

(別紙様式)

領域番号: 414

領域略称名: 質量起源

平成16年度科学研究費補助金
特定領域研究 研究状況報告書
「質量起源と超対称性物理の研究」

(研究期間 平成13年度 ~ 平成17年度)

平成16年7月

領域代表者 筑波大学・物理学系・教授・金 信弘

連絡先電話番号 029 (853) 4272

(1) 要旨

本研究領域では、ヒッグス粒子を直接・間接に探査すること、及び、ファクトリー加速器を用いた精密実験で「標準理論からのずれ」を発見して新しい物理の手がかりを得ることによって、質量起源の解明に寄与することを目標として、研究が進められてきた。現在までに、B ファクトリー加速器を用いた実験において、 $B \rightarrow K_s$ 過程のCP非対称度を測定した結果に「標準理論からのずれ」が見えている。今後、更に高統計の結果を得ることと、その結果を理論と比較することによって、質量起源について新しい知見を得ることが期待される。テバトロン加速器を用いたヒッグス粒子の直接・間接探索、B ファクトリー、K ファクトリー加速器によるタウ物理の研究、K 中間子稀崩壊の研究でも多くの成果をあげており、さらに統計をあげることによって、質的に新しい成果を得ることが期待される。

(2) 研究領域の概要・設定目的

20世紀後半の素粒子物理学は、「素粒子標準理論」と呼ばれる素粒子反応の基本理論が加速器実験によって実証されることによって、発展してきた。この標準理論の根幹をなす「ヒッグス粒子の真空凝縮によって素粒子に質量が与えられる」という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。質量の起源がこの標準理論の説明で正しいのか、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、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。本領域の研究目標は、ヒッグス粒子を直接・間接に探査すること、及び、ファクトリー加速器を用いた精密実験で「標準理論からのずれ」を発見して新しい物理の手がかりを得ることによって、質量起源の解明に寄与することである。

本特定領域研究は、6つの計画研究(実験5+理論1)と公募研究とからなる。実験の5つの計画研究(A01-A05)は、現存する国内外の粒子ファクトリー加速器(トップファクトリー、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(A06)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。それぞれの計画研究の研究課題、代表者は以下の通りである。

- | | |
|---|---------------------|
| 「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(計画研究 A01)」 | 代表者 金 信弘(筑波大学) |
| 「Bファクトリーを用いた質量起源の探求(計画研究 A02)」 | 代表者 相原 博昭(東京大学) |
| 「タウ・レプトンの物理(計画研究 A03)」 | 代表者 大島 隆義(名古屋大学) |
| 「Kファクトリーを用いた $K_L \rightarrow 0$ 崩壊の研究(計画研究 A04)」 | 代表者 山中 卓(大阪大学) |
| 「荷電及び中性K中間子の稀崩壊の精密測定(計画研究 A05)」 | 代表者 杉本章二郎(KEK IPNS) |
| 「ヒッグスセクターと超対称理論ダイナミクスの現象論的研究(計画研究 A06)」 | 代表者 日笠 健一(東北大学) |

実験、理論それぞれに公募研究が設けられている。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の公募研究が行われている。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が公募研究で行なわれている。

(3) 研究領域内の研究の進展状況及びこれまでの主な研究成果

「陽子反陽子衝突実験によるヒッグス粒子の探索(計画研究 A01)」については、実験データ収集とそれに並行した物理解析が進行中である。ヒッグス粒子の間接探索としては、トップクォーク質量と W ボソン質量の精密測定が行われており、力学的最尤法 (Dynamical Likelihood Method) によって測定精度を向上させたトップクォークの質量結果として $177.8 +4.5/-5.0(\text{stat.}) \pm 6.2(\text{syst.})\text{GeV}/c^2$ を得た。現在 W ボソン質量の解析中であり、その結果と併せてヒッグス粒子の新しい質量上限を 2004 年度に得る予定である。直接ヒッグス粒子探索を行った結果、生成断面積上限として $4.5\text{pb}(M_{\text{Higgs}} = 120 \text{GeV}/c^2)$ を得ており、さらに高統計のデータを得ることが待たれる。また検出器開発計画としては、シリコン飛跡検出器の大量製作を 2003 年に完了した。

