

JHF 50GeV 陽子加速器における 素粒子・原子核研究の進め方

素粒子原子核研究計画委員会

延與 秀人 (理研)、岡田 安弘 (KEK)、神谷 幸秀 (KEK)、金 信弘 (筑波大)、
黒川 真一 (KEK)、近藤 健次郎 (KEK)、櫻井 博儀 (東京大)、高橋 忠幸 (宇宙科学研)、
田村 裕和 (東北大)、中畑 雅行 (東京大)、中家 剛 (京都大)、野尻 美保子 (京都大)、
羽澄 昌史 (KEK)、初田 哲男 (東京大)、日笠 健一 (東北大)、藤井 恵介 (KEK、幹事)、
宮武 宇也 (KEK)、山中 卓 (大阪大、委員長)、吉村 浩司 (KEK)

2002 年 9 月 23 日

2002 年 11 月 17 日 第 II 部追加

目 次

第 I 部 要旨	4
1 素粒子・原子核物理の現状と JHF	4
2 JHF の実験プログラムを進めるための基本方針	5
3 各研究プログラムに対する評価と提言	5
4 研究プログラム全体の進め方についての提言	8
第 II 部 JHF における研究プログラム	10
1 素粒子・原子核物理における JHF の役割	10
1.1 素粒子物理学の進展と展望	10
1.2 原子核物理学の進展と展望	12
1.3 JHF と素粒子・原子核研究	13
2 ニュートリノ振動実験	15
2.1 物理的意義	15
2.2 実験の説明	15
2.3 海外の計画との比較	17
2.4 評価、意見	18
2.5 結論	18
3 K 中間子の稀崩壊の物理	19
3.1 物理的意義	19
3.2 実験の説明	20
3.2.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	20
3.2.2 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	21
3.2.3 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ での T の破れ	21
3.3 海外の計画との比較	22
3.3.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$	22
3.3.2 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$	22
3.3.3 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ での T の破れ	22
3.4 評価、意見	22
3.4.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験	23
3.4.2 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 実験	23
3.4.3 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ での T の破れ	23
3.4.4 K の実験全体について	23

3.5	結論	24
4	大強度ミューオンビームによる物理	25
4.1	物理的意義	25
4.2	実験の説明	26
4.2.1	大強度ミューオン源 (PRISM)	26
4.2.2	PRISM ビームを用いた $\mu N \rightarrow e N$ 転換探索実験	27
4.2.3	その他の実験	27
4.3	海外の計画との比較	28
4.3.1	世界のミューオン源	28
4.3.2	世界のレプトンフレーバーの破れの探索実験	28
4.4	評価、意見	29
4.5	結論	30
5	ストレンジネス核物理の実験	31
5.1	物理的意義	31
5.2	実験の説明	31
5.2.1	Ξ ハイパー核分光	33
5.2.2	Λ ハイパー核の γ 線分光	33
5.2.3	ダブル Λ ハイパー核	33
5.2.4	ハイペロン核子散乱	34
5.2.5	K^- 原子核の深い束縛状態	34
5.2.6	(π, K) 反応によるハイパー核の高分解能分光	34
5.3	海外の計画との比較	35
5.4	評価、意見	35
5.5	結論	36
6	ハドロン物理の実験	37
6.1	物理的意義	37
6.2	各実験の説明・評価・意見	38
6.3	海外の計画との比較	40
6.4	全体を通しての評価、意見	41
6.5	結論	42
7	反陽子科学実験	43
7.1	物理的意義	43
7.2	施設・実験の説明	44
7.3	海外の計画、実験との対比	44
7.4	評価、意見	45
7.5	結論	46

第I部 要旨

はじめに

素粒子原子核研究計画委員会の任務は、「素粒子原子核研究所の所長の求めに応じ、1) 長期的な物理の研究及びそれに関連した計画について検討し、また 2) 現行の研究についての進捗状況及び成果を検討し、必要に応じて増強改善策の提言を行う」¹ことである。

本委員会は、素粒子原子核研究所(以下、素核研と略す)の多様な将来計画の中で、「統合計画(以下 JHF と略す)の 50GeV 陽子加速器(以下 50GeV PS と略す)における実験を素核研としてどう進めるべきか」という問題を、最も緊急性の高い検討課題としてとりあげた。このため、2001 年 10 月から 2002 年 9 月までの期間、延べ 10 日間に及ぶ会合を持ち、幅広く、素粒子・原子核物理の諸分野の現状と将来について第一線に立つ 19 人の専門家から話を聞き、統合計画の 50GeV PS で検討されている実験の進め方について、科学的意義の評価を中心に、多角的な議論を行った。これに基づき、本委員会は全会一致で本報告書に記す提言を行う。

1 素粒子・原子核物理の現状と JHF

素粒子・原子核物理学は、極微の世界、すなわち自然のもっとも基本的な階層を理解することを目的としている。20 世紀後半、加速器の発達によってこの分野は飛躍的な進歩を遂げてきた。新しい素粒子の発見によって基本的相互作用とその対称性が次々と明らかになり、ハドロンや原子核の構造の研究などとあいまって、物質の基本構造と、宇宙の開闢から現在・将来に至る歴史についての、量子論と相対論に基づいた新しい統一の描像が構築された。

その一方で、基本粒子の質量生成機構、基本相互作用の起源、物質・反物質の非対称性、重力と弱い力の階層性の問題、時空構造の起源など、我々がなぜ存在しているかという基本的な疑問に深く関連した新たな謎が生まれた。それと同時に、多粒子系においては、極限状態下での物質構造や天然には存在しない原子核など、多彩な量子現象の世界が存在する可能性も明らかになってきた。これらの疑問や可能性は、自然の奥深さや広さを痛感させるものであり、また、人類の知的好奇心をますます刺激するものでもある。21 世紀を迎え、これらの未解明問題に対する人類の挑戦は、今まさに新しい段階に進もうとしている。

極微の世界を探究する最も直接的な方法は、高エネルギー加速器によるエネルギーフロンティア実験である。現在フロンティアに立つのは Tevatron であるが、建設中の LHC、計画中のリニアコライダーはこの前線を更に押し進め、基本粒子の質量起源の解明を始めとする重要な知見をもたらすであろう。しかし、エネルギーを上げることが唯一の手段ではない。比較的低いエネルギーであっても大強度の加速器によって、稀な現象を探索することにより、高いエネルギースケールの物理を調べることが可能である。これまで行われてきた、ニュートリノ振動実験、B ファクトリー実験はその典型である。このような高輝度フロンティア実験は、特に、問題の根源が加速器で直接到達不可能なエネルギースケールに関わる場合には、最も有効な手段となりうる。

一方、極限状態における物質の存在形態(相)や量子多体系としての新現象の解明には、温度、バリオン密度、ストレンジネス、スピン、アイソスピンなどのパラメーターを変化させることによる系統的な研究が不可欠であ

¹素粒子原子核研究計画委員会規則(平成 9 年 4 月 25 日規則第 35 号、改正 平成 13 年 6 月 7 日規則第 16 号)より抜粋

る。例えば、RHIC や LHC における高エネルギー重イオン衝突を用いたクォーク・グルーオン・プラズマ生成実験は、高温での核物質の相変化を探ることをその目標としている。これは、原子核分野におけるエネルギーフロンティア実験とみなすことができる。一方、ストレンジネスやハドロンをプローブとした原子核実験や、RI ビームを用いた不安定核の研究は、中性子星内部や超新星爆発においてあらわれる様々な原子核や核物質相の詳細な探究を可能とする、高輝度フロンティア実験と位置付けられる。

以上のように、大強度加速器がもたらす物理は幅広い。中でも、エネルギー 50 GeV、3.4 秒周期で 3×10^{14} 個という、高いエネルギーで世界最大の強度 (0.75MW) の陽子ビームを作ることのできる、統合計画の 50GeV 陽子加速器は、21 世紀の素粒子・原子核分野の新たな高輝度フロンティアを切り拓く、世界でも高い独自性をもつ施設であり、大きな国際的貢献を果たすと考えられる。

JHF の果たす科学的役割は、素粒子の分野では、ニュートリノ振動の物理、CP の破れの精密測定、フレーバーを破る稀な現象の探索などがある。また、原子核の分野では、陽子・中性子に限定されないストレンジネス核物理やハドロン核物理の実験による、量子色力学 (QCD) に立脚したクォーク・グルーオン多体系の研究などがある。さらに、反陽子の大量生成により、新たな反陽子科学の世界が開かれる。

このように、JHF 計画は高度で新鮮な科学的成果を収めると期待される、数多くの研究プロジェクトを有している。これらのプロジェクトは、国内外のエネルギーフロンティア実験などと補完しあい、我が国の素粒子・原子核研究のバランスのとれた発展を促すものと期待される。

更に JHF は、素粒子・原子核の研究者の人材育成を行う国内拠点として、大きな役割を果たすことも、強調しておかねばならない。

2 JHF の実験プログラムを進めるための基本方針

本研究計画委員会は、JHF での実験が第 1 期、第 2 期² を通して最大限の成果が得られるように、実験プログラム全体を次の基本方針に従って進めることを提言する。

1. 学問的な意義や緊急度が高く、日本が世界をリードできる研究を重点的に進める。
2. 様々な実験分野で、JHF の特徴を生かした研究を発展的に行えるように研究プログラムを立て、全体として研究を効率良く進めるために、それらの適切な時系列を計画する。

3 各研究プログラムに対する評価と提言

この基本方針に基づき、本委員会はこれまで検討されてきた様々な実験を、次の 6 つの研究プログラムに整理し、評価を行い、議論を進めた。

- ニュートリノ振動実験 (ν)
- K 中間子稀崩壊の物理 (K 崩壊)
- 大強度ミューオンビームによる物理 (μ)
- ストレンジネス核物理 (ストレンジ)

²ここで、第 1 期は予算執行の始まった 1350 億円分に基づく計画と同時期、第 2 期はそれに続く 540 億円分の計画時期と定義する。

- ハドロン核物理 (ハドロン)
- 反陽子科学 (\bar{p})

これらのプログラムの詳しい内容、評価については、後に続く章に記述する。以下に、各々の研究プログラムに対する評価と提言を要約する。

ニュートリノ振動実験

日本がリードして切り開いてきたニュートリノ振動の観測は、標準理論で説明できない現象を初めて確立した。さらに、クォークとは全く異なる大きな世代間混合を示すデータは、未知の物理的機構の存在を示唆している。現在 ν_μ から ν_e への振動は測定されておらず、ニュートリノの世代間混合の全体像が明らかでないため、今後もニュートリノ物理の発展を図ることが重要な課題である。JHF で提案されている計画では、K2K の 100 倍以上の強度のニュートリノビームをスーパーカミオカンデに打ち込むことができる。これによって振動パラメーターを精密に測定するのみならず、将来、レプトンセクターでの CP の破れの発見に繋がる可能性がある。物理的重要性と将来性、および JHF に対抗する海外の実験が計画されていることなどを考慮すると、この分野に重点を置いて、ビームラインの建設を一刻も早くスタートさせるべきである。

K 中間子稀崩壊の物理

CERN、FNAL での ϵ'/ϵ の実験、および KEK、SLAC での高輝度の B ファクトリーによって、小林・益川機構による CP の破れが確立し、次のステップとして、標準理論を超える物理を起源とする CP の破れの探索が望まれる。その探索の有効な手段として、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比の精密測定実験、および $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ の T 破れの実験がある。これら全ての測定を行うのが理想的であるが、JHF 開始時には関連研究者の協議によって一つに絞って進めることが、効率的かつ現実的である。本委員会としては $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の測定実験を推奨する。これは、KEK PS E391a 実験を JHF 第 1 期計画において発展させることにより、世界初の観測を目指すとともに、高精度測定の基盤が確保できるからである。ただし、引き続き第 2 期における精密実験を行うに当たっては、それまでの成果に基づいて実現性を評価する必要がある。

