、クォーク、レプトンに質量が与えられる」という標準理論の質量起源に対する予言は未だ実験室で確認されていない。

本領域代表者 (金) および計画研究 A2 代表者 (相原) は、米国フェルミ国立研究所テバトロン陽子・反陽子衝突型加速器を用いたトップクォークの発見およびその後の研究にたずさわってきた (文献 2, 3)。トップクォークは、6 種のクォークのうち最も重いものであり、その質量  $175 \text{ GeV}/c^2$  は金原子 1 個に相当するほど大きい。なぜ、このように重いクォークが存在するのか、この巨大な質量に意味があるのかないのか、あるとすればその理由は何なのかについて、我々素粒子物理学者は強い興味を抱いてきた。質量の起源が、標準理論の言う自発的対称性の破れのメカニズムにあるのか、それともこの理論の枠組みにおさまらない新理論にあるのか、これは今後の素粒子物理学の方向を決める最も重要な課題である。

標準理論においてはクォークやレプトンの質量は実験で決定されるべきパラメータである。標準理論は、これらフェルミオンの質量パラメータとして少なくとも 9 個、ニュートリノに質量があれば 12 個のパラメータを持っていることになる (表 1 参照)。これらのパラメータをアприオリに決定する原理すなわち標準理論よりいっそう基礎的な物理が存在するのかどうか、あるとすればその新しい基礎理論の手が

クォーク			レプトン		
フレーバー	質量 (MeV/c <sup>2</sup> )	電荷 (e)	フレーバー	質量 (MeV/c <sup>2</sup> )	電荷 (e)
<i>u</i>	5	+2/3	$\nu_e$	0?	0
<i>d</i>	8	-1/3	<i>e</i>	0.511	-1
<i>c</i>	1,500	+2/3	$\nu_\mu$	0?	0
<i>s</i>	160	-1/3	$\mu$	105.7	-1
<i>t</i>	175,000	+2/3	$\nu_\tau$	0?	0
<i>b</i>	4,250	-1/3	$\tau$	1,777	-1

表 1: クォークとレプトンの周期率表

かりを得ることが、現代素粒子物理学の急務である。

この新しい物理の可能性として最も注目されかつ期待されている理論が、フェルミオンとボゾンの間の対称性にもとづく超対称性理論である。超対称性理論によるとすべての粒子にはスピン統計性の異なるパートナーがある。スピン 1/2 のフェルミオンであるクォークやレプトンはスピン 0 のスカラー粒子と対になっている。この超対称性にもとづく大統一理論、すなわち「素粒子に働く強い力、電磁力、そして弱い力の三種類の力が超高エネルギーでは統一されて一つになる」という理論を仮定するとヒッグス粒子と呼ばれる未知の粒子の質量が 150 GeV/c<sup>2</sup> 以下でなければならないことが導かれる。ヒッグス粒子は、質量起源が自発的対称性の破れにあるならば、必ず存在しなくてはならないスカラー粒子である。標準理論だけでは、ヒッグス粒子の質量について、何の制限も与えることはできないが、超対称性理論と組み合わせると、その質量に制限を加えることができるのである。このヒッグス粒子を発見できれば、質量起源が自発的対称性の破れにあることを証明することになる。さらに、その質量が 150 GeV/c<sup>2</sup> 程度であれば、標準理論の先にあるより基礎的な理論が超対称性理論である可能性がきわめて高くなる。本領域研究期間中、このヒッグス粒子を直接探査できる加速器は、フェルミ国立研究所 (FNAL) のテバトロン加速器しかない。本領域計画研究 A1 班の研究者グループは、テバトロンにおいてトップ (*t*) クォークを発見し、さらに *b* クォークと *c* クォークの束縛状態である *B<sub>c</sub>* 中間子を発見する (文献 4) など、陽子・反陽子衝突実験における新粒子発見に確固たる実績がある。この計画研究によるテバトロンでの実験が、150 GeV/c<sup>2</sup> 程度という比較的軽いヒッグス粒子を発見できる可能性はきわめて高い。ヒッグス粒子の直接探査が、この領域の第一の目的である。

超対称性理論など標準理論の先にある新しい物理を検知するもう一つの有効な手段は、*K* 中間子、*B* 中間子およびタウ ( $\tau$ ) レプトン崩壊の精密測定である。これらの粒子の崩壊は、新しい物理の効果に敏感であることが理論的に示されている。KEK

の Bファクトリーに代表される「粒子ファクトリー」は、これらの中間子やレプトンを大量に発生することができる。これらの粒子の崩壊現象を精密に測定し、標準理論の予測値と厳密に比較することにより、いままでに検出されていなかった「標準理論からのずれ」を発見することが可能である。特に、 $K$ 中間子および  $B$ 中間子における CP非保存現象は、自発的対称性の破れから生ずる「小林・益川理論」が予言する現象であり、 $B$ 中間子における CP非保存と  $K$ 中間子における CP非保存（文献5）の比較は、新しい物理を発見するのに最も有効な手段の一つである。具体的には、 $K$ 中間子ファクトリーを用いて、小林益川行列の中で CPの破れを決める  $Im(V_{td})$  と、 $|V_{td}|$  の大きさを、約 5%の精度で測定する（文献6）。標準理論の予測や  $B$ 中間子の結果と異なる値が得られれば、小林・益川理論以外の CPの破れの存在を意味する。さらに、超対称性理論は、タウレプトンの崩壊現象の中にフレーバー量子数を保存しない崩壊がわずかながら含まれていると予言する。 $B$ ファクトリーは  $B$ 中間子の工場であると同時にタウレプトンの工場でもあり、タウレプトンの稀な崩壊現象を探すのに最も適した実験環境を提供する。本領域の第二の目的は、ファクトリー加速器を用いた徹底した精密実験によって「標準理論からのずれ」を発見し、新しい物理の手がかりを得ることである。

今後5年間（すなわち本領域研究期間）に、ヒッグス粒子の直接探査、標準理論の精密検証そして超対称性物理の探索など質量起源の解明に関する実験のできる加速器施設は、フェルミ国立研究所のテバトロン、KEKの  $B$ ファクトリーおよび米国スタンフォード大の  $B$ ファクトリー、そして米国フェルミ国立研究所と同ブルックヘブン国立研究所の  $K$ ファクトリーにおいて他にはない。我が国の実験素粒子物理学研究者が、素粒子物理さらには基礎物理学全体に多大な貢献ができる、まさに絶好の機会といえる。

本特定領域研究の第三の目的は、次世代加速器とくに、我が国のハドロン加速器である JHF 加速器、CERN（ヨーロッパ原子核連合）で 2005 年の完成を目指している超高エネルギー陽子陽子衝突型加速器（LHC）および我が国素粒子物理学会の次期主力計画として検討が進められている電子陽電子線形衝突型加速器（JLC）での物理の理論的研究および測定器の開発研究をそれぞれ理論計画研究と公募研究で勢力的に進めることにある。本領域発足により、次世代の素粒子物理学を担う若い研究者が、将来の加速器を使った実験に対し積極的に提案をし、かつその開発研究を行うことを可能にする環境を整えることができる。

本領域はトップクォークの発見、 $B$ ファクトリーと  $K$ ファクトリーにおける小林・益川理論の検証、 $B$ 中間子および  $K$ 中間子崩壊の超精密測定など、現代素粒子物理学の骨格をなす研究にたずさわってきた研究者が、その実績に基づいて現代物理学の最も基礎的かつ興味深いテーマ「物質に質量があるのはなぜか、物質の質量を決めている物理法則は何か」を現行の加速器を最大限利用して解明することを目的としてい

る。領域の学術的水準はきわめて高く、国外においても高く評価されている。現在われわれが手にしているトップファクトリー、Bファクトリー、Kファクトリーを総合的に利用し互いに協力して研究を進めれば、次なるブレイクスルー (Breakthrough) を引き起こすことができると確信している。すでに世界の素粒子物理学をリードしつつある我が国のこの分野が、本領域の発足によって 21 世紀の物理を切り拓く原動力となることができる。さらに本領域の研究は、素粒子物理学と密接な関係にある宇宙物理学にもおおきな影響を与える。150 億年前に、ビッグバンから始まった宇宙の進化の過程を理解するのに、粒子の質量起源の解明は必須である。宇宙が、なぜ今の宇宙でありえたのか。フェルミオンの質量パラメータがなぜ現在の数値になっているのか。この問題の答えは、素粒子物理学のさらなる進展なしにはあり得ない。本領域の発足は、この答えを出すために必要である。したがって、本領域は領域公募要領「対象となる領域の特性」の条件 (1), (2) および (4) を十分に満たす。

本特定領域研究は、3つの実験研究項目と1つの理論研究項目を主要な柱とする。その具体的内容は、

- 項目 A1: 6種類あるクォークのうち最後まで見つからなかったトップクォークは 1994 年にテバトロン加速器を使って CDF グループが生成の証拠を発表し、1995 年に D ゼログループとともに生成の確認をするに至り最終的にその存在は確立された。2005 年に予定されているヨーロッパ CERN 研究所の LHC ハドロン加速器が稼働するまではテバトロン加速器が唯一トップクォークを生成できる加速器である。このフェルミオンの中で最も重いトップクォークの生成崩壊を精密測定することによって、ヒッグス粒子の質量に対する知見を得ることができる。かつ、ヒッグス粒子の直接探索については、2000 年にヨーロッパ CERN 研究所の LEP 実験が終了した後は LHC ハドロン加速器の稼働までは CDF 実験が唯一可能な実験である。本計画研究で計画中の高放射線耐性シリコン飛跡検出器は B ハドロンの飛程を高精度で測定するのに必要不可欠である。この検出器は特にボトム・クォーク・ジェットの同定を用いたヒッグス粒子の探索にとって重要である。CDF 実験は、2001 年 3 月より衝突実験が再開され、2 年程度の期間に  $2 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得すると期待される。これらのデータを用いると、ヒッグス粒子の質量が  $120 \text{ GeV}/c^2$  以下であれば、95% の信頼度で検出できる。さらに 2006 年 3 月までに  $7 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得すると期待される。これらのデータを用いると、ヒッグス粒子の質量が  $180 \text{ GeV}/c^2$  以下であれば、95% の信頼度で検出できる。
- 項目 A2: B ファクトリーに新しいシリコンデバイスを導入して、質量の起源をさぐる。本計画研究の独創的な点の第一、B ファクトリービーム軸からわずか 1cm の近傍に設置されるデバイス、擬ピクセル検出器である。このデバイ