「B ファクトリーを用いた質量起源の探求 (計画研究 A02)」では、中性 B 中間子が $B \rightarrow K_s$ 中間子と Ks 中間子に崩壊する $B \rightarrow K_s$ 過程の CP 非対称度が、小林益川理論による期待値からずれていることを発見した。非対称度の測定値は、 $S = -0.96 \pm 0.50^{+0.09}_{-0.11}$ で、 $B \rightarrow J/\psi K_s$ の非対称度測定から得られる期待値からずれている。この結果が統計のゆらぎである確率は 0.05% で、3.5 の統計的有意さに相当している。このずれが新しい物理に起因するかどうか確定するには、さらにデータ量を増やして統計精度を向上させる必要があるが、全く予想もしていなかった興味深い結果である。中性 B 中間子の $B \rightarrow K_s$ 崩壊は、CP 非対称の出現が期待される崩壊モードの一つであるが、統計精度の向上に成功した結果、世界ではじめて 5.2 の統計的有意さで CP 非対称を証明することに成功した。さらに、粒子と反粒子の崩壊幅自身の非対称である直接的 CP の破れについても 3.2 の証拠を得た。この研究に関する博士論文 1 編には、『第 5 回(2003 年度) 高エネルギー物理学若手奨励賞』が与えられ、2001 年の「B 中間子系における CP 不変性の破れの発見」に対して『第 20 回(2003 年度)井上学位賞』が与えられた。また、第 2 世代バーテックス検出器 SVD2 を完成し、2003 年夏にビーム衝突点に設置した。

「タウ・レプトンの物理 (計画研究 A03)」では、収集されたデータの内、 86fb^{-1} のデータを用いてレプトンの香り保存を破る崩壊 $\tau \rightarrow \mu \eta$ の探索を行ない、90% の信頼度でおおよそ 3×10^{-7} の崩壊分岐比の上限値を得た。特に、 $\tau \rightarrow \mu \eta$ のモードでは、過去の実験と比較して 10 倍程度の高感度での測定結果となっている。これらのモードを含め、他の崩壊モードでもより大量のデータを用いた解析が進行中である。粒子識別検出器 TOP カウンターの開発・研究では新しい光電子増倍管の開発を行っており、主に、多チャンネル間のクロストークを減らすべく、構造体の改良を行ない試作をし、性能評価を行なっている。

「K ファクトリーを用いた $K_L \rightarrow \pi^0$ 崩壊の研究(計画研究 A04)」については、KEK に現存する 12GeV の陽子シンクロトロンを用いた E391a $K_L \rightarrow \pi^0$ 崩壊実験を進めている。2003 年に大型ガンマ線検出器と大型真空容器を製作し、大型ガンマ線検出器を真空容器内に組み込み、下流の CsI 電磁カロリメータ、および上流のガンマ線検出器と組み合わせ、検出器を完成させた。2004 年 2 月よりビームを取り出し、検出器などの調整の後、3 月から 6 月までデータ収集を行った。現在データ解析が進行中である。また J-Parc の 50GeV 大強度陽子加速器施設での K ファクトリーで行う $K_L \rightarrow \pi^0$ 実験の Letter of Intent を 2002 年に提出し、実験のためのいくつかのプロジェクトを立ち上げた。

「K 中間子の稀崩壊の精密測定(計画研究 A05)」については、これまで収集したデータの解析により、3 個目の $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ 事象の発見し、その実験結果を出版した。将来の実験のデザイン、入射 K 中間子の識

別と静止点決定のためのシリコンストリップ検出器の開発、高速波形記憶処理回路の開発を行っている。また GSO カロリメーターの性能評価を行った。中性 K 中間子崩壊実験においては、エアロジェル放射体の試験として、京大・宇治キャンパスの 60MeV 電子シンクロトロンを利用してビームテストを行い、性能向上につながる光量の増加を確認した。

「ヒッグスと超対称理論の現象論的研究(計画研究 A06)」では、超対称模型の諸側面の理論的研究、余剰次元模型の研究、関連する初期宇宙論の研究を進めている。具体的にそのいくつかを挙げると、(1) Tevatron, LHC におけるスカラートップクォークの FCNC による崩壊の検出法の検討を行った。(2) Belle 実験で標準模型と大きく異なる測定結果が得られている B 中間子の K_s 崩壊の CP 非対称性に対する超対称粒子の寄与の評価を行った。(3) B 中間子の χ_s への崩壊に対する、荷電ヒッグス粒子およびグルイノによる高次補正を求め、従来の近似計算との比較を行った。(4) 水銀の電気双極子モーメントのデータから得られるスカラークォークのフレーバー混合に対する制限を求めた。(5) 余剰次元の効果によって電弱対称性が破れる模型において、トップクォークの質量が実験値を再現することを見出し、ヒッグスボソンの質量が 180 GeV 程度であることを予測した。(6) 超対称模型におけるスカラークォーク、ヒッグス場によって初期宇宙のインフレーションが起こる可能性を検討し、そのための条件を導いた。