大強度ミュオンビームによる物理

素粒子の階層性の問題を解決する上で有力な超対称理論は、レプトンフレーバーを破る μ -e 転換などの、標準理論では説明できない新現象を预言している。JHF では、大強度陽子ビームを用いて質の高いミュオンを大量に生成することにより、理論的に予想される μ -e 転換の分岐比を射程内に収めることができる。提案されている PRISM などの技術は、従来より 1 万倍高い強度のミュオンビームを作ろうとする野心的なものであり、 μ -e 転換の発見を目指して必要な技術の開発を直ちに始めることが重要である。また、この技術は、本実験に限られるものではなく、大規模ミュオン源としての応用や、ニュートリノファクトリー、高エネルギーフロンティア実験に発展しうる将来性がある。これらの可能性を考慮すると、戦略的な重要性が高く、国際貢献度も高いと認められる。

ストレンジネス核物理

この分野は、日本がリードして革新的な実験方法を開拓することによって、ストレンジネスを含む核力の理解に大きく貢献してきており、世界的な注目度も高い。JHF では、高輝度の 2 次ビームを用いて、ハイパー核の構造やハイペロン・核子散乱などを、より系統的に研究することが可能になり、核力の本質的理解に大きく寄与する。このような研究は、ストレンジネスを含む核物質の性質を明らかにするばかりでなく、中性

子星のような高密度核物質の理論を構築する上でも重要な役割を果たす。JHF の稼働後早期より着実な成果が期待できるので、提案されている多様な実験に優先度を設定して、初期より継続的に進めるとともに、装置や 2 次ビームラインの新設によってさらに発展を図るべきである。

ハドロン核物理

ハドロン核物理分野で提案されている実験では、JHF の高輝度を生かした固有の物理が展開できる。特に、高輝度 1 次、2 次ビームを用いたレプトン対の観測によって、核子・原子核の構造関数や、原子核におけるカイラル対称性の部分的回復などの、非摂動的 QCD 現象を引き出すことが、主要な研究目標となる。従って、それらを可能にする多目的ビームライン・測定器の建設を推進すべきである。この分野は多彩な内容を含み、外国からの実験提案もなされているので、将来に渡って息長く継続していくことが望まれる。高密度核物質の生成に向けた重イオン加速は、新しいフロンティアの開拓につながるものであるが、GSI との競合を十分考慮して進める必要がある。

反陽子科学

反陽子を用いた物理は、CERN を拠点に日本人研究者が先導的に推進しており、最近、反水素の大量生成に成功した。この成果により反陽子研究は新たな段階に入ったと言える。JHF では、反陽子ビームの大強度化により、CPT の精密検証や不安定核の中性子分布の測定、また、反陽子の医学応用など、基礎から応用に至る幅広い研究をさらに発展させることが可能となる。反陽子施設での実験プロジェクトは海外研究施設の動向によるところが大きいですが、一方で JHF の特徴は低エネルギー大強度ビームが直流で得られることと判断され、これを生かした戦略を練り上げることが望まれる。

以上に述べた結果を、相対的に星の数で表し、まとめたものが表 1 である。

研究プログラム	JHF の初期に進めるべき物理としての重要度	緊急度	実現度	予算規模		人数	注
				設備	実験装置		
ν				¥¥¥	¥¥	人人人	
K 崩壊				¥→ ¥¥	¥→ ¥¥	人人	1)
μ	2) 参照			¥¥¥	¥¥	人人	3)
ストレンジ				¥→ ¥¥	¥→ ¥¥	人人人	4)
ハドロン				¥¥	¥	人人	
\bar{p}				¥¥¥	¥	人人	5)

表 1: JHF における各研究プログラムの評価

「JHF の初期に進めるべき物理としての重要度」は世界の中での JHF の競争力を考慮した上で評価した結果である。
「緊急度」は、国際的な競争などに照らして、早急に進めるべき度合いを示す。
「実現度」は、解決すべき技術的課題の量を考慮して判断した実現可能性を示す。
「設備」「実験装置」はそれぞれ、ビームラインなどの設備および実験装置の予算規模を本委員会が推測したものであり、¥=10 億円以下、¥¥=10-50 億円、¥¥¥=50 億円以上を表す。
「人数」は、実際にそのプログラムに参加する研究者数を本委員会が推測したものである。人人=数十人、人人人=百人以上を表す。
注 1) 2 段階で行うことを仮定し、第 1 段階 → 第 2 段階で表す。
注 2) このプログラムは素粒子・原子核物理の次世代を切り開く可能性が高いので、直ちに R&D を始める重要度を評価した。
注 3) 実現度については現状では判断が難しい。原理の実証、技術的問題の整理検討が進んだ上で、再評価をするべきである。
設備の予算規模には実験ホールも含む。
注 4) 第 1 段階 → 第 2 段階で表す。第 1 段階は、まず現存の装置を移して実験。第 2 段階はビームラインや装置の改良・建設を行って実験する。K-Hall の拡張も必要。
注 5) GSI や CERN で \bar{p} のプログラムが将来行われない場合は重要度が増し、ユーザー数は増加する。

4 研究プログラム全体の進め方についての提言

初めに述べた基本方針と、各々の研究プログラムの評価と提言に基づき、本委員会は JHF 全体の研究プログラムを、以下に述べる方針で進めることを提言する。また、この概念図を図 1 に示す。

1. ニュートリノビームラインを早急に建設し、ニュートリノ振動実験のプログラムを最重点で進める。
2. 原子核・素粒子の多様な研究を行うため、まず着実な成果が期待できるストレンジネス核物理と K 稀崩壊実験 (JHF での E391a 実験の継続など) を第 1 期で推進する。
3. ミューオン実験は物理的目標に即した技術的課題の調査、検討、実証 (phase A study) を直ちに開始し、第 2 期での物理的成果を目指す。

第 2 期における K 崩壊、ストレンジネス核物理、ハドロン核物理の実験を行うために、当初から検討されてきた B-line/C-line の建設およびカウンターホールの拡張を計画通り実現すべきである。それに伴い、上記の各分野の続行と並んで

4. ハドロン核物理の実験は、第 1 期の後半から第 2 期にかけて、順次行う。

5. 反陽子科学の実験は海外の情勢を見極め、必要ならば第2期から行う。

これらの研究プログラムは、進捗状況に応じて計画の評価を適宜行い、必要ならば進め方の見直しを図ることが重要である。特に、ミューオン研究プログラムの phase A の成果によっては、現行の計画を見直してこれを優先させるべきである。

以上の提言は、物理の意義に重きを置いて導かれたもので、個々のプログラムの遂行に当たっては、LOI やプロポーザルの段階で、実行可能性が綿密に議論されるべきであることは言うまでもない。また、加速器がデザイン上の強度に至るまでの年次計画も、プログラムの推進に多大な影響を与えることを留意すべきである。この二点について現時点で得られる情報は限られており、本委員会の主な判断基準には取り入れられていない。今後、テクニカル・レビューなどを行い判定する必要がある。

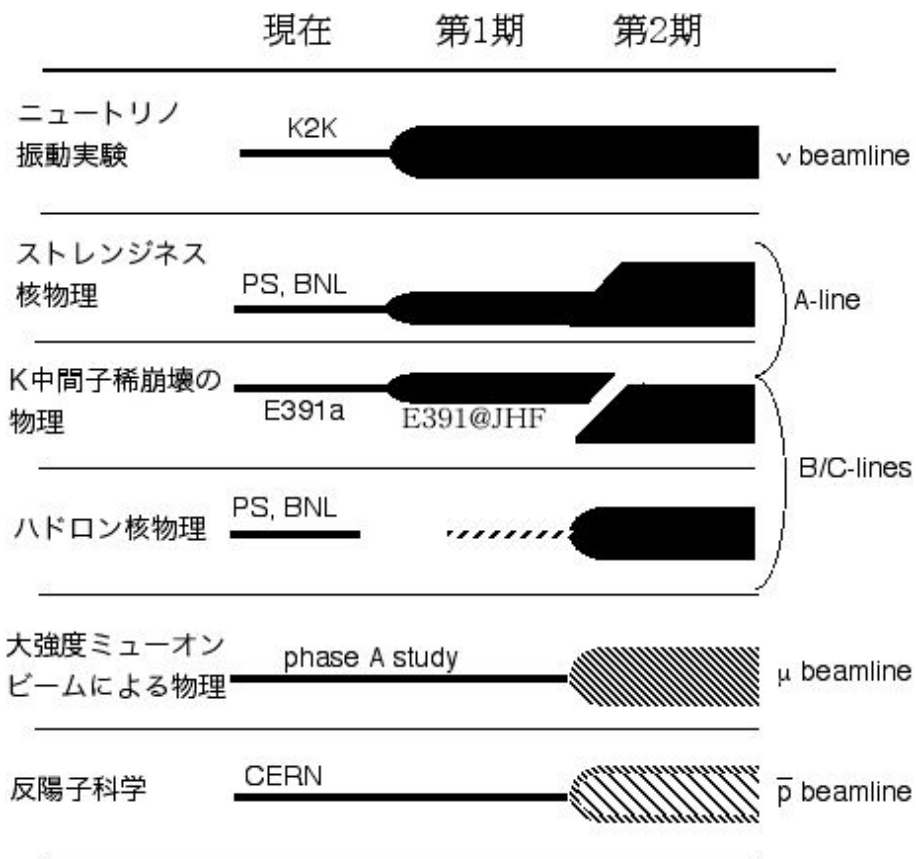


図 1: 研究計画委員会の提言する JHF での実験プログラムの進め方の概念。μ の第 2 期は phase A study の結果に依存する。反陽子科学は海外の情勢に依存する。

第II部

JHF における研究プログラム

第II部では、まず素粒子・原子核物理の発展してきた歴史、現状と将来の展望を概説し、それをふまえて JHF がこれらの分野で果たす役割を述べる。

次に、第1部にまとめられた答申の根拠となった、JHF50GeV PS での各研究プログラムに対する本委員会としての具体的な評価を述べる。本委員会としては、大強度フロンティアを切り開くと言う JHF の使命を強く認識し、JHF ならではの業績をもたらすであろう研究プログラムをより高く評価した。また、実験プログラムの優先度を考える上でも、着実な計画と、野心的な計画をバランスさせ、また、段階的に物理のゴールを目指す必要性を鑑み、その評価を行った。特に、物理の成果が10年後の時点でどのようなインパクトをもたらさうか、研究プログラムに国際的競争力があるかという二点について重点的に審議した。

1 素粒子・原子核物理における JHF の役割

物質の究極の姿とは何か、それを支配する物理法則は何か、またそれらを理解することによって宇宙の過去、現在、未来を解明することができるのか、これらの疑問は、自然科学における最も基本的な課題である。素粒子・原子核物理学は前世紀を通じて著しい発展を遂げ、我々の物質観、宇宙観は大きな変更を受けてきた。そしてその成果の多くは新しい加速器を用いた実験によってもたらされた。JHF は素粒子・原子核物理の進歩を引き継ぎ、さらに押し進めるために必要な実験施設である。

20 世紀初頭には相対論と量子力学という二つの新しい物理原理が登場した。相対論はそれまでの時間、空間の見方を一変させ、量子力学はミクロな世界を記述する基本原理となった。一方、物質の最も基本的な構成要素を探す試みのなかで、時代とともに次々と基本粒子の内部構造が見つかって来た。つまり、原子は原子核と電子からなり、原子核は陽子・中性子の結合状態であり、さらに陽子・中性子はクォークからできている。そのなかで、物質の究極の構成要素とその相互作用を明らかにしようという素粒子物理学と、陽子・中性子やクォークを基本単位としてその多体系のつくる物質の多様な性質を解明しようという原子核物理学、ハドロン物理学が分化し発展してきた。