スは超高エネルギー陽子衝突加速器での使用のために開発されたハイブリッド型ピクセルから着想を得、かつ、その欠点である物質量の多さを克服するために考え出されたもので、わずか 17mm 長のストリップからなる特殊なシリコンストリップである。このデバイスを用いた実験は、他にない。これにより、B 中間子の崩壊点を約  $50\mu\text{m}$  の精度で測定することが可能になる。これは、既存の加速器実験において最も精度のよい測定となる。また、トリガー機能付きの第面積シリコン検出器をビーム軸から約 8cm のところに設置する。これは、もともと X 線検出器用に開発されてきたものを荷電粒子検出に応用したもので、これにより大強度ビームから発生するバックグラウンドに影響されることなく B 中間子データの収集が可能になる。Bファクトリーにおけるきわめて多様な実験テーマの中から、現代素粒子物理学の中心テーマにしぼった崩壊過程を特定して、その測定に最も適した検出器を製作しようとする研究計画である。

- 項目 A3: KEK Bファクトリーは、B 中間子対と同多量のタウ・レプトン対を生成する。また、Belle スペクトロメータは、高分解能での測定を可能とする。本研究目的は、この高統計・高品質のタウ・レプトン事象の測定から、タウ物理研究を新世代へ導くとともに、未知の物理を開拓することを狙うものである。タウ・レプトンは他二種の荷電レプトンと比較し、遥かに重い質量（電子の質量=0.5 MeV; ミューオンの質量=0.1 GeV; タウの質量=1.8 GeV）を持つ。これは、(1) 相互作用の強さが質量の  $n$  乗に依存するため新しい物理に対する感度が非常に高い、また、(2) ハドロンの崩壊し得る唯一のレプトンである、(3) 他二種のレプトンや精密測定が行われている  $\pi$ 、K 中間子と比べ、随分と大きな  $q^2$  を有し研究のエネルギー領域が拡大できる、などの特徴的な利点がある。Bファクトリーでの膨大な統計量 ( $\sim 1 \times 10^8$   $\tau$ -pairs/ $100 \text{ fb}^{-1}$ ) は、従来の研究と比べ、タウ物理を格段に大きく展開できるとともに、探究レベルを質・量共に大きく革新することを可能とする。タウ物理研究には、高分離能力の粒子識別検出器が必要である。特に、高い運動量 ( $3 - 4 \text{ GeV}/c$ ) 領域を被う高精度  $\pi/K$  識別は、物理研究の課題拡充と信頼度向上に非常に重要である。タウ物理の次世代を荷なう Bファクトリーに世界が期待する点の一つは、この優れた粒子識別能力である。現 Belle は斬新・高能力なアエロジェル・チェレンコフ検出器を有する ( $\pi/K$  separation at  $3 \text{ GeV}/c = 3$ )。我々は、さらに識別能力ならびに検出効率が高く、上記の高運動量域までも稼動する新型検出器を、次期 Belle 粒子識別検出器候補として、発案、開発研究中である。この検出器は、石英チェレンコフ輻射体からのチェレンコフ・リング像を、光子の石英バーの伝播時間 (TOP) と放出角度 ( $\Phi$ ) の二変数として検出するもので、Time-Of-Propagation (TOP) counter と名付ける。本計画研究

で、この新しい検出器の開発を完了させる。

- 項目 A4: KEK のプロトンシンクロトロンを用いて、 $K_L$  中間子の稀崩壊 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ) を  $10^{-10}$  程度の感度で、世界に先駆けて探索する。これにより CP の対称性の破れをに寄与する  $V_{td}$  の複素成分を直接測定することができる。FNAL の 120GeV 陽子シンクロトロンによる K ファクトリーを用いて、( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ) を約 100 事象観測し、 $V_{td}$  の複素成分を約 5% の精度で決定する。約 15GeV の高いエネルギーの  $K_L$  を用いるので、崩壊のできるガンマ線のエネルギーが高い。これにより、バックグラウンドとなる  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  崩壊から出てくる余分なガンマ線に対する不感率が低いことを利用して、バックグラウンドを抑えた精密実験が可能である。
- 項目 A5: 小林益川行列の要素、 $|V_{td}|$  の大きさを測定するために、米国ブルックヘブン研究所 (BNL) の K ファクトリーを用いて、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  シグナルを数事象観測する。さらに FNAL の K ファクトリーを用いて、同反応約 100 事象観測することにより、 $|V_{td}|$  を約 5% の精度で決定する。BNL の 30GeV の陽子ビームを用い、( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ) を約 100 事象観測し、 $V_{td}$  の複素成分を約 5% の精度で決定する。ガンマ線の方法を測定して  $K_L$  の崩壊点を求め、約 0.7GeV/c という低い運動量の  $K_L$  を用ることによって飛行時間から  $K_L$  の運動量を求める。これにより、運動力学的な変数な制約を加えることによって ( $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ ) からのバックグラウンドを抑えることができる。
- 項目 A6: 本特定領域研究の一つの特徴は、理論と実験との密接な共同研究にある。過去大きな成功を納めた実験研究を振り返ってみると、その背景に強力な理論グループのサポートを得ているケースが多い。実験データから、物理の結果を引き出すのに必要な理論的解析を完了させ、質量起源と超対称性物理の追求を目指すとともに、理論研究の結果を実験にフィードバックする。具体的目標は、ヒッグスセクターおよび超対称模型に関して、そのダイナミクスの解明と宇宙論的考察、そしてその現象論的な帰結を明らかにすることであり、これによって上に挙げた最先端の加速器実験における解析方法、実験結果の解釈の指針を与えるとともに、将来に対する展望をひらくことである。

本特定領域は、現在稼働中の粒子ファクトリーの産み出す物理成果のさらなる飛躍をめざすものであるとともに、大型プロジェクトを支える大学研究機関の技量の一層の発展をはかることを目標としている。わが国の素粒子物理学分野の健全な発展は、国内外の共同利用研究所のみならず教育・研究機関である大学グループの充実とそこでの将来を担う有能なる若手研究者の育成を抜きにしては語れない。筑波大学、東京大学、名古屋大学、大阪大学、京都大学、東北大学など参加大学は、これ



まで、高エネルギー物理学研究所の Bファクトリーやプロトンシンクロトロン（Kファクトリー）さらに日米科学協力事業を通して、新粒子の発見や CP 非保存の研究を遂行してきた。本領域の研究グループは、我が国のファクトリー物理研究の中核を成す研究者によって構成されており、本研究課題を遂行するに十分なる実力・実績を有するものである。本領域の選定は、これらの基幹大学グループが、質量起源の解明にせまり、超対称性物理研究の成果を確実にあげることが可能とし、研究の一層の充実をもたらすものである。

## 2 申請領域の国内・外の研究状況

本領域は、現在の素粒子物理学においてニュートリノの研究と並び、最も活発に研究の行われている分野である。さらに KEK の B ファクトリーに代表されるように、我が国の加速器を用いた実験研究が世界のトップを走っている分野である。

現存するトップファクトリー、FNAL のテバトロンは、今後約 5 年間でヒッグス粒子を直接生成できる可能性がある唯一の加速器である。KEK の B ファクトリーは、B 中間子の CP 非保存の研究やタウレプトン稀崩壊の測定について米国スタンフォード大学の B ファクトリーと熾烈な競争をしている。KEK, BNL, FNAL の陽子シンクロトロンは、それぞれ異なったエネルギーの K 中間子を発生させる K ファクトリーである。本領域は、これら現在稼動しているすべての粒子ファクトリーを用いて、包括的徹底的に研究をしようとする意欲的な提案である。しかも、この領域に参加している研究者は、それぞれのファクトリーにおいてすでに顕著な実績をあげており、この意欲的な研究を遂行するのに国際的にも十分な資格と能力がある。現在、我が国の素粒子物理学はきわめて高い水準に達している。国内・外の状況は、本領域の設定により、我が国の素粒子物理学研究者が素粒子物理の基本的問題「質量の起源」に決定的な役割を果たすことができることを強く指示している。本領域の研究成果は、今後の素粒子物理学の方向を決めていく大きな役割を担うことになる。

### 3 申請までの準備研究・調査の状況

#### 計画研究 A1 関係

1. 日米科学協力事業（高エネルギー物理学）CDF 実験  
平成 12 年度（代表者 筑波大学 金 信弘） 19,000 万円  
平成 11 年度（代表者 筑波大学 滝川 紘治） 19,500 万円  
平成 10 年度（代表者 筑波大学 滝川 紘治） 16,000 万円  
平成 9 年度（代表者 筑波大学 滝川 紘治） 16,500 万円
2. 平成 10/11 年度 科研費補助金 基盤研究（A）（2）テバトロンによる素粒子の精密測定  
（研究代表者 筑波大学 滝川 紘治 補助金合計 2,350 万円）
3. 平成 11/12 年度 科研費補助金 基盤研究（B）（2）テバトロンでの CP 非保存の物理  
（研究代表者 筑波大学 金 信弘 補助金合計 1,420 万円）

CDF 実験グループはテバトロン陽子・反陽子衝突実験のために日米伊 3 ヶ国の国際協力のもとに 1979 年に結成され、以来、日米科学技術協力事業（上記 1、最近 4 年間の実績を示す）として、筑波大学・KEK を主とする日本グループは主導的に建設、稼働、解析を行ってきた。1991 年以降は大阪市立大、広島大なども新たに加わり、CDF 検出器の増強のために、1) 中央部  $\mu$  粒子検出器（筑波大、大阪市立大）、2) 端冠部電磁カロリメータとプリシャワーカウンター（筑波大、早稲田大）、3) SVX-II（広島大、岡山大）、4) ISL（筑波大、大阪市立大）、5) TOF カウンター（筑波大）の設計製作を担当してきた。1) はトリスタン実験での経験を生かし製作を終了し、すでに Run-I の段階から稼働している。バックグラウンドの少ない  $\mu$  粒子を検出するのに用いられ、トップクォークの発見に寄与した。2) は筑波大学の長年のカロリメータ開発技術を生かして製作を行い、現在はフェルミ研究所で最終調整の段階にある。また、3) は広島大学のグループによるシリコン検出器の開発が成功し、CDF での採用が決定された。浜松ホトニクスとの共同研究で蓄積された技術を用いて、センサーの製作を完了した。4) の設計は浜松ホトニクスのノウハウを生かして行われ製作は完了した。3) 4) 5) には上記 2 の科研費が使われている。以上の検出器の他に、新たに増強されるものとして高放射線耐性シリコン飛跡検出器がある。この検出器を 2003 年までに完成し、既存のシリコン飛跡検出器と入れ替えた後、2004 年からデータ収集を再開する予定である。この検出器に用いるシリコンセンサーと信号ケーブルは筑波大学グループと岡山大学グループが共同で製作する。この検出器は B ハドロンの飛程測定とボトム・クォーク・ジェットの同定に有効でヒッグス粒子の探索に大いに役立つことが期待される。