(4) 研究領域の研究組織と各研究項目の連携状況

総括班は5年間におよぶ本特定領域研究の実施期間中に各研究の調整をとり、特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っている。具体的には毎年2回総括班連絡会を行い、各研究の調整をとっており、2003年3月、2004年3月には特定領域研究会を開催し、研究の連絡・総括を行った。さらに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総括している。また、公募研究の将来計画の推進を図るために、ACFA-JLC研究会、LCWS研究会、「実験・観測に基く素粒子統一描像の構築」研究会等を支援した。

(5) 研究費の使用状況

物理解析のために、大容量のディスクシステムを持つ大規模 PC クラスタを構築し、各計画研究における解析の高速化を進め、物理の成果をあげることに成功している。検出器としては、シリコン飛跡検出器の製作費、線検出器の製作費、光電子増倍管の開発費などに研究費を使用し、実験の実施・性能向上を推進している。また、研究員を雇用して、研究補助のみでなく自己のイニシアチブによる研究を奨励して研究全体の活性化を図っている。

(6) 研究成果公表の状況(主な論文等一覧、ホームページ)

1. D. Acosta, S. Kim et al., (CDF Collaboration), "Search for Doubly-Charged Higgs Bosons Decaying to Dileptons in p anti-p Collisions" FERMILAB-PUB-04/112-E. to be published in Phys. Rev. Lett.
2. D. Acosta, S. Kim, et al., (CDF Collaboration) "Search for Pair Production of Scalar Top Quarks in R-parity Violating Decay Modes in p anti-p Collisions" Phys. Rev. Lett. 92, 051803 (2004).
3. Y. Yusa, T. Ohshima et al. (Belle Collaboration), "Search for neutrinoless decays χ_s " Phys. Lett. B 589, 103 (2004)
4. K.Abe, H. Aihara, T. Ohshima, et al. (Belle Collaboration), "Measurement of time-dependent

- CP-violating asymmetries in $B \rightarrow K_s, K^* K^* K_s,$ and $\eta' K_s$ decays," Phys. Rev. Lett. 91, 261602 (2003).
5. K.Abe, H. Aihara, T. Ohshima, et al. (Belle Collaboration), "Observation of large CP violation and evidence for direct CP violation in $B \rightarrow K^* K^* K_s$ decays," arXiv:hep-ex/0401029.
 6. A. Ishikawa, H. Aihara, T. Ohshima, et al. (Belle Collaboration), "Observation of the electroweak penguin decay $B \rightarrow K^* K^* K_s$ " Phys. Rev. Lett. 91, 261601 (2003).
 7. T. Yamanaka "Kaon Factories", International Workshop on Frontier Science, Frascati, Italy, October 6-11, 2002.
 8. V.V. Anisimovsky, S. Sugimoto et al. (E949 collaboration), "Improved Measurement of the Decay $K^* \rightarrow K^* K^* K_s$ " Phys. Rev. Lett. 93-3, 031801(1-4) (2004).
 9. T. Han, K. Hikasa, J. M. Yang, and X. Zhang, "The FCNC top squark decay as a probe of squark mixing" Phys. Rev. D 70, in press (2004), hep-ph/0312129
 10. M.-Endo, M.-Kakizaki, and M.-Yamaguchi, "Large supersymmetric contribution to CP asymmetry of $B \rightarrow K_s$ from left-handed squark mixing" hep-ph/0403260.
- * 本特定領域のホームページ <http://www.tsukuba.jp.hep.net/~skim/tokutei/> において研究成果報告、研究会報告等の情報開示が行われている。

(7) 総括班評価者による評価の状況

総括班評価者はおいていないが、2003年3月、2004年3月に開催した特定領域研究会には、本研究領域外の研究者（近藤都登早稲田大学教授）に参加いただいて、領域の研究推進状況についての評価・コメントをいただいている。

(8) 研究領域の研究を推進する上での問題点と対応策

現時点においては、特に問題点はない。

(9) 今後の研究領域の推進方策

実験の5つの計画研究(A01-A05)については、実験データの収集を継続し、物理解析を進めつつ、さらに新しい解析法を開発する。それとともに、将来の実験の改良に向けて、TOP カウンター、線検出器などの測定器開発を進める。理論の計画研究(A06)では、今までに進めてきた研究をさらに発展させるとともに、実験家との連携を緊密にして最新結果を反映させる。また公募研究については、研究会で将来計画を議論していくことによって、実現に向けた努力を集中させて計画を進展させる。

総括班は上記の各研究の調整をとり、特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。2005年3月には特定領域研究会を開催し、研究連絡・議論・総括を推進する。毎年2回、総括班連絡会を行い、各研究の調整をとる。また、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総括する。