以下に、まず素粒子物理学と原子核物理学の今までの進展を振り返り、将来の発展を展望した後、両分野で JHF が果たす役割を述べる。

1.1 素粒子物理学の進展と展望

現在の素粒子物理学はいわゆる標準模型に基づいて理解されている。この模型は、1960 年代から 70 年代にかけての多くの実験的発見と理論的進展により提唱されるに至ったものである。標準模型では物質の基本単位はクォーク・レプトンであり、四つの基本相互作用、つまり強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、重力のうち重力を除く三つは同じゲージ理論という枠組で記述される。ゲージ理論では力はゲージ粒子というベクター粒子で媒介される。1980 年代前半における、強い相互作用を媒介するグルーオン、弱い相互作用と電磁相互作用を統合した電弱相互作用を媒介する W および Z 粒子の発見は、標準模型の成功を裏付けるものであった。さらに 1980 年代後半から 1990 年代にかけて、TRISTAN, SLC, LEP 実験によってゲージ粒子とクォーク・レプトンおよびゲ-

ジ粒子自身の相互作用が詳しく調べられ、ゲージ理論の予言と良く一致することが明らかになった。

一方、クォーク・レプトンの物理に関しても近年大きな進展があった。1994年にトップクォークがTevatron実験で発見されクォーク・レプトンの3世代構造が確立した。また、CP対称性の破れは、長い間中性K中間子系でのCP固有状態の混合という形でしか見つかっていなかったが、最近になってK中間子の崩壊過程においてもCPの破れが確認された(ϵ'/ϵ の測定)。ついで、KEKおよびSLACのBファクトリーで、B中間子系ではじめてCPの破れが発見され、標準模型の小林・益川機構に基づく予想と良く一致することがわかった。ニュートリノ物理では、スーパーカミオカンデ、SNO、K2K等の実験によって、ニュートリノ振動が起きていることが示され、ニュートリノは小さな質量を持つことが確実にになった。標準模型の範囲内ではニュートリノは質量を持つことはできないので、このことは標準模型の枠組を超える相互作用や粒子が存在する証拠である。このほかにも最近の進歩として、ミューオンの異常磁気能率の測定が大幅に改善され、標準模型の精密なテストが可能になったことがあげられる。

素粒子物理学の次の課題は標準模型でまだ検証されていない電弱対称性の破れと素粒子の質量の起源を解明するとともに、標準模型を超える物理を探ることである。標準模型に関しては、ゲージ粒子の性質やクォークフレーバーの物理は理解されてきているが、もう一つの柱である対称性の破れの機構に関しては良く分かっていない。これを検証するためにはヒッグス粒子を直接生成し、そのゲージ粒子やクォーク・レプトンとの相互作用を決める必要がある。またさらに次のステップとして、標準模型の範囲内では解決されない問題を追求することが重要となる。様々な理由から標準模型は電弱スケールで素粒子物理を記述する模型にすぎず、高いエネルギーではより基本的な理論で置き換えられると考えられている。例えば、ニュートリノが小さな質量を持つことは、電弱スケールより高いエネルギースケールにその起源があることを示唆している。理論的考察からは、標準模型の三つのゲージ群を統一する模型として超対称大統一理論や、さらに重力を含めた統一理論として超弦理論が提唱されている。また、標準模型を超える物理がどのようなものであるかは宇宙論のシナリオに大きな影響を与える。宇宙の暗黒物質が何であるかは素粒子模型と直接関連しており、初期宇宙でバリオン数生成が起こるためには小林・益川行列以外のCPの破れの原因が必要と考えられている。

標準模型の検証と標準模型を超える物理を探るために現在すすめられている素粒子実験のフロンティアとしては次のものがあげられる。

1. エネルギーフロンティア実験
2. ニュートリノ物理
3. クォークフレーバー物理
4. 低エネルギーにおける標準模型を超える物理の探索

第一の項目はTevatron、LHCや将来のリニアコライダー実験におけるヒッグス粒子の物理や、新粒子、新現象の直接探索があげられる。第二の項目は、太陽や上空大気、加速器からのニュートリノを使ったニュートリノ振動実験や、ニュートリノ放出を伴わない二重崩壊探索により、ニュートリノのフレーバー混合や質量の決定を目指すものである。第三は、電子・陽電子Bファクトリー実験、ハドロンコライダーのBの物理、K中間子稀崩壊実験等が対応し、標準模型の小林・益川行列を決定するとともに、それ以外のCPの破れやフレーバー混合の原因を発見することを目指している。最後の項目は対称性の破れに注目して標準模型を超える物理を探る実験(核子崩壊やレプトンフレーバーの破れの探索、レプトンや中性子の電気双極子モーメントの測定、CPT不変性の破れの探索等)やミューオン異常磁気能率の測定があげられる。これら以外にも暗黒物質やアクシオン探索等の実験は、宇宙物理とともに素粒子物理に深く関連している。

以上のように、素粒子物理は現在、標準模型の確立から、より基本的なレベルでの理解へと大きなステップを踏み出そうとしている。標準模型を超える物理を追求するには上記の各方面からのアプローチが必要である。また、もしあるフロンティアで新発見があった場合、他方面からのアプローチと合わせて、新しい物理の全体像を明らかにし、新たな段階の統一的な素粒子像を得ることができると考えられる。

1.2 原子核物理学の進展と展望

原子核物理では、ハドロンやクォーク・グルーオンを基本単位とする、強い相互作用により構築された複合粒子系の統一的理解を目指している。原子核、ハドロン・QCD のそれぞれの物質相では、その構造と性質の解明や、多体系でのみ現れる新現象の発見がなされ、少数量子多体系の秩序形成に関する研究が進展している。さらに、ハドロン間相互作用の研究が、これらの物質相の研究の間をつなぐ橋となり、複合粒子系の統一的理解に向け有機的な連携を保っている。以下、三つの中心的な研究対象について最近の研究動向を概説する。

1. 原子核の構造と多体現象

陽子・中性子で構成された原子核の研究は、約半世紀前に安定核で魔法数が発見されたことによって急速に進展し、原子核の描像は液滴としてのバルクな物質観から量子力学が支配するミクロな多体系へと大きく変わった。その後、振動・変形状態や巨大共鳴、カオスなど、多体問題特有の現象や核物質のダイナミクスに関する現象が次々と発見された。例えば、高スピン状態に現れる超変形状態の探査は、現在精力的にすすめられている。核反応論に端を発する核物質の統計熱力学的な研究も盛んに行われ、フェルミ液体-気体間の相転移現象の研究に発展している。これら多体現象の理解を一層深化させる必要があり、これと同時に、多体現象の研究対象は、高アイソスピンをもつ不安定核、ハイペロンを注入したハイパー核、超重元素などへと大きく広がっている。

2. ハドロン・QCD の構造と多体現象

クォーク・グルーオンの発見とともに強い相互作用の基礎理論である QCD が構築され、深部非弾性散乱などによるハドロン構造の理解が進んだ。その後、EMC 効果の発見を契機に、原子核、ハドロン相を、クォーク・グルーオンを基本粒子とする QCD 多体系として捉えなおす研究が始まった。現在においても、核子スピンの起源の問題に示されるように、ハドロン構造は十分に理解されていない。高温高密度核物質においては、QCD 相転移によってクォーク・グルーオン・プラズマ相ができることが予想されており、その探索が進められている。一方で、QCD 相転移の問題と関連して、原子核内のクォーク・グルーオン構造の研究も行なわれている。さらに、ハドロン質量の核物質密度依存性からカイラル対称性とハドロン質量の起源を探索するという QCD 相転移への新しいアプローチも始まっている。

3. ハドロン間相互作用と多体系の構築

多体系の構築に必要な相互作用の研究は、クォーク・グルーオンから原子核までを統一的に理解する上で重要である。現在、原子核の理解に必要なバリオン間の相互作用（核力）については、中間子を媒介とする従来の相互作用の枠組みに加えて、QCD の有効モデルによる短距離相互作用の研究が進んでいる。このような背景で、ハイパー核研究から得られるハイペロン-核子、ハイペロン-ハイペロン相互作用の情報は、こうしたバリオン間力の理解を進める上でとりわけ重要な役割を果たす。また格子 QCD を用いた第一原理計算によるハドロン間相互作用の研究も始まっている。さらに 2 体力に加え、バリオン 3 体力も研究対象であり、現在では非束縛 3 体系の散乱問題も扱えるようになっている。これら 2 体力と 3 体力を含んだ第一原理計算

により、質量数 10 程度の原子核の基底・励起状態の性質を再現できるようになってきた。質量数 10 以上の原子核については、従来からの殻模型、平均場計算、クラスター模型など、現象論的な計算手法が発展し続けている。これらの計算に必要な有効相互作用についても、真空中の 2 体相互作用から導出する方法が進化している。

これらの研究は広範な量子多体系をカバーしており、その研究に用いられる実験手法も多種多様である。例えば、加速器を用いた実験では、核子当たり 1 MeV 以下のエネルギーから 100 GeV を超えるエネルギーまで幅広い。ビーム種も、1 次ビームの電子、陽子、軽イオン、重イオンに加え、2 次生成粒子としての線、中間子、ハイペロン、中性子、反陽子、不安定核などがあり、それぞれの性格もプローブとしての役割や研究対象そのものなど千差万別である。また、偏極ビームやより冷却されたビームを用いて、スピン応答の研究や精密測定も行われている。世界の研究施設では、それぞれの研究施設の特徴を活かした最前線の研究が推進されている。

原子核、ハドロン・QCD の物質相で、複合粒子系の構造とその性質、物質としての動的応答の研究が進められ、さらに量子多体系でのみ現れる様々な現象が発見・提案されている。また、ハドロン間相互作用の研究は原子核、ハドロン相を結びつける架け橋の役割をしている。21 世紀の原子核物理学では、原子核、ハドロン・QCD の各相で新たな発見の機会に富んだ様々な多体問題を追究しつつ、これらを結ぶ相互作用の研究もこれまで以上に重要になってくる。また、様々な宇宙・天体現象にも、その応用は広がっている。ビッグバンから恒星内の燃焼サイクル、超新星爆発過程、中性子星の内部構造などの宇宙・天体に関わる現象は、クォーク・グルーオン相からハドロン、原子核相までの原子核物理学が扱うすべての物質相の性質や核力の性質と密接に関係している。

このように、原子核物理学の研究対象は極めて豊かで多様であり、21 世紀に入った現在も多くの問題と向き合っている。多様な研究対象の有機的な連携によって相互に確固たる架橋を構築し、それぞれの相を超えた統一的理解を目指している。

1.3 JHF と素粒子・原子核研究

JHF の 50GeV 陽子加速器は、3.4 秒周期で 3×10^{14} 個という、世界最大強度 (0.75MW) の陽子ビームを生成する。この世界でも類をみない大強度ビームを用いることで、素粒子・原子核の重要課題を解明する独創的な研究を発展させることができる。また、JHF における実験は、その強度のゆえに、世界のセンターとして、ユニークで、また重要な役割を担うことになる。