## 計画研究 A2 関係

(1) 科学研究補助金・特定領域研究「CP非保存の物理」

領域代表者：三田一郎（名古屋大学理学研究科教授）

期間：平成9－12年度

計画研究課題名：「粒子・反粒子混合におけるCP非保存の研究」

計画研究代表者氏名：相原博昭

研究者氏名：相原博昭, 田島宏康, 羽澄昌史, 長島順清, 原隆宣, 渡辺靖志, 金行健治

研究経費：189,800千円

Bファクトリーでの Belle 実験において, 小林・益川理論から期待される B 中間子崩壊過程の CP 非保存の研究を進めた。特に, 第1世代のシリコン検出器を用いて,  $B^0 \rightarrow J/\psi K_s, J/\psi K_L$  などの崩壊時間を測定した。本申請の3ヶ月前, 平成12年7月25日までのデータから, ユニタリー三角形の第1の角度  $\phi_1$  の測定を行い,  $\sin 2\phi_1 = 0.45^{+0.44}_{-0.45}$  という予備的な結果を得ることに成功した。これを同年7月31日の第30回高エネルギー物理学国際会議で発表し, 国際的に高い評価を得た。この結果は, まだデータ量が十分ではないが, 小林・益川理論と矛盾していない。Bファクトリーのビーム強度の増加に伴い実験精度は向上するので, よりはっきりとした結論が出るのは時間の問題である。一方, 同計画研究第2の目的である高精度2次元位置測定器ピクセル検出器の開発についても, その開発項目のほとんどすべてを終了し, 第2世代シリコン検出器の設計がほぼ完了している。本申請は, この開発研究の成果に基づき, Bファクトリーでの第2世代シリコン検出器実機の製作経費を主たる経費として申請している。Bファクトリーでの実験は予定どおりに進んでおり, 実験装置の精度をより高いものにすることによって標準理論を超える現象を発見したい。

(2) 文部省日米科学技術協力事業

期間：平成8－12年度

研究課題名：「ピクセル検出器の開発」

研究者氏名：相原博昭, 田島宏康, Kevin Einsweiler (Lawrence Berkeley Laboratory)

研究経費：125,000千円

米国カリフォルニア大学バークレーの高エネルギー物理研究所と共同して, ハイブリッド型ピクセル検出器の組み立てと読み出しLSIの耐放射線化の研究を行った。その結果, ハイブリッド型ピクセル検出器のバンプボンドによる組み立てが可能になった。また, LSIの耐放射線性が劇的に向上し, 約20 Mrad相当の $\gamma$ 線照射まで稼動するLSIの製作に成功した。

## (3) 財団法人交流協会補助金日本台湾共同研究事業

期間：平成11年度

研究課題名：半導体を使用した放射線検出器の開発

研究者氏名：相原博昭, 田島宏康, Wei-Shu Ho (台湾大学)

研究経費：8,000千円

浜松ホトニクスと協力して漏れ電流が少なく、かつノイズの少ないシリコンストリップを開発した。

## (4) 財団法人交流協会補助金日本台湾共同研究事業

期間：平成12年度

研究課題名：超細密半導体技術を使用した放射線検出器の開発

研究者氏名：相原博昭, 田島宏康, Wei-Shu Ho (台湾大学)

研究経費：6,500千円

第2世代シリコン検出器製作に不可欠な超細密細線を使ったカプトンケーブルを試作した。

## (5) 科学研究費補助金・基盤(B)(一般)

期間：平成12-14年度(継続中)

研究課題名：大強度衝突型加速器実験用シリコン・ストリップ検出器信号読み出しLSIの開発

研究者氏名：田島宏康, 田中真伸

研究経費：3,100千円

シリコンストリップ読み出しLSIに、トリガー機能を有する高速アンプとデジタル制御回路を装着した新しいLSIを開発した。

以上の開発研究によって、第2世代(擬ピクセル型)シリコン検出器実現に必要なコンポーネントの開発はすべて完了しており、いつでも実機製作にとりかかれる体制を整えた。さらに、我々は、特定領域でのCP非保存測定の結果に基づき、次のステップである超対称現象の測定にとりかかれる段階に到達している。

## 計画研究A3関係

(1) 科研費： 特定領域研究「CP非保存の物理」 / 期間： 平成9年度-平成12年度  
課題名：A03班「CP非保存と物質宇宙の起原についての理論研究」  
研究者氏名： 三田一郎 (総括班代表者ならびに研究班A03代表者)、  
研究経費：平成9年度 平成10年度 平成11年度 平成12年度 総括班 17、900 16、600 18、400 10、000  
研究班 A03 19、200 18、300 20、000 2

0、000 研究経過・成果：小林・益川理論は B 中間子崩壊で大きな CP 非対称性の存在を予言する。実験研究分野は、高エネルギー物理学研究所およびスタンフォード線形加速器研究所で B ファクトリーを建設し、これを確認、精密測定する。われわれは、CP 破れの機構を理論的に解明することを目指す。具体的には、PQCD をもとに B の二体崩壊を計算する手法が有望であると判断し、PQCD の研究を進めた。B → ππ、Kπ、Dlν、πν、σπ、DK など B 中間子の 2 体崩壊過程を PQCD で計算した。B → Kπ では、ペンギン・グラフから来る annihilation diagram が大きく寄与し、それが final state interaction phase を生ずることを発見した。この成果は、世界で注目を浴びている。

(2) 科研費： 特定領域研究「CP 非保存の物理」 / 期間： 平成 9 年度－平成 12 年度 課題名： 「直接的 CP 非保存の研究」 研究者氏名： 大島 隆義 (研究班 A02 代表者) 研究経費： 平成 9 年度 平成 10 年度 平成 11 年度 平成 12 年度 51,900 57,000 59,500 32,600

研究経過・成果： 特定領域 A02 班代表者として、名大グループの責任者として、Belle にて直接的 CP 非保存を検出すべく B → DK, Dπ, Kπ 事象の解析、new physics 探索として稀崩壊反応 B → K + K + π- の研究などなど、また、タウ解析グループのリーダーとして本申請書に記した各種の解析課題を進めている。「研究業績」にリストしたように、これらの成果を論文発表、国際会議発表した。TOP counter を発案し、その実用化を目指し開発中である。この過程において光検出器の開発をも行い、非常に高く評価される成果を挙げた(「業績」参照)。

(3) 科研費： 基盤研究(C) / 期間： 平成 12 年度－平成 15 年度 課題名： タウ粒子の崩壊過程における CP 非保存現象の研究 研究者氏名： 林井久樹 研究経費： 平成 12 年度 230 万円 研究経過・成果： Belle 検出器で最初の 1 年で収集した(6 fb<sup>-1</sup>) のデータを用いて、τ → ππ<sub>0</sub>ν 崩壊における CP 非保存現象の探索を進めている。これまで得られた破れの上限值の値は、8 月に大阪で開催された高エネルギー国際会議への投稿論文としてまとめた。また、アメリカ物理学会(DPF 2000) および タウ・レプトン国際会議(TAU 2000) でも発表した。今後さらに統計を積んでより詳しい探索をすすめる予定でいる。

## 計画研究 A5 関係

### 1. 「K 中間子稀崩壊実験のための高速波形解析法の研究」

平成 5-7 年 科研費一般 (B) 7,200 千円 [杉本 (代表者) 他]

BNL-E787 実験装置に組込んだ CsI-エンドキャップ γ 線検出器での多重粒子の高速波形分離法の開発を行い、その成果を平成 7-10 年 ('95-'98)

のBNLでの稀崩壊モード  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の実験と解析に反映させた。

2. 「大強度粒子工場における反陽子・K中間子実験に関する調査研究」

平成7,8年科研費 国際学術(学術調査) 3,300千円, 3,600千円 [杉本(代表者)他]

K中間子稀崩壊物理の実験計画を日米欧で検討し, 数回のワークショップにて将来の国際協力・分担についての方向を定めた。1999年に, 日米加露による国際共同実験グループが結成され, BNLにて平成12年-14年に E949実験(E787の後継実験)を行うことになったのは, この調査研究以降続く研究交流の成果と言えよう。

3. 「静止  $K^+$  崩壊実験用密閉型検出器の開発」

平成9-11年科研費基盤(B)(2) 8,400千円 [杉本(代表者)他]

$K^+$  静止崩壊実験の改善をめざして全立体角にわたり一様でアクティブな物質を持つ高速検出器の開発を行なった。その成果はBNL-E949実験装置の改善にあたり貴重な情報を与えた。

4. 「BNLにおける  $K^+$ 稀崩壊モード  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の検出実験」

平成4-12年度日米科学技術協力事業(高エネルギー分野)

平成12年度 50,000千円(E949改造費の一部) [杉本(代表者), 小松原, 小林, 他]

我々は1981年にKEKでの実験結果  $[(1.4 \times 10^{-7})(\text{UL}:90\% \text{ C.L.}) \text{ Asano et. al}]$  を出版した後, 平成4年度(1992)から平成10年までBNLにて日米共同研究として Upgraded-E787(BNL/Princeton/Triumf) 実験を行った。平成9年には初めて1事象の発見に成功し, 現在解析中のデータ量は感度  $(0.7-1) \times 10^{-10}$  に達している。平成11年度から次期の実験E949のために検出器改造(日本グループは $\gamma$ 線検出器, 高速判定トリガーシステム, モニターシステム, モンテカルロ等を分担)を行い, 来年6月から実験を再開する予定である。

## 4 特定領域研究を推進するにあたっての基本的な考え方

本特定領域は、8つの計画研究（実験7＋理論1）と2の公募研究とからなる。実験の5つの計画研究（A1-5）は、現存する国内外の粒子ファクトリー加速器（トッポファクトリー、Bファクトリー、Kファクトリー）を使って「質量の起源と超対称性物理」に迫ろうとするものである。それぞれのファクトリーの長所をいかすと同時に、計画研究間の連絡を密にして、データ中に隠れている「標準理論からのずれ」を特定できるよう総合的な解析を行う。理論研究（A8）は実験データをもとに、どのような事象に注目すべきか、現在の測定値からどのような理論的考察ができるかなどについて、実験グループに対して適切かつ迅速なフィードバックができるよう留意して独創的研究を推進する。実験、理論ともに公募研究をそれぞれ一つずつ設ける。実験分野では、将来の高エネルギー加速器実験（超高エネルギー線形衝突型加速器 JLC, 陽子陽子衝突型加速器 LHC, ミューオンコライダー, ニュートリノファクトリーなど）に備えるための新しい実験技術の開発、加速器を用いた実験の提案、さらに新しい加速器技術の開発などについて公募を行う。理論分野では、これらの加速器実験で期待される新しい素粒子物理についての現象論的研究を広く公募する。総括班は、本領域の運営が円滑に進むよう研究者間のコミュニケーションの徹底と学会や一般社会への情報の開示に努める。



## 5 特定領域研究の内容

### 5.1 総括班：質量起源と超対称性物理の研究計画調整

班長	金 信弘	筑波大学物理学系	教授	素粒子実験
	相原 博昭	東京大学大学院理学系研究科	助教授	素粒子実験
	大島 隆義	名古屋大学大学院理学研究科	教授	素粒子実験
	山口 晃	東北大学大学院理学研究科	教授	素粒子実験
	杉本 章二郎	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	教授	素粒子実験
	稲垣 隆雄	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	教授	素粒子実験
	山中 卓	大阪大学大学院理学研究科	助教授	素粒子実験
	野村 正	京都大学大学院理学研究科	助手	素粒子実験
	日笠 健一	東北大学大学院理学研究科	教授	素粒子理論
	三田 一郎	名古屋大学大学院理学研究科	教授	素粒子理論
				以上 10名