素粒子分野では、JHF の大強度を生かして高精度、高感度の実験が可能となり、前々節で述べた四つの研究分野のうち、2. ニュートリノ物理、3. クォークフレーバー物理、4. 低エネルギーにおける標準模型を超える物理の探索に大きな進展をもたらすことができる。特にニュートリノ振動実験は世界の先頭を走ることになり、ニュートリノのフレーバー構造の解明に大きく寄与する。また、この実験はニュートリノ相互作用における CP の破れの探索への重要な足がかりとも考えられる。JHF のニュートリノ実験は、今日まで最前線で目覚ましい成果を上げてきた我国の優位を生かし大きく発展させるものである。また、フレーバー物理においては、JHF で可能となる K 中間子の稀崩壊実験が、クォークフレーバーセクターの総合的な構造解明の一端をになうものと期待される。理論的不定性の小さい K 中間子の稀崩壊と B 中間子のデータを総合的に比較検討することで、標準理論を超える物理への手がかりを与える可能性を持っている。また、標準理論を超える物理の影響は、標準理論で禁止あるいは強く抑制されている過程に現れることがある。ミューオンのレプトンフレーバーの破れの探索実験では、超対称模型の予測する領域の多くに感度がある。またこの過程の研究は、ニュートリノの質量起源とも関係する重要な課題

である。加えて、ミューオン実験のための大強度ミューオン源の開発は、将来、ニュートリノファクトリーや、エネルギーフロンティアに新境地を拓くミューオンコライダーへと発展する可能性を持ち、その戦略的意義は高い。

JHF ですすめられる CP の破れやフレーバーの物理の研究は、エネルギーフロンティア実験と相補的な役割を担っている。JHF は新しい物理の最初の証拠を発見をする可能性を持つだけでなく、LHC 実験などで標準模型を超える物理の発見があった後も、その新しい物理における CP の破れやフレーバー混合を決定する重要な役割を担う。

このように、JHF は先に挙げた四つの素粒子実験のフロンティアのうち、三つの分野について世界の研究拠点となる。また、現在日本は、B の物理で目覚ましい成果をあげており、国際協力のもとに、Tevatron 実験や、LHC、リニアコライダー計画といったエネルギーフロンティア研究を組織的に進めている。JHF での素粒子実験はこれらと相まって、全ての重要な課題について日本の素粒子研究を発展させるという意義も持つ。

原子核物理学においても JHF は世界的な研究拠点として重要な役割を果たす。この分野の多彩な実験研究は、国内外の様々な実験施設で行われ、施設の特徴を活かした最先端の研究が推進されている。この中で JHF は、二つの大きな特徴をもち、これらを基盤として研究分野の一層の発展を目指している。

JHF の持つ第一の特徴は、50GeV 大強度陽子ビームから繰り出される大強度ハドロン 2 次ビームである。JHF では、 π 、K 中間子や反陽子といった多様なハドロン 2 次ビームが得られ、またその強度は現在の KEK-PS、BNL-AGS、CERN-SPS をはるかに凌ぐ。前節で述べた研究対象のなかでもハイパー核を含むストレンジネス物理や核内での中間子質量変化の研究においては 2 次ビームの大強度化に伴う研究対象の拡大と精密測定への道が拓かれ、原子核、ハドロン・QCD 相の多体系の構造研究やハドロン間相互作用の研究が一挙に進展すると期待される。また、反陽子ビームを用いた研究も反水素原子の精密分光にとどまらず、多方面にわたる反陽子科学の展開が可能となる。

第二の特徴は、1 次ビームエネルギーである。ドレル・ヤン過程の観測によるハドロン、原子核のパートン構造の研究には 50~100 GeV の陽子ビームが適している。偏極陽子ビームが得られれば、ハドロン分光においても、JHF はユニークな地位を築くことが可能となるだろう。核物質研究に関しては、50GeV 陽子ビームにより、フェルミ気体-液体相転移の相図を実験がカバーする範囲が拡大する。また、JHF で重イオン加速が実現すると、RHIC や LHC で得られる高温条件での実験とは対照的に、高密度条件下でのクォーク・グルーオン・プラズマ相の探索等の核物質研究が展開できる。

このように JHF は、多様な大強度ハドロン 2 次ビームと 1 次ビームエネルギーを活かした様々な研究分野を開拓することで、最先端の研究を強力に推進し、原子核物理学の発展に大きく寄与する。

JHF で提案されている素粒子・原子核物理学の実験プログラムは、多彩で個性的な内容を含み、外国からの実験提案や共同実験者としての参加表明が多数なされている。これに答える多様な実験の展開を可能とする多目的ビームライン・測定器の建設が推進されるべきである。また、提案されている実験の多くは中規模以下のもので、若手研究者が計画の立案、建設、解析に総合的に関与できる貴重な機会を提供する。JHF において中小規模の実験を幅広く実施していくことは若手研究者の育成のためにも重要である。

以上のように、JHF 計画は、素粒子、原子核それぞれの分野において、21 世紀の新たなフロンティアを切り拓き、世界のセンターとして大きな国際的貢献を果たすことを可能にする。また、国内外のエネルギーフロンティア実験などと補完しあい、我国の素粒子・原子核研究のバランスのとれた発展をもたらすと期待される。

2 ニュートリノ振動実験

2.1 物理的意義

素粒子の標準模型では、ニュートリノは質量を持たないので世代間の混合は起こらず、レプトンフレーバーはそれぞれ保存される。しかし、近年の神岡での水チェレンコフ実験をはじめとする実験によって、大気ニュートリノ (ν_μ) および太陽ニュートリノ (ν_e) が異なるフレーバーに移り変わる振動現象の存在が確立した。さらに、KEK-神岡間の長基線ニュートリノ実験 (K2K)[1] においても、大気ニュートリノの観測結果と一致する結果が得られ始めている。

ニュートリノ振動現象は、ニュートリノが、クォークのように質量と混合を持っていることを示している。質量は数 eV 以下であって、他の素粒子と比べ極めて小さい。ニュートリノ混合はクォークの混合行列 (CKM 行列) に対応する MNS 行列で表され、この行列は混合角三つと CP 対称性を破る位相一つを含んでいる。大気ニュートリノ振動に関与する混合角 θ_{23} は 45° に近く [2, 3]、また太陽ニュートリノ振動の混合角も大きいことが今までに明らかになっている [4, 5]。これらの大きな混合角はクォークの場合と対照的である。しかし現状では、質量差や 2 つの混合角の測定精度はまだ十分とはいえず、第 3 の角度は現在上限値しか得られていない [6]。

ニュートリノに質量があるにも関わらず他のクォークレプトンと比べ極めて小さい事実は、ニュートリノの質量起源に新しい機構が関与することを示唆している。標準模型では粒子の質量は電弱対称性の破れと湯川相互作用で理解される。一方、ニュートリノの質量がそれらに比べ小さいことは、シーソー機構のような高いエネルギースケールの物理に、ニュートリノ質量が関係しているとすれば、自然に理解することができる。質量の値に加え、クォークの場合と異なる大きな混合角は質量の生成機構に対する重要な情報である。

また、ニュートリノ混合に CP 非保存があれば、宇宙初期に物質・反物質非対称性を生成する種となる可能性がある。クォークの混合行列の位相による CP 非保存では、宇宙のバリオン数を説明することは不可能なので、ニュートリノの混合行列は、その面からも興味深い量である。

以上のように、ニュートリノの質量および混合行列要素は自然界の基本的な定数であると同時に、加速器で直接手の届かない高エネルギースケールの物理に対する窓として、大統一理論、弦理論、宇宙論などに大きなインパクトを与えるものである。

ニュートリノ振動の存在が確立した現在、まだ測定されていない第 3 の混合角 θ_{13} を測定するとともに、すでに測定されている質量差、混合角の測定精度をあげ、MNS 行列の全体像を明らかにすることが重要である。 θ_{13} は大気ニュートリノ振動の質量領域において、 $\nu_\mu - \nu_e$ 間の振動を引き起こすので、JHF で大強度の長基線ニュートリノ実験を行うことによって測定できると期待される。JHF では θ_{23} 測定の統計精度も飛躍的に向上する。

さらに θ_{13} が決定された後は、ニュートリノと反ニュートリノの振動確率の差を計ることによってニュートリノにおける CP の破れを測定することが検討されている。CP 非保存の効果は θ_{13} が有限であることによって初めて現れるので、先に述べた θ_{13} の測定はニュートリノにおける CP の破れの検証に道を開く実験であるともいえる。その意味からも、JHF でのニュートリノ実験の物理的意義は極めて高い。

2.2 実験の説明

JHF でのニュートリノ実験 [7] では、0.75 MW の陽子ビームの出力を生かし、振動が最大になるようにエネルギーを調整した大強度低エネルギーニュートリノビームをスーパーカミオカンデに打ち込むことによって、ニュートリノ振動現象の詳細な研究を行う。高磁場超伝導電磁石を使用して 50 GeV の高エネルギー陽子を加速器の内側

に曲げた後、標的に当てて π 中間子を生成し、その崩壊から ν を作る。こうして作られたニュートリノを 295km 離れた神岡地下観測所に設置された 50 キロトン水チェレンコフ検出器、スーパーカミオカンデで観測する。現在の設計は、現 K2K 実験に比べて約 100 倍の強度のニュートリノビームを目指しており、ニュートリノ振動が無い場合で年間（約 130 日間）約 3000 ニュートリノ反応事象がスーパーカミオカンデ有効体積（22.5k トン）中で検出可能である。

高強度ビームを生成する手法としては Off-Axis beam 法 [8] が特筆される。現在のデータから振動が最大になるビームエネルギーは 500～1000 MeV であると予想される。スーパーカミオカンデからビーム軸をずらすことによって、この値にエネルギーがそろったビーム（Narrow Band Beam）が得られ、振動しないニュートリノが作り出すバックグラウンドが大幅に軽減される。一方高精度統計を生かすために、ビームのスペクトラムと相互作用を精密に決定することが重要で、二つの前置検出器（ND280, ND2K）が必要になる。ND280 は標的から 280m の地点に置かれ、ニュートリノのビーム方向の測定と、種々のニュートリノ反応の研究、そしてビームに混在する ν_e の測定を行う。ND2K は標的から 2km の地点に設置される。この測定器の目的は、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 探索最大のバックグラウンドとなる π^0 事象の水チェレンコフ検出器中での振る舞いを調べ、 $\nu_\mu + N \rightarrow \pi^0 + X$ 反応の生成断面積を精密測定し、スーパーカミオカンデでの π^0 バックグラウンド事象の量を正確に見積もることである。従って、ND2K は測定精度が上がる第一期の後期において特に必要である。K2K 実験では Far/Near 比（スーパーカミオカンデと前置検出器でのニュートリノスペクトラムの比）の不定性が最大の系統誤差のもとであったが、これは JHF では ND2K によって小さくなる。

なお、 ν_e への振動確率は低いと予想されるため、 π^0 からのバックグラウンド事象を十分に抑えるためにはスーパーカミオカンデの完全復旧（2005 年頃予定）が必須である。

以上の実験条件が整い、0.75MW のビーム強度で 5 年間実験を行った場合、ニュートリノ振動のパラメータの測定精度は飛躍的に向上する。まず、未発見の $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を $\sin^2 2\theta_{13} < 0.006$ (90% C.L.) まで探索できる。これは現在の上限の約 20 分の 1 の高精度で、高い発見能力を有する。また $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ の生存確率のエネルギー依存性の精密測定によって、 $\sin^2 2\theta_{23}$ を 1% の精度、 Δm^2 を $1 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$ の精度で決定できる。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動仮説は、中性カレント反応事象を用いて確認できる。更に、 ν_μ が弱い相互作用をしないニュートリノ ν_s へ振動する確率を 10 % 以下のレベルで制限できる。これらの情報は現在のニュートリノ質量、混合についての高いエネルギースケールの物理からの考察を大きく進展させるものと思われる。