総括班は4年間におよぶ本領域研究の実施期間中に各研究の調整をとり、とくに実験研究について指揮をとると同時に、理論と実験の密接な交流をはかる。研究会等のミーティングを実施し報告書を適宜編集しコミュニケーションと情報の開示を統括する。

## 5.2 計画研究 A1：高エネルギー陽子・反陽子衝突によるヒッグス粒子の探索

代表	金 信弘	筑波大学物理学系	教授	素粒子実験
	滝川 紘治	筑波大学物理学系	教授	素粒子実験
	受川 史彦	筑波大学物理学系	助教授	素粒子実験
	原 和彦	筑波大学物理学系	講師	素粒子実験
	清矢 良浩	筑波大学物理学系	講師	素粒子実験

以上 5 名

米国フェルミ研究所におけるテバトロン陽子・反陽子衝突型加速器を用いて、CDF 実験グループは 1985 年の初衝突以来、世界最大の重心系エネルギー 1.8 TeV での陽子・反陽子衝突実験を遂行してきた。1996 年 2 月に物理ラン I (Run-I) を終了し、現在テバトロンではビーム輝度を 10 倍以上増強するための入射器の大幅な改良を完了した。この加速器性能の増強と平行して CDF 検出器の飛跡検出器、端冠部カロリメータ、前後方ミュオン粒子検出器など多くの部分や DAQ システムなどを増強した。2001 年春に始まる物理ラン (Run-II) ではトップクォーク生成崩壊の精密測定や、B システムでの CP 非保存の測定、軽いヒッグス粒子や超対称性粒子などの探索に成果が期待される。CDF 日本グループはビームパイプに最も近い、SVX-II と ISL の 2 つのシリコン飛跡検出器、端冠部電磁カロリメータ、端冠部プリシャワーカウンター及び TOF カウンターの製作を分担し、米国やイタリアの研究者と共同で製作した。また現在新たに計画中の高放射線耐性シリコン飛跡検出器の開発研究にも携わっている。RUN-II での物理目的を計画どおり達成するためには、これら CDF 検出器の増強を予定どおり完了させることが重要である。特に 2003 年以降に使用される高放射線耐性シリコン飛跡検出器を製作すること、CDF の事象再構成プログラムを整備すること、さらに RUN-II での物理解析のためのソフトウェアを開発することはとりわけ重要である。これらを計画通りに遂行し、速やかに物理解析を行って質量起源の粒子、ヒッグス粒子を探索することがこの研究の目的である。

本計画研究の研究計画・方法は以下の通りである。研究は、米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突型加速器テバトロンおよび CDF 検出器を用い、陽子・反陽子衝突によって生じる  $B$  粒子の崩壊を再構成し、その性質を調べることによって行う。テバトロンは 1996 年以降の増強により、瞬間輝度  $\mathcal{L} = 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  および重心系エネルギー 2 TeV を達成する見通しである。また、CDF 検出器も高輝度に対応するための大幅な増強がなされ、現在衝突ビームを用いて試運転を行っている。2001 年春より本実験が開始され、2 年程度の期間に積分輝度  $\int \mathcal{L} dt = 2 \text{ fb}^{-1}$

に相当する衝突事象が取得される。これはこれまでのデータ量の 20 倍に当り、数多くの成果が期待される。

#### 平成 14 年度

高放射線耐性シリコン飛跡検出器に用いるシリコン・センサーの大量生産を行う。この生産時には、企業と協力して品質検査を行う。このシリコン・センサーをフェルミ研究所に送り、そこでシリコン飛跡検出器に組み上げた後に再度検査を行う。この組み上げと検査は米国側研究者と共同で行う。検出器の製作と平行して、事象再構成プログラム、B 同定のプログラムを完成させ、2001 年春から収集されるデータの解析を進め、目的で述べた物理の解析のみに保存のための検討を行う。物理データは本研究費で購入するファイルサーバーする。プログラムの完成、物理の検討は現有の筑波大学の計算機と新たに購入予定のパソコンを用いて行なう。年度末までには  $1.1\text{fb}^{-1}$  程度のデータが取得される見込みである。本計画研究は、CDF 実験グループの他のメンバーとも密に協力して進める。その為に、月一度位の頻度で研究状況をまとめて議論するミーティングをテレビ会議を用いて行う。

#### 平成 15 年度

引き続き衝突データの取得を行う。年度末までには計  $2\text{fb}^{-1}$  の衝突事象が蓄積される。この大量のデータの処理・解析のため、パーソナル・コンピュータを追加し計算能力を増強する。図 1 に示されるようにヒッグス粒子の質量が  $120\text{GeV}/c^2$  以下であれば、95% の信頼度で検出できる。

#### 平成 16 年度

一旦データ取得を休止して、高放射線耐性シリコン飛跡検出器を CDF 検出器に設置する。その後引き続き衝突データの取得を行う。年度末までには計  $3.8\text{fb}^{-1}$  の衝突事象が蓄積される。この大量のデータの処理・解析のため、パーソナル・コンピュータを追加し計算能力を増強する。図 1 に示されるようにヒッグス粒子の質量が  $130\text{GeV}/c^2$  以下であれば、95% の信頼度で検出できる。

#### 平成 17 年度

引き続き衝突データの取得を行う。年度末までには計  $7\text{fb}^{-1}$  の衝突事象が蓄積される。この大量のデータの処理・解析のため、パーソナル・コンピュータを追加し計算能力を増強する。図 1 に示されるようにヒッグス粒子の質量が  $180\text{GeV}/c^2$  以上であれば、95% の信頼度で検出できる。

### 5.3 計画研究 A2：B ファクトリーを用いた質量起源の探求

代表 相原 博昭 東京大学大学院理学系研究科

助教授 素粒子実験

田島 宏康 東京大学素粒子物理国際研究センター 助手 素粒子実験

以上 2 名

本計画研究の目的は、KEK B ファクトリーでの実験の第二段階として、この標準理論の先にあると思われる、より基本的な物理法則についての手がかりを得ることにある。標準理論は、個々のフェルミオンの質量が、なぜ現在観測されているような値になっているのかを説明することはできない。さらに、最近のニュートリノ実験が強く示唆するゼロでない有限な値のニュートリノの質量は、ニュートリノは質量をもたないと仮定する標準理論に、その変更を迫っている。我々の研究は、個々のフェルミオンの質量はどのような原理・法則のもとに決まっているのか、これを説明する標準理論の先にあるより基本的な物理法則の発見を目指して、新しい物理が出現すると期待されている B 中間子の稀な崩壊過程を、現在の実験装置の約 2 倍の分解能を持つ装置を使って精密測定することを目的としている。特に、より基本的な物理法則として期待されている、フェルミオンとボゾンの間の対称性に基づく「超対称性理論」の予測する B 中間子の崩壊モードの精密測定を研究期間内の第 1 の目標としている。

我々が、過去 5 年間にわたって開発研究を続けてきたピクセル検出器を用いると、B 中間子の崩壊点を約  $50 \mu\text{m}$  の精度で測定することができる。これは、現行の検出器の精度を 2 倍以上向上させたもので、その結果 B 中間子崩壊によって生成したチャーム中間子などの崩壊点の同定も可能である。このため、B 中間子崩壊の中で、超対称性理論の効果が現れると予測されている崩壊モード ( $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ ,  $K^* e^+ e^-$ ,  $X_s \gamma$ ,  $X_d \gamma$  など) のデータに含まれるバックグラウンド (主に、チャーム中間子) を取り除いて、データの S/N 比を飛躍的に向上することができる。その結果、きわめて稀にしか発生しない超対称性反応の検出が他の実験に先駆けて初めて可能になる。もし逆に、この結果超対称性反応が検出できなければ、超対称性理論に大きな制約を課すことができる。

KEK の B ファクトリーは、世界最大のビーム強度を達成しており、スタンフォード大の同型加速器と並ぶ世界最高の性能を誇っている。次の 5 年間で稼動する加速器は、これら 2 つの B ファクトリーと、米国フェルミ研究所の陽子・反陽子加速器において他にはなく、標準理論を超える新しい物理の研究に、わが国の高エネルギー加速器実験が大きな寄与をすることができる。我々のグループは、B ファクトリーを使って、B 中間子における CP 非保存現象についてすでに国際的に評価の高い結果を

出してきた。KEKのBファクトリーに、我々の開発した高い位置分解能を有した次世代荷電粒子崩壊位置検出器を導入すれば、B中間子物理を生み出す独壇場となるだけでなく、今後の素粒子物理学の方向を決める重要な結果を得ることができると確信している。

#### 平成14年度

- 擬ピクセル検出器に基づく、B中間子の第2世代崩壊位置検出器を完成し、宇宙線による性能試験を重ねた後、Bファクトリーのビームラインに設置する。そのうちBファクトリーのビームを使って、検出器のアラインメント（位置出し）を行うとともに、位置分解能を宇宙線や電子陽電子弾性散乱 (Bhabhar scattering) を使って測定する。同時に、Bファクトリー実験装置 (Belle) の各検出器との調整を行う。また、Bファクトリーから擬ピクセル検出器に放出される放射線（主に、 $\gamma$ 線）バックグラウンドを、ビーム衝突点近傍に設置した放射線モニター（小型PINダイオードで製作したもの）で測定し、Bファクトリーのビームの調整を行う。
- 標準理論が予想するCP非対称なB崩壊モードについての測定を完了させ、ユニタリー三角形の測定を完了する。三角形の内角の和が、 $\pi$ になるかどうか、B中間子のCP非保存現象の起源が標準理論のみにあるのか、それとも超対称性のような新しい物理を必要とするのかを知る第一歩となる。
- 標準理論では、CP非保存が予想されておらず、超対称性の効果が出現すると期待されているB中間子の崩壊モード ( $B^0 \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ ,  $\phi K_S$ ,  $X_s \gamma$ ,  $X_d \gamma$ ) について、部分崩壊幅の測定など、予備的な測定を行う。
- 大面積シリコントラッカーの製作を行う。

#### 平成15年度

- 擬ピクセル検出器を用いて  $B^0 \rightarrow \phi K_S$  と  $\bar{B}^0 \rightarrow \phi K_S$  の崩壊時間分布の精密測定を行う。この崩壊モードは、超対称性の効果に敏感な反応として期待されている反応である。
- $B^0 \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ ,  $X_s \gamma$ ,  $X_d \gamma$  について高統計測定を行うとともに、擬ピクセル検出器を使って、チャーム中間子によるバックグラウンドの排除をより一層進める。標準理論から予想されるこれらの反応の分岐比  $10^{-6}$  を十分に観測できる感度を達成できる。超対称性理論が正しければこれらの反応の断面積が大きくなるだけでなく、CP非対称性も出現する。