実験の前半に用いられるもののうち、現時点で比較的不定性が高いと思われるものは、高放射線環境下で長期間の使用に耐えなければならないニュートリノ生成標的、ニュートリノビーム収束用電磁ホーンシステムの設計製作等であるが、原理的に大きな問題は見当たらない。後述する海外の実験との競争を考え、初期よりビームパワーを当初設計に近いものにすることを主眼とした、加速器運転の立ち上げが望まれる。

一方 CP の破れの探索については現時点では解決しなければならない問題が多く、活発な R&D が行われている。まず、スーパーカミオカンデの 40 倍の有効体積を持つハイパーカミオカンデ建設のために、安価で高性能な光検出器の開発が行われている。また、JHF 加速器もその加速サイクルを高速化するとともに、空間電荷効果を減らすバリアバケットリリーフなどの技術を用いてビーム強度を 4MW（一期計画の 5 倍）にすることが検討されている。ビーム強度 4MW に耐えるニュートリノ生成標的の開発も計画を実施する上で重要な要素である。

ハイパーカミオカンデと 4 MW 陽子ビームで、2 年間のニュートリノビームと 6 年間の反ニュートリノビームを用いた測定を行うと、ニュートリノ振動における CP 対象性の破れ、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動の振動確率の差を $\sim 5\%$ (90% C.L.) の精度まで探索できる。ただし、CP の測定で上記の精度を達成するためには、前置検出器 ND2K でバックグラウンド量を 2% の精度で見積もる必要がある。

2.3 海外の計画との比較

ここでは JHF ニュートリノ実験の最初の 5 年間（前期）と、その後（後期）に分けて議論する。

実験前期で、海外で競争となる実験はアメリカの NuMI/MINOS 実験、ヨーロッパの CERN - Gran Sasso 間の OPERA と ICARUS 実験が挙げられる。各実験の紹介を以下に簡単に行う。

ICARUS / OPERA 実験（ヨーロッパ：2006 年開始予定、データ収集期間約 2 ～ 5 年）

ICARUS 実験 [9] と OPERA 実験 [10] はスイス、ジュネーブにある CERN 研究所でニュートリノビームを生成し、732km 離れたイタリアの Gran Sasso 研究所に設置される、ICARUS 検出器と OPERA 検出器で $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 振動を発見することが主目的である。 ν_τ を観測するためには重い粒子（質量 1777MeV）を生成する必要があり、平均エネルギー 18GeV の高エネルギーニュートリノビームを用いる。このため、ニュートリノ振動が起こる確率は現在の基線 732km では小さく、10 % 程度である。また、粒子同定のため高感度検出器が必要で、検出器自身の大きさはスーパーカミオカンデに比べて 10 分の 1 以下となっている。

MINOS 実験（米国：2005 年開始予定、データ収集期間約 2 年）

MINOS 実験 [11] は米国フェルミ研究所で生成したニュートリノビームを 730km 離れた Soudan 鉱山に設置した MINOS 検出器で観測する。MINOS 実験はフェルミ研究所に新設された高強度の Main Injector 加速器で生成される大強度ニュートリノビーム（JHF 加速器の約 1/2 の強度）を使用する。このニュートリノビームはエネルギー幅が広いので、振動しない高いエネルギーのニュートリノがバックグラウンド事象となり、測定の感度が下がる。また検出器の質量がスーパーカミオカンデの約 10 分の 1 のため、JHF ニュートリノ実験と比較して探索感度は落ちる。ただし、最近フェルミ研究所で検討されている Off-Axis 法を用いた実験（NuMI off-axis 実験）[12] は、JHF ニュートリノ実験とほぼ同じ感度を持つ。NuMI off-axis 実験は JHF ニュートリノ実験と同様に 2007 年頃開始を目指して、現在実験提案書を準備中である。

各実験の比較を表 2 に示す³。大まかな目安として、アメリカ・ヨーロッパの実験に比べ JHF でのニュートリノ実験は 10 倍の感度を持っている。ただし、最近検討中の NuMI off-axis 実験は JHF と同程度の実験感度を持つと予想される。

表 2: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動探索感度の比較表

	JHF ν	ICARUS	OPERA	MINOS	NUMI Off-Axis	K2K
陽子ビーム強度 (kW)	770	305	305	410	410	5.2
検出器の大きさ (トン)	50,000	3,000	1,800	5,400	~ 30,000	50,000
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 探索感度	< 0.006	< 0.04		< 0.03	0.01	~ 0.2
実験開始予定	2007	2006	2006	2005	2007	1999–

実験後期では、ニュートリノ振動での CP の破れの探索が中心のテーマとなる。現在提案されている計画は、アメリカ・ヨーロッパ・日本で考えられているニュートリノファクトリー計画、アメリカで計画中的 BNL からのニュートリノビームと次世代大型水チェレンコフ検出器 UNO (~ 0.5Mton) を使った計画 (BNL-UNO 計画)、BNL のニュートリノビームと 100kton 級の液体アルゴン飛跡検出器を使った実験、CERN での SPL (Super Proton Linac) と CERN から 130km 離れた Frejus トンネルに上記の UNO 検出器を設置する SPL ニュートリノ実験、

³ $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 探索感度: $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$, $\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$ の場合の $\sin^2 2\theta_{13}$ の探索感度 (90% C.L.)

SPL で β 線源を加速しニュートリノ源とする SPL- β ビーム計画がある [13]。各実験ともほぼ同程度の感度を持つ。しかし、ニュートリノファクトリーは加速器建設予算が現在の見積もりで 2000 億円規模と非常に高価なこと、100kton 級液体アルゴン飛跡検出器は実現可能性が示されていないこと、SPL は LHC 後にしか建設されないこと、SPL- β ビーム計画は大強度 β 線源の加速の実現可能性が示されていないこと等、現時点で実現可能性は低い。これらに比べ、JHF ニュートリノ実験による CP の破れの探索は現時点でもっとも実現可能性が高い。

2.4 評価、意見

JHF で提案されているニュートリノ振動実験は、現在より一桁以上の振動感度でニュートリノの世代間混合を測定・検証できるので、実験の意義は極めて高い。開発の完了していない要素はあるが、科学的成果は十分に期待できる。また現在 JHF ニュートリノ実験に参加を表明している日本の大学・研究機関に所属する研究者数は約 80 名程度になり、これに加えて、韓国、アメリカ、カナダ、ヨーロッパの各国、ロシアが興味を示しているので、実験を遂行する上でのマンパワーも評価できる。

上記の物理感度達成後は、ニュートリノと反ニュートリノの振動の差の探索が主要テーマとなる。ここで見出される可能性のある「ニュートリノ振動における CP の破れ」はバリオン生成の起源に結びつく極めて重要な現象である。この研究を実施するためには 1 メガトン水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデが建設され、JHF50GeV PS のビーム強度が数 MW に増強されることが必須であり、両者ともその実現に相当の開発研究を必要とする。一方、JHF50GeV PS は現時点で建設が決まっている加速器の中で、唯一数 MW のパワーでニュートリノ生成を行うものである。ニュートリノ振動における CP の破れの探索で開ける物理学の重要性を鑑みるに、その実現に向けて着実に開発研究を続けるべきである。

計画を進める上で海外からの研究者の参加は、外国からの資金調達の面からも重要であるが、現在ニュートリノ振動実験が JHF の実験として正式に認められていないことが、国際協定の成立を困難にしている。一方、既に第 2.3 章「海外の計画との比較」で述べたように、競合する実験がアメリカ、ヨーロッパに存在する。これまでニュートリノ振動は日本がリードして切り開いてきた分野であり、ニュートリノにおける CP の破れの研究といった真に大強度フロンティアの加速器の特徴を生かせる実験を今後行っていくためにも、早急にニュートリノビームライン等の実験施設の建設が認められることが必要である。

2.5 結論

日本がリードして切り開いてきたニュートリノ振動の観測は、標準理論で説明できない現象を初めて確立した。さらに、クォークとは全く異なる大きな世代間混合を示すデータは、未知の物理的機構の存在を示唆している。現在 ν_μ から ν_e への振動は測定されておらず、ニュートリノの世代間混合の全体像が明らかでないため、今後もニュートリノ物理の発展を図ることが重要である。JHF で提案されている計画では、K2K の 100 倍以上の強度のニュートリノビームをスーパーカミオカンデに打ち込むことができる。これによって振動パラメータを精密に測定できるだけでなく、将来、レプトンセクターでの CP の破れの発見に繋がる可能性がある。物理的重要性と将来性、および JHF に対抗する海外の実験が計画されていることなどを考慮すると、この分野に重点を置いて、ビームラインの建設を一刻も早くスタートさせるべきである。

参考文献

- [1] S.H. Ahn, *et al.* (K2K collaboration), Phys. Lett. **B511**, 178 (2001).
- [2] M. Shiozawa, "Experimental Results on Atmospheric Neutrinos in Super-Kamiokande-I", at NEUTRINO2002,
<http://neutrino2002.ph.tum.de/pages/transparenties/shiozawa/> .
- [3] K. Nishikawa, "K2K Results", at NEUTRINO2002,
<http://neutrino2002.ph.tum.de/pages/transparenties/nishikawa/>.
- [4] S. Fukuda *et al.* (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Lett. **B539** 179-187 (2002).
- [5] Q.R. Ahmad *et al.* (SNO Collaboration), Phys. Rev. Lett. **89**, 011302 (2002).
- [6] M. Apollonio *et al.* (CHOOZ collaboration), Phys. Lett. **B466**, 415 (1999).
- [7] JHF Neutrino Working Group, Y. Itow *et al.*, " The JHF-Kamioka neutrino project ", hep-ex/0106019 (2001).
- [8] D. Beavis, A. Carrol, I. Chiang, *et al.*, " Proposal of BNL AGS E-889 " (1995).
- [9] <http://pcnometh4.cern.ch/>, <http://www.aquila.infn.it/icarus/>.
- [10] <http://operaweb.web.cern.ch/operaweb/index.shtml> .
- [11] <http://www-numi.fnal.gov/> .
- [12] "Letter of Intent to Build an Off-Axis Detector to Study $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Oscillations with the NUMI Neutrino Beam", D. Ayres. *et al.*, hep-ex/0210005.
- [13] T. Nakaya, " Future Experiments with Super Neutrino Beams'' at NEUTRINO 2002,
<http://neutrino2002.ph.tum.de/pages/transparenties/nakaya/index.html>.

3 K 中間子の稀崩壊の物理

3.1 物理的意義

CP 対称性やフレーバー物理の研究は最近大きく進展した。FNAL および CERN の実験によって $Re(\epsilon'/\epsilon)$ の値が決定され、 $K^0 - \bar{K}^0$ 混合だけではなく、崩壊の振幅にも CP の破れが存在することが見つかった。また、KEK と SLAC の B ファクトリー実験が始まり、K 中間子系以外で初めて CP の破れが発見された。実験結果は標準理論でよく説明出来、クォークセクターの CP の破れの「主な」原因が小林益川機構によることがほぼ確立された。

一方、宇宙での粒子・反粒子の数の非対称性の起源は標準模型の CP の破れだけでは説明できない事が理論的に明らかになり、フレーバー物理の焦点は、超対称模型など標準模型を超える機構によるフレーバー混合や CP の破れを探ることに移りつつある。クォークセクターで新しい物理による CP の破れを探るためには、B 中間子系

と K 中間子系の両面から 10%以下の精度で小林益川行列の ρ, η パラメータの測定を行い、CP の破れを一つのパラメータで説明している標準理論の矛盾を発見することが適切な戦略である。

この目的のために特に重要な過程は $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 及び $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ である。これらの過程は、強い相互作用からくる分岐比の理論的不定性が小さいという利点を持つ。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ では理論的不定性は 2%程度、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ では数%と評価されている [1]。このため、これらの崩壊分岐比の測定は、新しい物理の効果を高い感度で発見するための強力な手段となる。例えば、将来 LHC などで超対称粒子が発見されたとしても、その相互作用に現れるフレーバー混合や CP の破れを決定できるのは、依然として K や B 中間子を用いたフレーバー物理の実験である。

標準模型を超える物理を探す別の方法としては、標準模型では禁止または抑制されている過程を観測することがあげられる。例えば $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ で時間反転対称性の破れ (T-violation) を表すミューオンの横偏極度が標準模型の予測値を超えていることが発見されれば、CP を破る未知の機構の存在が明らかになる。このような現象は、ヒッグス場を三つ以上含む模型や、超対称模型の特殊なパラメータ領域で起こりうる。また、 $K \rightarrow e \mu$ などの K 中間子崩壊においてレプトンフレーバーが破れる過程の探索は、例えば、R パリティを破る超対称模型の相互作用等に対して強い制約を与える。

3.2 実験の説明

K 粒子の崩壊から標準模型を超える物理を発見するためには、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$, $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の崩壊を 100 事象以上⁴ 観測し、 η や $|V_{td}|$ を数%の精度で測定する必要がある。また、 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ における μ の横偏極を用いた T-violation の実験は、現在よりも一桁以上感度を上げて探索することが望ましい。

3.2.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の崩壊の分岐比が約 3×10^{-11} と予測されているのに対し、現在の実験値は $< 5.9 \times 10^{-7}$ (90%CL)[2] の上限のみであり、飛躍的な感度の向上が必要である。JHF の B-line で 2×10^{14} protons/pulse のビームを用いることを想定した実験提案では、350 日 (実質 3 年) あたり約 1000 事象の観測が期待される [3, 4]。

この実験を行う上で重要な点は、バックグラウンドを抑え、理解することである。主要なバックグラウンドは $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ の崩壊による 4 個の光子のうち 2 個を見失う場合であり、これを 8 桁以上抑制することが要求される。そのため、この実験は、崩壊領域をガンマ線の veto counter とカロリメータで覆ってバックグラウンドからの余分なガンマ線を検出し、細い K_L ビーム (ペンシルビーム) を作って横方向の運動量 (p_T) の測定精度を向上しつつ、 p_T の大きい π^0 (2 個のガンマ線) を持つ事象を選択する。また、物質量が大きく長いコリメータを用いることにより、ビームの裾野と物質の反応によって起きるバックグラウンドを抑える。

実験は、段階を追って進められる。まず、KEK の 12GeV の陽子シンクロトロンを用いて行われる E391a 実験はパイロット実験としての位置づけを持ち、これにより、シミュレーションなどでは予測しきれないバックグラウンド等についての知見を得る。E391a は既にビームラインの建設とテストを終えており、2002 年の秋にカロリメータだけを用いたテストを行い、2004 年から 4 ヶ月、本実験を行って 3×10^{-10} の上限値を目指している。

JHF の第 1 期には、二つの案が検討されている。一つは、A-line の標的に 2×10^{13} protons/pulse のビーム強度 (最大強度の 1/10) を当て、K 中間子を 16 度の角度で取り出して E391a の測定器に導き、200 日間のデータで、10 事象観測する案 [5] である。もう一つは、B-line の電磁石を海外の施設から 移設する案である。第 2 期に

⁴この報告では、標準模型で予想される分岐比 $Br(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) = 3 \times 10^{-11}$, $Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = 1.0 \times 10^{-10}$ を仮定した。

は B-line の標的から K_L ビームラインを 10 度の角度で取り出し、大強度に耐えるように改良された測定器を用いて、100~1000 事象観測する精密測定を行う計画が提案されている。

3.2.2 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の崩壊は、KEK などが参加した BNL E787 が 2 事象観測し、 $(1.57_{-0.82}^{+1.75}) \times 10^{-10}$ の分岐比 [6] を測定している。さらに改良を加えた BNL E949 は 2002 年から実験を開始し、2 年間 (6000 時間) で約 10 事象観測することを目指している。

JHF では $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ の崩壊を 3 年間で約 50 事象観測する実験が検討されている [7, 8]。これは、BNL E787 や E949 と同様に、 K^+ を標的内に止め、 π^+ のみが観測される事象を集める手法を取る。 $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0, \mu^+ \nu$ などの二体崩壊のバックグラウンドを、出てくる粒子の重心系での運動量を正確に測ることによって避けることができる利点がある。

一方 stopped K の実験の手法では、現在の E949 と比べて大幅にビームの強度を上げるのは難しい。静止標的やその上流の減速材での K^+ や π^+ の反応レートが高くなってしまいうためと、 π^+ を同定するためにマイクロ秒のオーダーで $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ の崩壊チェーンを観測するためである。従って、JHF の設計値よりエネルギーの低い 30GeV の陽子を用いて、ビームスプリを延長して瞬間レートを下げ、 K^+ の運動量を下げることによって標的内に止まる確率を上げる (x1.5)。また、解析段階での事象の選別を最適化し (x1.2)、高いレートに耐える測定器を用いる (x2.0) などの、種々の改良を積み重ねる (カッコ内の数字は E949 と比較)。

第 1 期には、A-line の T1 標的から引き出される、二重の K/π 分離器を備えた K^+ ビームラインを用いる。

3.2.3 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ での T の破れ

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ 崩壊のミューオンが有限の横偏極を持つと、これは T の破れを表す。現在の測定結果は、KEK E246 による $P_T = -0.0042 \pm 0.0049 \pm 0.0009$ であり、0.5% の精度で 0 と矛盾しない [9]。JHF では、新しい実験装置を用いて、この横偏極の上限値を 10^{-4} まで下げる実験が検討されている [10]。この実験は E246 と同様、 K^+ を標的内に止め、出てきた μ^+ をさらに別のアルミの板 (polarimeter) に止め、 μ から壊れて出てくる e^+ の方向の分布から μ の偏極度を測定する。また、 K^+ を止める標的を 線検出器で囲うことによって $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ の π^0 の方向を測り、上記の偏極度と組み合わせて T-odd な変数とする。E246 からの主な改善点は次の通りである。1) 線検出器の前面に置いた測定器で 線の入射位置を測定することにより、 π^0 の運動量の測定精度を改善し、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ などのバックグラウンドを抑え、また T-odd な量の精度を上げる。2) アルミの板と MWPC の積層のポラリメータを使うことにより、アクセプタンスと偏極度に対する感度を向上する。3) JHF のビーム強度を生かし、 K^+ の強度を E246 の約 40 倍にする。

第 1 期には、A-line の T1 標的から引き出される、二重の K/π 分離器を備えた K^+ ビームラインを用いる。第 2 期に実験を行う場合は、延長した A-line から引き出す K1.1 ビームラインも使うことも可能である。

3.3 海外の計画との比較

3.3.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を観測する海外の将来実験としては、BNL の KOPIO 実験 [11] が、350 日 (実質 3 年) で $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を約 50 事象観測することを予定している⁵。

この実験の利点は、光子の方向を測定して K_L の崩壊場所を求め、 K_L の TOF を測定することにより、崩壊の kinematics を決定してバックグラウンドを抑えることである。一方、TOF を測定するために平均 0.7 GeV/c の低い運動量の K_L を用いるのでバックグラウンドのガンマ線のエネルギーも低くなり、veto 効率は下がる。

KOPIO に対する JHF の実験の強みは、高い陽子強度を生かした統計精度と、高いエネルギーの陽子・ K_L を生かしたガンマ線の高い veto 効率である。また、高い陽子強度を生かして K_L ビームを絞ることで π^0 の P_T の精度を向上し、バックグラウンドを抑えることができる。

3.3.2 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$

FNAL CKM 実験⁶は、decay in flight の K^+ を用いて 390 日で $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ を約 100 事象観測する予定である [12]。Decay in flight の K^+ を用いる利点は 1) 標的となる物質がないので、 π^+ の散乱などによるバックグラウンドの問題や、レートの問題が小さい、2) π^+ の粒子識別のために反応の速い RICH を用い、 $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ の崩壊チェーンの追跡が不要なので、高いレートに耐える、3) 高いレートでの μ^+ の排除が容易、4) ガンマ線のエネルギーが高いので veto が容易、などである。

これに対する JHF での実験の強みは、BNL E787, E949 で確立した手法を用いているために、より確実な成果が期待できる点である。

3.3.3 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ での T の破れ

BNL の E936 実験は、decay in flight を用いて $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ における T の破れをさらに一桁よい感度で測ることを提案し、BNL で承認されたが、その後の情勢の変化のために実験が行われる可能性はほぼ無くなった。又、 ϕ -factory を用いて $K^+ K^-$ の対を生成し、 μ^+ の横偏極を 5×10^{-4} の精度で測る実験も提案された [13] が、現在、この実験が行われるという情報はない。

3.4 評価、意見

JHF が開始される時期には、B 中間子についてもより精密な測定が可能となり、CKM, KOPIO 等の次世代の K 中間子実験も海外で始まる。こうした中で、確実に新たな知見をもたらし、海外との競争に勝つことが必要である。

⁵KOPIO は BNL で承認され、レプトンフレーバーの破れを探る MECO 実験と合わせて NSF に予算を申請している。しかし、現段階では建設のための予算はまだ承認されていない。

⁶CKM 実験は FNAL で承認され、データ収集は 2008 年以降の予定である。

3.4.1 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 実験

$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比を精密測定することの物理的意義は非常に高いが、従来の実験方法では、理論で予言される分岐比に遠く及ばず、多くの開発研究が必要である。従って、世界初の観測を行うことを初期の目標に、段階的に実験を進めていくべきである。まず E391a において、バックグラウンドの理解、排除について経験を積み、さらに JHF 第一期に向けた測定器や実験の手法の検討、大強度の陽子ビームに対応できる標的やビームダンプの製作法の検討、さらに高いレートに耐える測定器の開発等を行う方針は適切である。当初、A-line で KOPIO に先駆けて世界初の観測をおこなって、高精度観測への足掛かりとすることは意義がある。また、早期に B-line と K_L ビームラインを建設し、100 事象以上の観測を行うべきである。一方、実験を認めるにあたっては、実現性について適宜、評価が行われる必要がある。特に 1000 事象の観測については大幅な手法の改良が必要である。

3.4.2 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 実験

JHF の実験で提案されている感度を達成するためには、従来の実験からの細かな改善を、確実に達成することが鍵となる。

特に、測定器の高い計数化と、加速器の duty factor の低減は重要である。また、測定器を全て作るよりは、BNL E949 の実験装置を JHF に移設して必要な改良を施すのが現実的である。この実験を行う場合には、CKM の実験開始とほぼ同時期の JHF の第 1 期に、30GeV の陽子を用いるのが適切である。CKM と競合するため、十分なマンパワーが必要である。

3.4.3 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ での T の破れ

これは現時点では、標準模型の予想値に達する感度を持つ実験計画ではなく、また $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ と $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ が探る物理と比べ、より特殊なモデルの効果を探る実験である。競争する実験は無いので、 K^+ が 10MHz という高いレートの環境で stopped K を用い、 μ の崩壊を待つ手法を確立するための R&D を行い、実験を開始することが得策である。

3.4.4 K の実験全体について

提案されている 3 つの実験計画の物理的意義は高い。だが目標とする実験精度も従来の実験と比べて非常に高いため、3 つの実験計画に必要な開発研究は総和としてかなり大規模なものとなる。又、3 つの実験の緊急度、海外のプロジェクトに対する競争力等にも差異が見られる。JHF における K 中間子を用いた素粒子物理の重要性は論を待たないが、JHF 初期には最も重要かつ緊急度の高いテーマに的を絞り、力を結集して確実に成果をあげる事が望ましい。同時並行ではなく、最終的に成果が最大になるようなステージングが重要である。具体的なプランは K 中間子を用いた素粒子物理を推進するコミュニティ（以下 K コミュニティ）が主体となって議論し、最適な戦略を提案することが望まれる。