- 大面積シリコントラッカーを完成させ、擬ピクセル検出器の外側に設置する。
- チャーム中間子崩壊におけるCP非保存: CPの混合状態である  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  崩壊とCPの固有状態である  $D^0 \rightarrow K^- K^+$  崩壊への寿命の差を測定すると  $D^0$  中間子におけるCP非保存現象を測定することができる。標準理論の予想は0であるが、超対称性は有限値を与える。このモードの高精度の測定を行う。

#### 平成16年度

- $B^\pm \rightarrow \tau^\pm \nu$  の測定: このモードの分岐比に対する標準理論の予想値は、 $10^{-5}$  であるが、超対称性理論などの新しい物理の存在はこの分岐比を増加させる。
- 以上の測定を通じて、超対称性理論現象についての手がかりをつかむ。あるいは、超対称性理論に対して、これまでの実験では得られなかった強い制限を与える。いずれの測定においても、第2世代シリコン検出器（ピクセル検出器）の存在が不可欠である。

#### 平成17年度

- これまでに得たBファクトリーのデータすべてを用いて、標準理論の self consistency（自己無矛盾性）を理論グループとともにテストする。標準理論の質量生成機構（ヒッグス機構）がB中間子崩壊の精密データと矛盾しないかどうか多自由度最尤法 (Multi-parameter Maximum Likelihood Method) による解析を行う。もし矛盾がなければ超対称性を含む新理論に強い制約を課すことができる。逆に、もし矛盾が明らかになれば素粒子論の基盤を揺るがす発見となる。
- 超対称性現象直接探索の総括を行う。

## 5.4 計画研究 A3：タウレプトンの物理

代表	大島 隆義	名古屋大学大学院理学研究科	教授	素粒子実験
	三田 一郎	名古屋大学大学院理学研究科	教授	素粒子理論
	千代 勝実	名古屋大学大学院理学研究科	助手	素粒子実験
	林井 久樹	奈良女子大学理学部	助教授	素粒子実験
	山口 晃	東北大学大学院理学研究科	教授	素粒子実験
				以上 5 名

レプトンでの CP/T 非保存の探索、稀崩壊 ( $\tau \rightarrow \mu \gamma$ 、neutrinoless 3 charged particle による LFV, LNV の研究) の探索などは、Higgs 粒子、超対称性モデルなど現在の標準理論を越える理論の観点から大いに期待されている課題である。ベクトル粒子の磁気双極子モーメント (MDM) の検出は、未だデータもなく、実験結果は SU(3)、クォーク・モデル、WW  $\gamma$  との関連で新たな理論的関心を引き起こすと期待されている。物理研究は、各課題ごと申請者等が責任者となり、Belle のタウ解析グループの一貫として、共同研究のもとで進める。具体的には、CP/T 非保存の研究は、大島、千代 (名大) が  $e^+e^- \rightarrow \tau^+\tau^-$ ;  $\tau \rightarrow e/\mu \nu \nu$  の反応を、林井 (奈良女大) が  $\tau \rightarrow \pi \pi \nu$ 、 $K \pi \nu$  崩壊を分担する。稀崩壊は山口 (東北大) が、MDM やテンソル型相互作用の探索は大島、千代 (名大) が中心となり進める。理論面については、三田 (名大) が担当する。一方、TOP counter は、他の箇所でも記述したように、全く独自の発案であり、DIRC 検出器のアプローチ法よりも、コンパクトで製作が簡単で、かつ高い識別力を有する。名大が中心となり開発を進めるが、奈良女大、東北大は各大学拠点で研究分担部を遂行するとともに、ビームテストなどの共同作業は全体で行う。また、浜松フォトンクス (株) との光検出器の開発研究も名大グループが中心となりながら、全体で行う。

研究課題を、以下の 3 つに分類する。(1) 標準理論の検証、(2) レプトン・セクターの CP/T 非保存または不変則を高い感度で探究し、標準理論を越える新しい物理を探る。純レプトン過程でのこの研究は、未だ試みられたことのないユニークな探究法である。(3) 稀崩壊や崩壊禁止事象の検出を行い、新しい物理の発見を試みる。このなかでも、われわれが最も重点を置き、最も興味をもつ課題は、(2) と (3) である。具体的には、

(1) レプトン結合常数 ( $\mu e$ ,  $\mu \mu$ ,  $\mu \tau$ ) の不変性 (lepton universality), 寿命と崩壊比の関係, 崩壊様式を規定するミッチェル・パラメータなどの高精度測定を行う。また、タウの hadronic 崩壊の研究から、保存ベクトルカレント (CVC) 理論の研究, ストレンジ・クォーク質量  $m_s$  の抽出, 強い結合常数  $\alpha_s$  の抽出, タウ・ニュートリ

ノ質量  $m_\nu$  の導出など、基本的物理の遂行を計画する。ここでは、特に、ベクトル粒子の磁気双極子モーメント (MDM) のはじめての測定を試みることを中心課題とする。(大島)

(2) 神岡グループの測定からニュートリノには質量があり混合 (mixing) がある。クォーク・セクターに混合角があり、CP 位相があれば、レプトン・セクターにも同様に CKM 行列を考えるのは極く自然である。しかし、ハドロンと違い、標準理論では荷電レプトン崩壊は W 媒介のダイアグラムのみが効き、振幅間の相互作用がない。したがって、CP/T 非保存の検出は新しい物理の存在を指し示すものである。標準理論を越えるニュートリノ振動の新しい物理は、必ず荷電レプトン崩壊にも顔を出すと信ずる。純レプトン過程においては、これまで  $\mu \rightarrow e \nu \nu$  の偏極度測定から 3% の感度で CP 非保存を研究したものが唯一である。われわれは「従来の研究成果」で報告するように、KEKB/Belle において  $e+e \rightarrow \tau + \tau^-$ ;  $\tau \rightarrow e/\mu \nu \nu$  の反応過程を測定し、triple momenta correlation の観測量を吟味して、すでに、このレベルを越える成果 (0.5% @90% CL with 6 fb<sup>-1</sup>) を得ている。本研究においては、ルミノシティの増加ならびにタウの純レプトン崩壊、準レプトン崩壊 ( $\tau \rightarrow \pi/K \nu$ ,  $\sigma \nu$ ,  $A1 \nu$  など) のあらゆるモードに焦点を当て、総体的に感度を 2 桁 O(0.01%) 向上させることを目指す。この研究手法では、親粒子が荷電粒子である利点を活かし、CP/T/CPT 不変則を別個に検証できるのも自慢である。この研究は、また、点粒子であるタウレプトンが電気双極子モーメント (EDM) を持つか否かを検証するものとしても位置付けられる。(大島、三田、千代) また同時に、CP 非保存は、 $\tau \rightarrow \pi \pi \nu$ ,  $K \pi \nu$  などの角度分布の非対称としても現れる。この研究もすでに軌道に乗っており、 $\tau \rightarrow \pi \pi \nu$  では  $\text{asym} < 1.6\%$  at 90% CL の成果を挙げている。統計精度の向上により感度を大きく更新するとともに、 $K \pi \nu$  などの他の反応の研究へと発展させる計画である。(林井)

(3) Lepton Flavor Violation  $\tau \rightarrow \mu \gamma$  はまさに上記 (1) に対応するものであり、new physics が期待される  $\mu \rightarrow e \gamma$  と物理的に同程度の感度 ( $\text{BR} = 10^{-(7-8)}$ ) を持ち得る。LFV ならびに Lepton Number Violation など稀崩壊を現上限値 ( $10^{-(5-6)}$ ) を上回る感度 ( $\text{BR}_i 10^{-7}$ ) で探索する。ただし、バックグラウンド事象が完全に除去できない領域に入りはじめる難しさがあるが。われわれは、すでに  $\text{BR}(\tau \rightarrow e/\mu K_S)$  を従来の感度の 1,000 倍更新し、 $\text{BR}_i 8 \times 10^{-6}$  (at 90% CL) の上限値を得る成果を挙げている。(山口) また、上記 (3) の特徴を活かし、テンソル型、スカラー型相互作用を広範囲に亘り探索する。特に、 $\tau \rightarrow K^*(1420) \nu$  など直接テンソル共鳴状態の存在を調べるアプローチを試みる。 $K \rightarrow \pi (e/\mu) \nu$  崩壊などでは、 $q^2 (< 0.2 \text{ GeV}^2)$  が小さい上、レプトンのエネルギースペクトルの歪みを調べる手法をとるが、resonance の存在の有無を調べる方が遥かに感度ならびに信頼性高く研究できる利点がある。(大島、千代)

B ファクトリーはタウ・ファクトリーでもある。CP 非保存の研究を B 中間子か



らレプトンへと展開することにより、KEKB/Belle 実験を発展させ、果実を確実に採り入れたい。隔年に開催される今年の TAU 2000 会議 (Victoria, Canada) では、Belle ならびに Babar の両 B ファクトリー実験の今後の研究成果を大きく期待する由、声明された。さらに、タウ物理の牽引的役割が、出席研究者達から待望された。Belle 実験への期待は大きく、2004 年の会議開催も要請されている。本特別推進研究により、われわれの研究活力を一層活性化させ、上記課題の成果を挙げる。

平成 14 年度 KEKB/Belle 実験を継続し、ルミノシティーの蓄積を続ける。物理解析を並行し進める。特に、KOLARB/TAUOLA を書き換え、新しい物理機構を採り入れる作業が必要不可欠となる。初期の成果として、CP/T 非保存や稀崩壊の論文発表を目指す。TOP counter のテスト機ならびにテストベンチを奈良女、東北大に準備 (高額備品を含む)。名大では、TOP counter の光学特性の詳細測定と宇宙線テストを計画する。また、光検出器の改良品の検討と複数異型の発注 (高額消耗品) を行い、それらのテストを行う。タウ物理解析においてはディスク・システムの補強が必要。但し、安価に、かつより容量の大きいディスクを入手するため、各種エレメントを購入し、自分達で組み立てる方針である (高額消耗品)。MDM などの論文発表を計画する。TOP counter に関しては、改良型の作成 (高額消耗品) や宇宙線、ビームテストを繰り返す。光検出器では HPD/HAPD (高額消耗品) をも開発対象にする。読み出し回路系の設計、製作の開発 (名大、東北大) を行う。

平成 15 年度 TOP counter に関しては、基礎的な開発を終え、Belle 実験に特定した構造のものの検討、設計、製作 (高額消耗品) に入る。幾種類かの実機 (高額消耗品) を作成し、ビームテストをくり返す。光検出器の開発も随分と進展していると考えるので、量産時の問題点の解決を計る。読み出し回路系のコンパクト化、多チャンネル化を計り、プロトタイプの作製を行う。

平成 16 年度タウ物理解析においてはディスク・システムの補強を行う。新しい物理課題の開拓とそれらの論文発表を行う。TAU 2004 会議の開催を計画する。TOP counter は、実機の大量生産に入る (高額消耗品)。回路系も相当する量産へ入る (高額消耗品)。