委員会での検討では、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の観測に目標を絞って K コミュニティの力を結集するべきという意見が強かった。このモードは強い相互作用による不定性が最も小さい「ゴールデンモード」であり、CKM 行列の精密測定、標準理論を超えた物理の探索とそこでのフレーバーの物理と、その物理的意義は大きい。提案されている実験は最終的に 1000 事象の観測を目指しており、精密測定に力点が置かれている。これを達成するための開発

研究は非常に困難であるが、E391a 実験をステップにして段階的な開発を行うシナリオには説得力がある。

3.5 結論

CERN、FNAL での ϵ'/ϵ の実験、および KEK、SLAC での高輝度の B ファクトリーによって、小林・益川機構による CP の破れが確立し、次のステップとして、標準理論を超える物理を起源とする CP の破れの探索が望まれる。その探索の有効な手段として、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ と $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比の精密測定実験、および $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$ の T の破れの実験がある。これら全ての測定を行うのが理想的であるが、JHF 開始時には関連研究者の協議によって一つに絞って進めることが、効率的かつ現実的である。本委員会としては $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の測定実験を推奨する。これは、KEK PS E391a 実験を JHF 第 1 期計画において発展させることにより、世界初の観測を目指すとともに、高精度測定の基盤が確保できるからである。ただし、引き続き第 2 期における精密実験を行うに当たっては、それまでの成果に基づいて実現性を評価する必要がある。

参考文献

- [1] G. Buchalla and A.J. Buras, Phys. Rev. **D54**, 6782 (1996).
- [2] A. Alavi-Harati *et al.*, Phys. Rev. **D 61**, 072006 (2000).
- [3] G.Y. Lim, Presentation at the committee, Oct. 12, 2001.
<http://www-conf.kek.jp/ipns-rpc/slides/20011012/RareKDecay/report.html>
- [4] G.Y. Lim, Proceedings of the International Workshop on CP Violation in K, KEK Proceedings 99-3, p.205 (1999).
- [5] C.S. Lim, T. Sato, presentations at NP02 Workshop, Sep. 27-29, 2002.
- [6] S. Adler *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88**, 041803 (2002).
- [7] T. Komatsubara, Proceedings of the Kaon Decay Workshop for Young Physicists, KEK Proceedings, 2001-23, p.115 (2002).
- [8] T. Komatsubara, presentation at NP02 Workshop, Sep. 27-29, 2002.
- [9] M. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83**, 4253 (1999).
- [10] Y. Kudenko, presentation at NP02 Workshop, Sep. 27-29, 2002.
- [11] I-H. Chiang *et al.*, "KOPIO - a search for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ", proposal.
- [12] J.Franks *et al.*, Charged Kaons at the Main Injector - A Proposal for a Precision Measurement of the Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ and Other K^+ Processes at Fermilab Using the Main Injector,
<http://www.fnal.gov/projects/ckm/documentation/public/proposal/proposal.html>, (2001).
- [13] P. Privitera, hep-ph/9605416 (1996).

4 大強度ミュオンビームによる物理

4.1 物理的意義

この研究プログラムは、JHF の大強度の陽子ビームを用いて従来より 3、4 桁上回る強度を持つミュオン源を作ることにその基礎を置いている。これを用いた研究プログラムの中で、素粒子物理学の研究上重要性和緊急性が高い実験は、レプトンフレーバーの破れをはじめとする標準模型を超えた物理の探索である。更に、このミュオン源は生命科学、物質科学、工学への応用が考えられる他、ニュートリノファクトリーやミュオンコライダーなど、将来の新しいタイプの加速器の開発に繋がるものでもある。

以下に、それぞれの実験計画の物理的意義を述べる。

1. レプトンフレーバーの破れの探索

ニュートリノの質量混合によるレプトンフレーバーの破れの効果は、ミュオンの過程においてはきわめて小さく、これが発見されれば直ちに標準模型を超える物理の証拠となる [1]。例えば、標準模型を超える物理として有力視されている超対称模型 (SUSY) には、超対称性を破る項が引き起こすレプトンフレーバーの破れが一般に存在し、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊や $\mu N \rightarrow eN$ 転換などのフレーバーを破るミュオンの稀過程がおこる。

JHF で計画されている大強度ミュオン源を用いた実験は、ミュオンを原子核に捕獲させ、 $\mu N \rightarrow eN$ 転換を、 10^{-19} の分岐比まで探索することを最終的な目標としている。これは、現在の上限值よりも約 7 桁低く、現在進行している他の実験の目指す探索感度よりも 2 桁以上低い。この分岐比を達成することにより、SUSY GUT モデルや SUSY シーソー模型によって予言されるパラメーター領域のうちで、LHC で超対称粒子を発見できる領域と同程度の領域を探索できる。[2]。

また、このような現象を発見後は、より統計を上げることにより、レプトンフレーバーの破れを引き起こす相互作用の詳細が明らかになり、これが統一理論のスケールの物理に、新しい情報をもたらすと期待されている。このようにレプトンフレーバーの破れの探索は、その発見の重要性はもちろんのこと、素粒子の究極理論の性質を探る上でも重要であり、ミュオンを用いた研究プログラムの中でも特に物理的意義が高い。

2. ミュオンの磁気モーメント、電気双極子モーメント、寿命の測定

ミュオンの異常磁気モーメント $g-2$ や電気双極子モーメントの標準模型での値は理論的に極めて精密に計算されており、この予測値からずれが観測されれば、標準模型を超える新たな物理の証拠となる。最近報告された異常磁気モーメント ($g-2$) の測定値は、標準模型の予想値からずれており [3]、超対称性の証拠との指摘もある。JHF での実験時期は LHC 実験の開始後になるため、新しい物理の発見よりはむしろその精密化に重点が移ると考えられるが、 $g-2$ の測定は、例えば、超対称模型の特定のパラメータに良い感度を持っているため、より精密な測定を行う意味は大きい。

また、ミュオンの電気双極子モーメント (EDM) が有限値を持つことが確認されれば、これは時間反転不変性の破れの直接的証拠であり、さらに CPT を仮定すれば小林・益川機構以外の CP の破れが存在することを示しており [4]、発見の物理的意義は高い。ミュオンの寿命や Michel パラメータの精密測定は、標準模型の基本的なパラメーターの精度を上げることに寄与できる。

3. 低エネルギー大強度ミュオンの応用

大強度の (特に負の電荷の) ミュオンがあれば、新たな生命科学、物質科学、あるいは工学的な応用分野が飛躍的に発展する。例えば、ミュオンを触媒とする核融合過程の研究、試料内にミュオンを止めてそこ

から放射されるミュオンX線を観測することによる非破壊元素分析、生命科学の分野でもミュオンX線を用いた脳内の精密なマッピングなどの他分野への応用が次々と開拓されている。

4. 将来計画（ニュートリノファクトリ・ミュオンコライダー）に向けての R&D

大強度ミュオン源の実現は、他の研究プログラムへと発展する要素を含んでいる。特に、日本で考案されている FFAG 加速器をベースにしたニュートリノファクトリー案 [5] は、技術的に JHF での大強度ミュオン源 (PRISM)[6] 計画の延長上にある。ミュオン冷却のプロセスを必要としないため強度を上げやすく、ニュートリノにおける CP の破れを高い感度で探索する道を開く。また、現在、電子陽電子コライダーはシンクロトロン放射によるエネルギー損失の問題から、線形加速器への移行を余儀なくされているが、大強度のミュオン源が得られれば、コンパクトな円形加速器を用いて高エネルギー（ ~ 3 TeV 程度）のミュオン・コライダーを作ることが可能になる。このような技術開発は、例えば s-チャネルのヒッグス生成を目的とするヒッグスファクトリーや、さらに高エネルギーに加速して LHC やリニアコライダー以後のエネルギーフロントティアを探索する計画に発展する可能性がある。

4.2 実験の説明

以下に、現在提案されている大強度ミュオンビーム (Phase Rotated Intense Slow Muon; PRISM) と、上で述べたテーマの中でも物理的意義と緊急度の高い $\mu N \rightarrow e N$ 転換探索実験を中心に、それらの計画と現状を説明する。

4.2.1 大強度ミュオン源 (PRISM)

大強度ミュオン源を作るためには、まず、50 GeV PS から陽子ビームを数 nsec の短いバンチ幅のまま、速い取り出しモードで取り出し、生成標的に衝突させる。生成されたパイオンは、大立体角の強磁場ソレノイドを用いて捕獲し、下流のソレノイド磁場に導く。この中で崩壊して得られたミュオンは、幅広い運動量分布を持つが、バンチの時間幅は短い。このミュオンを、エミッタンスが大きく、幅広い運動量の粒子を加速・保持できる Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) 加速器に入射する。約 5 回周回する間に RF をかけてミュオンを位相空間で回転させ、時間幅を広げる一方でエネルギーをそろえる。これにより、運動エネルギー 20 MeV、相対幅 3～5% の大強度の低エネルギーミュオンビームが得られる。期待されるビーム強度は既存のミュオンビームの 1000～10000 倍の $10^{11} \sim 10^{12}$ muons/sec である。

PRISM の実現には、以下の様な多岐にわたる装置とその R&D が必要である。

1. 50GeV PS から陽子ビームを取り出すための、非常に速い立ち上がりを持つキッカー電磁石とそのための電源の開発。
2. FFAG 加速器

すでに原理実証用の小型の FFAG を用いて陽子が 500 KeV まで加速され、これまでの 100 倍以上も大きいアクセプタンスを持つことが確認されている。現在 150 MeV まで加速できる陽子 FFAG を建設中で、これを用いて入射、取り出しの研究が行われる予定である。また、将来は鉄の磁極を用いずにコイルだけで勾配磁場を発生することにより、アクセプタンスを改善する予定である。

3. 高周波加速空洞

短時間で位相回転を終えるためには、高い加速勾配 (200kV/m 程度) をもつ RF が必要である。最近金属磁性体を用いたものが開発されており、実機より小さな試験空洞ではあるものの 220kV/m の加速勾配が達成されている。今後、実機サイズでの実証実験に進む予定である。

4. 大立体角パイオン捕獲

超伝導電磁石を用いて強磁場を発生させパイオンを大立体角で捕獲する技術については、超伝導電磁石が標的から生成する極めて高い放射線にさらされるために、特に遮蔽が困難な中性子による高い熱負荷が問題となっている。入熱の見積もりは現在のところシミュレーションコードに頼らざるを得ず、設計における不定性の原因になっている。KEK12GeV PS においてテスト用超伝導磁石を高い放射線環境下で運転し、シミュレーションコードのチェック、放射線下での超伝導磁石の挙動を調べるための実験の準備が進められつつある。

5. パイオン生成標的

1MW 級の大強度の陽子ビームによる熱および熱衝撃に耐えうるパイオン生成標的の開発が行われている。現在、有望なのは炭素を用いた固定標的、ビームに当てた後移動させて冷却を行う金属移動標的、水銀を用いた液体標的である。

4.2.2 PRISM ビームを用いた $\mu N \rightarrow eN$ 転換探索実験

JHF での $\mu N \rightarrow eN$ 転換探索実験では、まず PRISM で得られた負のミューオンビームを静止標的に止める。ミューオンは標的の原子核に捕獲されてミューオン原子を生成し、その後すぐに基底状態まで遷移する。ほとんどの軌道上のミューオンは、原子核の陽子と反応して ν_μ になるか、あるいは軌道上で崩壊するが、 $\mu N \rightarrow eN$ 転換の場合は、ほぼミューオンの質量と同じエネルギーを持つ電子が放出される。