平成 17 年度基本的には前年度と同じ。しかし、タウ物理も新しい段階へと移行する時期になると推測する。それまでの、進展をもとに次世代へ如何に飛躍するか、を課題とする。TOP counter は、大量生産から Belle への装着作業へと移行する。

5.5 計画研究 A4: Kファクトリーを用いた  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊の測定

代表	山中 卓	大阪大学大学院理学研究科	教授	素粒子実験
	羽澄 昌史	大阪大学大学院理学研究科	助手	素粒子実験
	原 隆宣	大阪大学大学院理学研究科	助手	素粒子実験
	稲垣 隆雄	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	教授	素粒子実験
	佐藤 任弘	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	助教授	素粒子実験
	Lim Gei Youb	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	助手	素粒子実験
				以上 6名

( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ) の崩壊は、その観測が非常に難しく、それに対応する手法が種々考えられ、専門家間で議論が尽くされた。その結果、中間エネルギー、高エネルギーおよび低エネルギーの3種類のKファクトリーを用いて、平行実験を進めるのが最も確実で、かつ相互に結果をつきあわせる事ができる点でも信頼度が高くなるとの結論に至った。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊は、理論的に明快で物理的意義は大きいが、実験的には非常に難しいと言われてきた。そこで我々は段階的に実験を行うことを計画している。現存するKEKの陽子加速器を使うE391a実験では標準理論の予測値近くまで接近し、その後計画中の原子力研究所との統合計画(JHF)に盛り込まれた世界最強の陽子加速器を使っての高精度実験を目論んでいる。

E391a実験では新しい実験装置を設計し建設中である。タングステン製のコリメータを多段に設置するビームラインは1999年度に完成した。これによって中性ビームをペンシル状に細く絞り、 $\pi^0$ 粒子の横方向運動量を求め、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊と競争過程を分離しようとしている。他の崩壊との分離をさらに向上させるために、 $K_L$ 崩壊の指定領域は上・下流のバレルカロリメーターで囲われている。下流のエンドプレートには沃化セシウム結晶製のカロリメーターを設置し $\pi^0$ 粒子が崩壊して出来る2つの $\gamma$ 線のエネルギーと位置を精密に測定する。

E391aは1997年にKEK-PACで承認され、ビームラインは1999年度に完成した。今2000年度には上流バレル、2001年度には下流バレルを完成させ、2002年度前半に組み上げ、年度後半に測定を開始する予定を組んでいる。このスケジュールは世界の他の計画に比べて格段に早い。世界的な競争に勝ち統合計画での実験を成功させるという戦略に基づいたものであるが、現実にはこれまでのKEKの実験で使った測定器を出来るだけ有効に再利用することで早期立ち上げを実現しようとしている。又、逆に、E391aでは主としてビームラインと100トンを超える上・下流バレルを製作し、統合計画ではこれらを再活用しようと考えている。

E391aで再利用するものの中で、沃化セシウムとADコンバーターは性能的に見

て統合計画では使えない。 これらをより高性能なもの（フッカセリウム結晶や波形変換型 AD コンバーター）へ置換する為の基礎研究も進んでいる。 本科学研究費からの援助は、この様に段階的に実験を進める上で不可欠なものである。 この間に前半部では E391a 実験でも計数率の高いビーム軸周辺でフッカセリウム及びフッカ鉛結晶の使用を試み、中盤でフッカセリウム結晶の製作、後半で波形変換型 AD コンバーターの製作を行うという計画である。

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  の分岐比については、1987-8年のデータをもとに  $< 2.2 \times 10^{-4}$  の上限を与え、その後1991-2年のデータをもとに一桁上限値を改善し、1996-7年に行った KTeV 実験においてさらに二桁改善した  $< 5.9 \times 10^{-7}$  の上限値を得た。これらはいずれも、世界一の値である。また、この崩壊を約100事象以上観測する KAMI 実験に備えて、必要となる基礎的な測定器の試験も行ってきた。特に、問題となる光核反応による不感度を測定するために KEK の稲垣氏らと共同で実験を行い、鉛・シンチレータの積層のガンマ検出器を用いても、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  からくる背景事象を抑えることができることがわかった。さらに、2000年には、KTeV の実験装置とビームラインを用いて、通常の 800GeV の陽子ビームの代わりに、KAMI に近い 150GeV の陽子ビームを出し、生成される中性 K 中間子および中性子の数とエネルギースペクトルの測定を行った。これにより、K 中間子の数は予測とほぼ等しく、さらに中性子と割合は今まで予測していたより小さいことがわかった。また、幅広い K のエネルギーと種々の実験方法についてシミュレーションを行い、根本に立ち返って実験方法を検討し、高いエネルギーの K を使うことの重要性を確信した。

1997年には Fermilab、米国の大学と共同で、KAMI 実験の Expression of Interest を提出し、現在、R&D の予算が Fermilab より出ている。また、Fermilab より、2001年4月1日までにプロポーザルを提出するように要請されており、そのための作業を進めている。これにより、2001年6月の実験審議委員会を通し、2005年のデータ収集を目標に準備を進める。KAMI 実験では、約15 GeV という比較的高いエネルギーの K を用いる。この崩壊における主となる背景事象は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  が出る4つの光子のうち2つを見失うものである。上のいずれの実験も余分な光子を見つけることにより、この背景事象を6桁から8桁抑えるが、光核反応による不感度や、鉛とシンチレータの積層検出器が持つ固有の不感度は、光子のエネルギーが高いほど低い。したがって、複雑な測定器をならべるよりも、高いエネルギーの  $K_L$  を用いて根本的に光子に対する不感度を下げて背景事象を抑える方が有利であると考える。さらに、高いエネルギーのビームを用いると、アクセプタンスが高いので必要な K 中間子のビーム強度を下げられ、さらに測定器などに悪影響を及ぼす中性子と K 中間子の比を小さく抑えられるなどの利点も持つ。また、Main Injector は既に稼働しているので 120GeV-150GeV の陽子ビームは今でも出すことができ、KAMI

実験に用いるビームラインは現在の KTeV 実験と共通であり、CsI のカロリメータなどの測定器、実験ホールなど既存の施設を使える点でも、有利である。

平成 14 年度 KEK E391a 実験の準備および、データ収集開始。結晶の性能試験装置の製作。

FNAL KAMI 実験のためのガンマ線検出器、およびデータ収集システムの基礎開発。

平成 15 年度 KEK E391a 実験のデータ収集、および解析。統合計画に向けての測定器の製作。

KAMI 実験のためのガンマ線検出器の制作。データ収集システムの開発。

平成 16 年度

KEK E391a 実験のデータ収集、および解析。統合計画に向けての測定器の製作。KAMI 実験のためのガンマ線検出器の制作。データ収集システムの立ち上げ。

平成 17 年度

KEK E391a 実験のデータ解析。統合計画に向けての測定器の製作。KAMI 実験開始。

## 5.6 計画研究 A5：荷電および中性 K 中間子の稀崩壊の精密測定

代表	杉本 章二郎	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	教授	素粒子実験
	小林 正明	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	教授	素粒子実験
	小松原 健	高エネルギー加速器研究機構素粒子原子核研究所	助手	素粒子実験
	野村 正	京都大学大学院理学研究科	助手	素粒子実験
	笹尾 登	京都大学大学院理学研究科	教授	素粒子実験
				以上 5 名

小林益川行列の要素、 $|V_{td}|$  の大きさを測定するために、BNLでの E949 実験を行って、シグナルを数事象観測する。この物理実験を通して、より大強度  $K^+$  ビームを用いる実験手法の確立を、ハード・ソフトウェアの両面から行う。その後、Fermilab で CKM 実験を行い、約 100 事象観測することにより、 $|V_{td}|$  を約 5% の精度で決定する。100 個以上の  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  事象を検出する次世代  $K^+$  実験装置を設計するには、稀崩壊実験での豊富な経験と共に、数多くの R&D が必要である。このような事情からフェルミ研究所 (FNAL) の CKM グループ ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の飛行崩壊実験を提案中) は、1999 年に BNL の我々のグループ ( $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  の静止崩壊実験) に合流し、日・米・加・露の国際共同研究として E949 実験を行うことになった。

2001-2003 年に日米科学技術協力事業として行う予定の BNL/E949 の実験・解析と並行して、新たに、フェルミ研究所・日本・BNL を核とした R&D (次世代  $K^+$  実験装置開発) を進めることが真剣に議論されている。この大強度  $K^+$  ビームを用いるための開発研究を、科研費特定領域の計画研究としてぜひ行いたい。我々のグループは、稀崩壊実験用高感度  $\gamma$  線検出器や高速バーテックスカウンター開発に対して長い歴史を有しており、海外研究者からは共同研究を強く望まれている。ここで開発された大強度  $K^+$  稀崩壊測定装置に対する性能評価は、我々の BNL/E787 実験で得られる物理実験データも併用して、より信頼性のあるものとする事が期待される。

BNL における  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  実験は KOPIO と呼ばれる。この実験に対しては 2000 年春に米国 NSF (National science foundation) より予算も含めた実験許可が下りた。同年 6 月には第 1 回の "Cost Review" を受け、現在は R/D の位相に突入している。実験技術の観点から見ると、KOPIO 実験は次に述べるような著しい特徴を備えている。即ち事象毎 (Event-by-event) に、(1)  $K_L^0$  の運動量を測定する事が可能な事、(2)  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  崩壊により生じた 2 つの光子の 4 元運動量を (測定器分解能の範囲であるが) 完全に決定する事が可能な事である。こうした測定量を組み合わせれば非常に強力な運動学上の制約を事象に対して課す事が可能になり、2 つの光子以外に

崩壊粒子が検出されていないという条件を組み合わせれば、バックグラウンドを排除する強力な武器となると予想される。当然のことではあるが、こうしたことを可能にするにはそれに応じた実験技術上の「進歩」が要求される。

実験技術的な新たな「挑戦」は次の3点に集約される。(1) 陽子ビームにマイクロバンチと呼ばれる時間構造を施す事。これにより  $K_L^0$  に対する飛行時間測定を可能にする。(2) 光子に対しエネルギーのみならずその運動方向をも測定しうる「完全」光子検出器を製作する事。(3) 中性子を多く含んだビーム中に存在する光子に対して十分感度のある検出器を製作する事。(1) に関してはパルス幅 278psec のビームが実験により得られており、少しの改良で実験仕様を満たすと期待される。(2) についても標識付光子ビームによるテスト実験が行われ見通しが着く所にまできている。(3) の課題は我々京都グループが主として取り組んできた課題である。

我々は中性子に対して不感な光子検出器の開発に取り組んできた。現在まではアクリル・チェレンコフ・カウンターを主体とするカロリメーターを検討してきた。上記カロリメーターについては、原子核研究所(電子ビーム)および大阪大学核物理センター(中性子ビーム)においてビームテストを重ね、カウンターの性能を概ね理解できるようになった。実験結果を詳細に検討しているところであるが、実験で要請される性能をほぼ満足するものの性能的に十分余裕があるとはいえないのが現状である。従ってこの検出器の改良を試みている。同時にアクリルの代わりにエアロジェル・チェレンコフ・カウンターを主体にした光子検出器をも考察範囲に含めて検討している。これ以外にも我々は、真空中で稼動する高効率荷電粒子カウンターの検討を開始した。これらの準備は科学研究費(野村:平成11年度奨励研究)および日米科学技術協力事業(笹尾:平成10年度検出器開発)による。

平成14年度BNL E949実験のデータ収集。FNAL CKM実験の測定器の開発。

平成15年度BNL E949実験のデータ収集、及び解析。FNAL CKM実験の測定器の製作。

平成16年度BNL E949実験のデータ解析。FNAL CKM実験の測定器の製作。

平成17年度FNAL CKM実験開始。

## 5.7 計画研究 A6：ヒッグスセクターと超対称理論ダイナミックスの現象論的研究

代表	日笠 健一	東北大学大学院理学研究科	教授	素粒子物理学
	山口 昌弘	東北大学大学院理学研究科	助教授	素粒子物理学
	棚橋 誠治	東北大学大学院理学研究科	助教授	素粒子物理学
	諸井 健夫	東北大学大学院理学研究科	助教授	素粒子物理学
	山田 洋一	東北大学大学院理学研究科	助手	素粒子物理学
				以上 5 名

素粒子の標準理論が一応の確立をみてからすでに 20 年が経過した。この間、標準理論によって存在が予想されていた  $W$ ,  $Z$  粒子は発見され、最後のクォークとおぼしきトップクォークの存在も確認された。しかし、 $SU(2) \times U(1)$  対称性の破れの機構はいまだに解明されたとはいいがたい。破れの鍵を握るヒッグス粒子は未発見であり、クォーク、レプトンの質量の起源の手がかりも乏しい状況にある。これらの問題を解決するためには、標準模型を超える物理が要求されると考えられるが、超対称性はこの有力な候補である。現に、LEP/SLC の精密実験によって求められた 3 つのゲージ結合定数の値は超対称大統一理論の予想とかなりよい一致を示している。最小超対称模型においては、ヒッグス粒子の質量に対しきびしい制約があり、百数十 GeV より重くなることはない。さらに一般の超対称理論でも、大統一スケールまで理論が有効でありさえすれば、この質量の上限は大きく変わることはないことが指摘されている。一方、最新の電弱相互作用の精密測定データによれば、ヒッグス粒子の質量が 100 GeV 程度である可能性が高く、超対称理論の予想と一致している。今年の LEP での最高エネルギーの実験で 115 GeV 程度にヒッグス粒子が存在するかもしれない兆候が見いだされ注目を集めたが、これは未確認のまま実験は終了しそうである。仮に延長が行われたとしても、ヒッグス粒子の性質を明らかにすることは不可能である。この質量領域にあるヒッグス粒子を発見する可能性をもつ加速器は、現時点では米国フェルミ研究所のテバトロン・コライダーしかない。ところで、自然界が超対称性を持っているとすれば、既知の素粒子それぞれに対してパートナーとなる超対称粒子が存在しなければならない。これらの新粒子の質量は数百 GeV から数 TeV の程度であると予測される。現在までの実験でこれらの粒子が発見されていないことから、各粒子の質量の下限として 50 GeV から 200 GeV 前後の値が得られている。

ヒッグス粒子や超対称粒子を直接発見するには、できるだけエネルギー、強度の両面で最先端の加速器が必要であり、21 世紀初頭の 5 年間はテバトロンがこの役割を果たすことになる。一方では、直接生成することのできない粒子でも、その間接

的な影響がさまざまな素粒子過程に現れてくる可能性は十分に存在する。特に、Bメソン、Kメソンなどの崩壊における稀少過程は超対称粒子の寄与が重要になる有力候補である。もちろん、その効果を検出するためには従来以上の精密な実験が必要であるが、高エネルギー加速器研究機構やスタンフォード線形加速器センターで稼働を始めているBファクトリーや、テバトロンの固定標的モードのKメソン実験はこれを明らかにする能力を秘めている。

さて理論的には、超対称理論は数多くのパラメータを含む理論であり、それらを統合する背後の機構が何であるかが重要な問題である。古くから知られている最小超重力模型は詳しく研究されているが、最近ではそれに代わるものとして多様な可能性があることが指摘されている。ゲージ媒介機構、アノマリー媒介機構などはこの代表的なものであり、現象論的にも超重力模型とはそれぞれ異なった特徴を持っている。さらに革新的な考え方として、余剰次元のシナリオが提唱されている。これは4次元時空以外のコンパクトな空間次元が存在し、その大きさが $10^{-18}$  mより大きく、重力の強さは従来の常識よりはるかに強いTeVスケールの結合定数を持つというもので、現象論的にはさまざまな新しい効果が期待される。このタイプの模型はさまざまなバリエーションがあるが、そのダイナミクスは不明な点が多く、これからの研究に待つところが多い。このように超対称模型にも理論的にいろいろな可能性が検討されており、現象論的にはかなり異なったふるまいを示すわけであるが、模型に対する制約としては直接実験から得られるものの他に、宇宙論、天体物理からの制限も模型によってはかなり重要になってくる。

本研究では、今まで述べてきた視点に基づき、ヒッグスセクターおよび超対称模型に関して、そのダイナミクスの解明と宇宙論的考察、そしてその現象論的な帰結を明らかにすることであり、これによって上に挙げた最先端の加速器実験における解析方法、実験結果の解釈の指針を与えるとともに、将来に対する展望をひらくことを目的とする。具体的には、

(1) 加速器実験における超対称理論およびヒッグスセクターの検証。ハドロノコライダーにおけるヒッグス粒子、超対称粒子の生成、そのシグナルをさまざまな模型において比較検討するとともに、稀少崩壊過程、特にフレーバーを変える中性カレント過程に対する超対称粒子の影響を調べる。また、超対称模型においては、高次補正が数十パーセントという大きな効果を与える場合が多い過程に対し知られており、実験の解釈には重要な影響を及ぼすのでこの解析をさらに進める。

(2) 超対称模型のダイナミクスの検討。アノマリー媒介機構や、余剰次元模型において、そのダイナミクスを解析する。特に、余剰次元模型では、従来の4次元のダイナミクスから大きく異なる特徴を示すと考えられるが、これを非摂動論的な立場から扱うことによって従来知られていなかった知見が得られると期待される。また、



強い CP 問題などを新しい視点から見直すことが必要となってくるため、これらに関して新しいモデルを構築する可能性を探る。

(3) 超対称模型の宇宙論的考察。これらの模型に対し、宇宙の物質密度、初期元素合成や背景輻射などによる宇宙論的な制限を調べ、その許されるパラメータ領域が加速器実験での過程に対していかなる意味を持つかを検討する。また、超対称粒子であるニュートラリーノ暗黒物質の宇宙論的・現象論的な研究を行う。

### 5.8 公募研究 B1：次世代加速器実験のための実験技術開発

超高エネルギーハドロン衝突型加速器，高エネルギー電子陽電子線形衝突型加速器，ミューオンコライダー，ニュートリノファクトリーなどを含む次世代の加速器を用いた実験で必要とされる技術の開発研究や新しい実験の萌芽的研究を行う。新しいアイデアにもとづく加速器そのものの開発研究も行う。

### 5.9 公募研究 B2：次世代加速器実験で期待される新しい物理の理論研究

超対称性理論や余次元理論など標準理論を越える理論の現象論的研究を行う。

## 6 研究期間

各研究項目ともに研究期間を4年とする。ただし、総括班は平成13年度を含む5年とする。

## 7 領域代表者および事務担当者

領域代表者 金 信弘

筑波大学物理学系

〒305-8571 茨城県つくば市天王台1-1-1

tel 0298-53-4272, 4270

fax 0298-53-4491

[自宅] 〒305-0044 茨城県つくば市並木3-569-1

[自宅 tel] 0298-51-6766

事務担当者 相原 博昭

東京大学大学院理学系研究科

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

tel 03-5841-4125

fax 03-5841-8058

[自宅] 〒226-0006 横浜市緑区白山1-8-1-117

[自宅 tel] 045-936-0692

## 8 参考資料一覧

### 8.1 領域代表者および計画研究の研究代表者の最近の主要研究業績

#### 金 信弘 (領域代表者)

##### 主な業績

1995年トップクォークの発見, 1998年  $B_c$  中間子の発見, さらに  $W$  ボゾンの質量の精密測定など, 陽子反陽子衝突実験 CDF で多くの業績がる。CDF 日本グループ代表であり, ハドロンコライダー物理の国際的リーダーである。「1.8TeV の陽子反陽子衝突による  $B_c$  中間子の発見」により第45回大韓民国学術院賞受賞(受賞日2000年9月18日)。

##### 最近の主たる論文リスト

- Observation of the  $B_c$  meson in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, F. Abe, S. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2432 – 2437.
- Observation of hadronic  $W$  decays in  $t\bar{t}$  events with the Collider Detector at Fermilab, F. Abe, S. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **80** (1998) 5720 – 5723.
- Search for Higgs bosons produced in association with a vector boson in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, F. Abe, S. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 5748 – 5753.
- Observation of top quark production in  $p\bar{p}$  collisions with the Collider Detector at Fermilab, F. Abe, S. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 2626 – 2631.
- A scintillating tile/fiber system for the CDF plug upgrade EM calorimeter, S. Aota, S. Kim *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **352** (1995) 557 – 568.

#### 相原博昭

##### 主な業績

電子・陽電子衝突型加速器である SLAC の PEP、KEK の Tristan において、主に、電磁・弱相互作用と B 中間子崩壊の研究を行なった。最近では、陽子・反陽子衝突型加速器 Tevatron での実験で、Electroweak group のリーダーを努め、W 中間子の研究やトップ・クォーク発見に大きく貢献した。米国カリフォルニア大学ローレンスバークレー研究所の 1994 年 Outstanding Performance Award. 1995 年 KEK B ファクトリーにおける BELLE 実験に参加し、2000 年 4 月より実験責任者の一人

(co-spokesperson).

### 最近の主たる論文リスト

- A Measurement of CP Violation in  $B^0$  Meson Decays with Belle, H. Aihara, Proceedings of the 30th International Conference on High Energy Physics, July 27 -August 2, 2000, Osaka, Japan
- The Belle Silicon Vertex Detector, G. Alimonti *et al.*, Nucl. Instrum. Methods **A453**, 71 (2000).
- Observation of the Top Quark, S. Abachi et al. Phys.Rev.Lett.74:2632-2637,1995.
- Measurement of the  $WW\gamma$  Gauge Boson Couplings in p anti-p Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, S. Abachi et al. Phys.Rev.Lett. 75:1034-1039,1995.
- W and Z Boson Production in p anti-p Collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, S. Abachi et al. Phys.Rev.Lett.75:1456-1461,1995.

## 大島隆義

### 主な業績

ニュートリノの質量測定において、独自の手段を開発、実験を遂行し、世界のリーダーの一人として貢献してきた。さらに、 $\phi$ ファクトリーの検討をすすめK中間子のCP非保存について、新しい研究方法の検討・開発を進めた。

### 最近の主たる論文リスト

- TIME OF PROPAGATION CHERENKOV COUNTER FOR PARTICLE IDENTIFICATION: M. Akatsu, M. Aoki, K. Fujimoto, 他 1 3 名, Nucl. Instrum. Meth. A440 (2000) 124-135.
- TIME-OF-PROPAGATION COUNTER - A NEW CHERENKOV RING IMAGING DETECTOR: T. Ohshima, ICFA Instr. Bull. 20 Spring (2000) 1-15.
- TAU PHYSICS AT BELLE: T. Ohshima (Nagoya U.). 1999, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 76 (1999) 487-493.
- EXAMINATION OF T / CP INVARIANCE IN THE  $E^+ E^- \rightarrow \tau^+ \tau^-$  REACTION: T. Ohshima, S. Suito, A. Sugiyama, 他 2 名, Prog.Theor.Phys.99:413-422,1998

- New upper bound on the electron anti-neutrino mass, Phys. Lett. 256 (1991) 105-111.

## 杉本 章二郎

### 主な業績

BNLでの E787 実験日本グループを率いて参加し、ガンマ線検出器などを作る。この結果、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  事象を初めて観測する。さらに、この事象数を増やすための E949 実験を、日本側のグループを率いて、推進している。また、大強度ビームを用いた K 中間子実験の検討を進めてきている。

### 最近の主たる論文リスト

- Evidence for the Decay  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ , S. Sugimoto with S. Adler et al.(E787 Collaboration), *Physical Review Letters* **79**(1997)2204-2207.
- Further Search for the Decay  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ , S. Sugimoto with S. Adler et al.(E787 collaboration), *Phys.Rev.Lett.* **84**(2000)3768-3770.
- Measurement of Monoenergetic Neutrons from the  $\bar{P}d$  Reaction at Rest, S. Sugimoto with M. Chiba et al.(Fukui-KEK-Kyoto Sangyo-Osaka-Tokyo Metropolitan Collaboration). *Physical Review* **D55**(1997)40-53.
- Pontecorvo Reactions in Antiproton Annihilation at Rest in Deuterium to  $\pi^0 n$ ,  $\pi^0 \Delta^0$ ,  $\eta^0 n$  and  $\eta \Delta^0$ , S. Sugimoto with M. Chiba et al.(Fukui-KEK-Kyoto Sangyo-Osaka-Tokyo Metropolitan Collaboration). *Physical Review* **D55**(1997)2577-2583.
- Performance of Fine-mesh Photomultiplier Tubes Designed for an Undoped CsI Endcap Photon Detector, S. Sugimoto with T.K. Komatsubara et al. *Nuclear Instruments & Methods* **A404**(1998)315-326.

## 稲垣 隆雄

### 主な業績

KEKで  $K_L$  の二体崩壊などの実験を行い、BNLの実験と競いあった。その後、BNLの E787 実験にも参加し、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$  事象の観測に寄与した。さらに、以前から  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索の実験について様々なアイデアを出し、新たな実験を強力に計画、推進してきている第一人者。

## 最近の主たる論文リスト

- Experimental Study of the rare decays  $K_L \rightarrow \mu e$ ,  $K_L \rightarrow \mu\mu$ ,  $K_L \rightarrow ee$  and  $K_L \rightarrow eeee$ , T. Akagi et al., Physical Review D51, 2061-2089 (1995)
- Measurements of the photon detection inefficiency of calorimeters between 185 and 505 MeV, S. Ajimura et al., Nuclear Instruments and Methods A 435 408-422 (1999).
- Plastic Scintillator produced by the injection molding technique. Y. Yoshimura et al., Nuclear Instruments and Methods A 406, 435-441 (1998).
- Performance of fine-mesh photomultiplier tubes designed for an undoped CsI endcap photon detector. T. K. Komatsubara et al., Nuclear Instruments and Methods A 406, 315-326 (1998).

## 山中 卓

## 主な業績

FermilabでのCPの破れの実験に長らく携わり、直接的CPの破れの確立に貢献した。また、E799, KTeV-E799の共同責任者として、高いエネルギーの $K_L$ を用い、多体の稀崩壊を用いてCPの破れを研究する新しい分野を切り開いた。 $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$ を初めて観測、さらにこの崩壊において力学変数の分布に表れたCPの破れを初めて観測。また、 $K_L \rightarrow \pi^0e^+e^-$ ,  $\pi^0\mu^+\mu^-$ ,  $\pi^0\nu\bar{\nu}$ などに対して世界で最良の分岐比の上限値を与えた。

## 最近の主たる論文リスト

- "Search for the Decay  $K_L \rightarrow \pi^0\nu\bar{\nu}$  using  $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$  Decays", A. Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. D **61**, 072006 (2000).
- "Search for the Decay  $K_L \rightarrow \pi^0\mu^+\mu^-$ ", A. Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 5279-5282 (2000).
- "Observation of CP Violation in  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$  Decays", A. Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84**, 408 (2000).
- "Observation of Direct CP Violation in  $K_{S,L} \rightarrow \pi\pi$  Decays", A. Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 22 (1999).



- "Search for the Decay  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ", J. Adams *et al.*, Phys. Lett. **B447**, 240 (1999).

## 野村 正

### 主な業績

KEKのE162実験に携わり、 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ を観測した。現在、BNLの $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験に携わっている。

### 最近の主たる論文リスト

- "Experimental search for the decay mode  $K_L \rightarrow \pi^0 \gamma e^+ e^-$ "  
K. Murakami, Y. Hemmi, H. Kurashige, Y. Matono, T. Nomura, H. Sakamoto, N. Sasao, M. Suehiro, Y. Takeuchi, Y. Fukushima, Y. Ikegami, T. T. Nakamura, T. Taniguchi, M. Asai, Physics Letter **B 463** (1999) 333-338.
- "A useful method to monitor outputs from a pulsed light source and its application to rate effect studies in a photomultiplier tube"  
Y. Takeuchi, Y. Hemmi, H. Kurashige, Y. Matono, K. Murakami, T. Nomura, H. Sakamoto, N. Sasao, M. Suehiro, Y. Fukushima, Y. Ikegami, T. T. Nakamura, T. Taniguchi, M. Asai, Nuclear Instruments and Methods **A 440** (1999) 447-454.
- "Observation of the decay mode  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$ "  
Y. Takeuchi, Y. Hemmi, H. Kurashige, Y. Matono, K. Murakami, T. Nomura, H. Sakamoto, N. Sasao, M. Suehiro, Y. Fukushima, Y. Ikegami, T. T. Nakamura, T. Taniguchi, M. Asai, Physics Letter **B 443** (1998) 409-414.
- Experimental search for the decay mode  $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ e^-$  T. Nomura, Y. Hemmi, H. Kurashige, Y. Matono, K. Murakami, H. Sakamoto, N. Sasao, M. Suehiro, Y. Takeuchi, Y. Fukushima, Y. Ikegami, T. T. Nakamura, T. Taniguchi, M. Asai, Physics Letter **B408** (1997) 445-449.

## 日笠 健一

### 主な業績

(1) 超対称模型: 超対称性の破れのスケール(超対称粒子の質量)が大きい場合, 超対称性で関係づけられている結合定数同士の間, 対数的な不一致が現れることを, スカラークォークの崩壊過程において見いだした。(いわゆる super-oblique correction)

また、 $W$  ボソンの超対称パートナーの崩壊を調べることによって、エネルギー的に生成不可能なスカラーレプトン、クォークの質量の情報が得られることを示した。

(2) ヒッグスセクターの物理：軽いヒッグス粒子が存在しない場合は、 $WW$  散乱が TeV 領域で強くなるが、500 GeV のリニアコライダーでこの強い相互作用の効果が検証できる可能性が高いことを示した。また、電荷 2 のヒッグスボソンの崩壊において、従来無視されてきたフェルミオン 4 個への崩壊が重要であることを指摘した。

(3) トップクォークの物理：Tevatron での陽子・反陽子衝突実験において、トップの関与する高次元有効相互作用に対してどのような制限が得られるかを評価した。また、超対称理論の  $R$  パリティを破るトップの相互作用に対し、トップの偏極がよい観測量を与えることを示した。

(4) ハドロン物理：低エネルギー  $\pi\pi$  散乱振幅のカイラル対称性に基づいたパラメトリゼーションを提案し、スカラーメソン ( $\sigma$ ) が存在するとした方が実験データをよく再現することを示した。

### 最近の主たる論文リスト

- R-parity violation and top quark polarization at the Fermilab Tevatron collider, K. Hikasa, J. M. Yang, and B.-L. Young, Physical Review D 60, 114041 (1999).
- Another look at  $\pi\pi$  scattering in the scalar channel, K. Igi and K. Hikasa, Physical Review D 59, 034005 (1999).
- Probing anomalous top quark interactions at the Fermilab Tevatron collider, K. Hikasa, K. Whisnant, J. M. Yang, and B.-L. Young, Physical Review D 58, 114003 (1998).
- Probing sgeneration spectrum in chargino decays, K. Hikasa and T. Nagano, Physics Letters B 435, 67–72 (1998).
- Soft-breaking correction to hard supersymmetric relations: QCD correction to squark decay, K. Hikasa and Y. Nakamura, Zeitschrift für Physik C 70, 139–143 (1996).

## 8.2 文献のリスト

- 1 A Measurement of CP Violation in  $B^0$  Meson Decays with Belle, H. Aihara, Proceedings of the 30th International Conference on High Energy Physics, July 27 -August 2, 2000, Osaka, Japan.
- 2 OBSERVATION OF TOP QUARK PRODUCTION IN ANTI-P P COLLISIONS. By CDF Collaboration (F. Abe et al.)Phys.Rev.Lett.74:2626-2631,1995.
- 3 OBSERVATION OF THE TOP QUARK. By D0 Collaboration (S. Abachi et al.). Phys.Rev.Lett.74:2632-2637,1995;
- 4 Observation of the  $B_c$  meson in  $p\bar{p}$  collisions at  $\sqrt{s} = 1.8$  TeV, F. Abe, S. Kim *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81** (1998) 2432 – 2437.
- 5 Observation of Direct  $CP$  Violation in  $K_{S,L} \rightarrow \pi\pi$  Decays, A.Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 22 (1999).
- 6 Evidence for the Decay  $K^+ \rightarrow \pi^+\nu\bar{\nu}$ , S. Sugimoto with S. Adler et al.(E787 Collaboration), *Physical Review Letters* **79**(1997)2204-2207.