PRISM ビームは $\mu N \rightarrow eN$ 転換の探索にとって二つの優れた特徴を持つ。一つは、エネルギーの広がりが少ないため、薄い標的でも多数のミューオンを止めることができる。薄い標的を用いると、放出される電子が標的を出る際のエネルギー損失が小さく、軌道上で崩壊する電子 (ミューオンの質量よりも低いエネルギーを持つ) とのエネルギーの分離が良い。もう一つは、ビームにほとんどパイオンが含まれないことである。従来の実験ではパイオンの radiative capture が主なバックグラウンドになっていたが、PRISM では FFAG 加速器を周回するうちに大半のパイオンが崩壊するため問題にならない。

その反面、PRISM ビームは繰り返し最大でも 50 Hz と小さく (後述する MECO 実験では約 1MHz)、瞬間強度が高い。そのため、ミューオンの静止標的と測定器の間に螺旋状に配置したソレノイドでエネルギーの弁別を行い、信号領域のエネルギーの電子のみ測定器に導く方法が提案されている。これにより、測定器のレートを 9 桁減少させることが可能である。こうして、加速器の全強度を用いると約 1 年間で 10^{-19} の分岐比までの探索が可能となる。

4.2.3 その他の実験

PRISM ビームは低エネルギーで、かつエネルギー分布がそろっているため、標的内の目標位置に容易に止めることができる。このため、静止ミューオンを用いる、ミューオン X 線による非破壊元素分析や生化学分析などに

適している。また、ビーム強度が高いためにこれらの測定を短時間で高精度に行うことが可能である。また、上で述べた $\mu N \rightarrow e N$ 転換実験の他にミューオニウム、反ミューオニウム転換 ($M \rightarrow \bar{M}$) や負電荷ミューオン、正電荷ミューオン転換 ($\mu^- \rightarrow \mu^+$) 等のレプトンフレーバーの破れの探索にも有効である。

g-2 実験を行う場合は、パイオン生成標的を共有して、前方に二次パイオンビームを取り出すことにより、偏極度の高い、大強度かつ比較的高エネルギーのビームを生成する。これにより、従来より一桁以上統計精度のよい測定が可能となる。

ミューオンの EDM 測定は、PRISM で得られた低エネルギービームを 0.5 GeV/c 程度に再加速して蓄積リングに入射し、g-2 によるスピンの回転を相殺するように電場をかけ、EDM によって生ずる鉛直方向のスピンの回転の効果を観測することにより行う。

4.3 海外の計画との比較

4.3.1 世界のミューオン源

現在、世界の主なミューオン源は PSI (スイス)、RAL (英国)、KEK (日本)、TRIUMF (カナダ) にある。いずれも多数のビームラインを持つ、多目的なミューオン施設である。それぞれの代表的なビームラインと、今後建設が予定されている MECO 実験のためのビームラインと PRISM ビームラインについて、そのビーム強度と運動量を表 3 にまとめた。

表 3: 世界の主な大強度ミューオン源

研究所 (施設)	最大ビーム強度 (μ/s)	運動量 (MeV/c)
KEK (MSL)	10^5	28
RIKEN/RAL	10^6	28
TRIUMF	2×10^7	28
PSI	3×10^8	28
BNL (MECO)	10^{11}	40
JHF (M-Arena)	10^7	10~100
JHF (PRISM)	$10^{11} \sim 10^{12}$	70

表からわかるように、計画されている PRISM ビームラインは従来のビームと比較して桁違いに強度が強い。また、従来の施設では μ^- の強度は μ^+ の強度よりも一桁程度弱いですが、PRISM ビームラインは正負両方についてほぼ同じ強度のミューオンビームを生成することが可能である。さらに、MECO のビームラインがこの実験専用のビームラインであるのに対して、PRISM ビームは他の実験 (例えばミューオン X 線を用いた非破壊試験) にも用いることが可能である。

4.3.2 世界のレプトンフレーバーの破れの探索実験

現在準備中のレプトンフレーバーの破れの探索実験には、PSI における $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験、BNL の MECO 実験がある。

PSI における $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験 (MEG)[7]

この実験は、エネルギーが $m_\mu/2$ の陽電子と γ 線が、静止したミューオンから正反対方向に放出される事象を探索する。主要なバックグラウンドは、通常のミューオン崩壊からの陽電子と γ 線が偶然同時に測定される場合であり、陽電子と γ 線の、エネルギーと位置を精度よく測ることが実験にとって必須である。2004 年には実験を開始する予定であり、分岐比にして 10^{-14} の感度を目標とする。

BNL における $\mu N \rightarrow eN$ 転換探索実験 (MECO)[8]

BNL の AGS 加速器を用いて行われる $\mu N \rightarrow eN$ 転換探索実験である。ビームに同期したバックグラウンドを除去するために、ミューオン捕獲の寿命が長いアルミの標的にパルスビームを当て、ビームのタイミングより遅れて出るミューオンを用いる。標的から測定器まで S 字状に配置した超伝導ソレノイドでミューオンを導き、トロイダル磁場中で螺旋状に運動する荷電粒子の鉛直方向のドリフトを用いてバックグラウンドを落とす。1 秒あたり 10^{11} 個のミューオンを用いて、 2×10^{-17} の感度まで到達する予定である。実験の建設費はまだ承認されていないので、実験開始は 2007 年以降である。

これらの実験のパラメータを PRISM における実験とともに表 3 に示す。

表 4: これからのレプトンフレーバーの破れの探索実験

サイト	PSI	BNL	JHF
探索モード	$\mu \rightarrow e\gamma$	$\mu N \rightarrow eN$	$\mu N \rightarrow eN$
到達感度	10^{-14}	2×10^{-17}	2×10^{-19}
ビーム強度 (μ/s)	3×10^8	10^{11}	$10^{11} \sim 10^{12}$
実験開始時期	2004~	2007~	JHF2 期

レプトンフレーバーの破れが光子を媒介として起こる場合には $B(\mu \rightarrow e\gamma) \sim 200\text{--}400 B(\mu N \rightarrow eN)$ の関係があるので、PSI の実験と MECO 実験はほぼ同等の感度を有するが、他の寄与もあるために、二つの制限は独立である。PRISM 実験では MECO 実験よりも 2 桁上の統計精度を目標とする。

4.4 評価、意見

PRISM 計画は JHF の特徴である大強度陽子加速器をよく生かした野心的な開発プログラムであり、完成すれば世界に類例のないミューオン科学研究施設となる。本委員会はそこで可能になる物理の重要性、幅広さを高く評価する。特に、JHF で計画されているレプトンフレーバーの破れの実験は、現在計画されている他の PSI や MECO よりも感度が約 2 桁高いため、SUSY など新しい物理に対する感度が高く、大きな物理的意義を持つ。また、PRISM で開発される技術は、ニュートリノファクトリーや、次々世代のエネルギーフロンティア加速器の基礎となる将来性を秘めており、将来日本が素粒子物理分野においてリードするための戦略的意味をも持つ。

しかし、PRISM は全く新しい技術であり、大立体角パイオン捕獲、生成標的等、R&D が必要な課題も多く、その実現性に関しては不確定な要素が多い。従って、初めからレプトンフレーバーの破れの究極的な感度を目指して長期間開発研究のみを行うよりは、まずは実現性の高い技術を用いて早期に実験を開始すべきである。具体

的には、現在から第 1 期の間に R&D を進めて PRISM の基本技術を確立し (phase A study)、それに従って第 2 期に MECO よりも数倍以上高い感度の実験を行い、その後段階的に感度を上げるべきであろう。⁷

4.5 結論

素粒子の階層性の問題を解決する上で有力な超対称理論は、レプトンフレーバーを破る $\mu N \rightarrow e N$ 転換などの、標準模型では説明できない新現象を预言している。JHF では、大強度陽子ビームを用いて質の高いミュオンを大量に生成することにより、理論的に予想される $\mu N \rightarrow e N$ 転換の分岐比を射程内に収めることができる。提案されている PRISM などの技術は、従来より 1 万倍高い強度のミュオンビームを作ろうとする野心的なものであり、 $\mu N \rightarrow e N$ 転換の発見を目指して必要な技術の開発を直ちに始めることが重要である。また、この技術は、本実験に限られるものではなく、大強度ミュオン源としての応用や、ニュートリノファクトリー、高エネルギーフロンティア実験に発展しうる将来性がある。これらの可能性を考慮すると、戦略的な重要性が高く、国際貢献度も高いと認められる。

参考文献

- [1] Y.Kuno and Y. Okada, Rev. Mod. Phys. **73** (2001) 151.
- [2] R.Barbieri and L.J.Hall,Phys.Lett. **B338** (1994) 212;
J.Hisano *et. al.*,Phys.Lett.B391(1997)341-350;Erratum *ibid*, **B397** (1997) 357.
- [3] Y.K. Semertzidis, *et. al.*,"Measurement of the Muon Anomalous Magnetic Moment to 0.7 ppm" Proceedings of my plenary talk at ICHEP02, Amsterdam, 31 July 2002 (hep-ph/0211038).
- [4] Y.K.Semertzidis, *et. al.* ,"Sensitive Search for a Permanent Muon Electric Dipole Moment", Proceedings of the International Workshop on High Intensity Muon Sources (HIMUS99), KEK, Japan, December 1-4 1999 (hep-ph/0012087).
- [5] NufactJ report, <http://www-prism.kek.jp/nufactj> .
- [6] N. Sasao, "PRISM: an intense low-energy muon source", Proceedings of the International Workshop on High Intensity Muon Sources (HIMUS99), KEK, Japan, December 1-4 1999;
Y. Mori , PRISM: A PHASE ROTATOR TO OBTAIN AN INTENSE MONOCHROMATIC MUON BEAM", *ibid.*;
Y. Kuno, "PRISM: Experimental Possibilities", *ibid.*.
- [7] MEG Collaboration:Proposal to INFN (September 2002)(<http://meg.web.psi.ch/docs/index.html>) .
- [8] MECO Collaboration: BNL proposal AGS P940 (1997) .

⁷この委員会の意見を踏まえ、実験グループからは 2 段階に分けて実験を行う案が出された。第 1 段階では、パイオン捕獲のために実績のある 6T の超伝導磁石、炭素の標的、現在の技術で可能な磁石や加速空洞などを用いて MECO の 10 倍の感度を得る。第 2 段階では、本来の仕様を満たすために装置を置き換え、MECO の 100 倍の感度を得るとともに、他の実験や将来計画の R&D を行うため、施設の拡充を行う。

5 ストレンジネス核物理の実験

5.1 物理的意義

ハイペロン (Y) や K 中間子等のストレンジネス粒子を含む原子核の研究は、陽子と中性子の多体系としての原子核の枠を越えて、より一般化された “ハドロン多体系” としての原子核の性質を理解する事が目的である。ハイペロンにより誘起される原子核の変形、 K 中間子と原子核の束縛状態における高密度状態の出現、多量にストレンジネスを含有したストレンジ物質の可能性など、原子核の新しい存在形態を探ることを通じて、これが可能になる。

また、ハイペロン-核子散乱実験やハイパー核の構造の研究を通して引き出されるハイペロン-核子 (YN)・ハイペロン-ハイペロン (YY) 相互作用の情報は、斥力芯や LS 力などの短距離のバリオン間力を QCD に基いて理解する上でとりわけ重要な役割を果たす。 YN , YY 相互作用は、中性子星の高密度中心部に出現するであろうハイペロン物質の理解にも不可欠であり、中性子星の最大質量や冷却過程に大きく影響すると考えられている。

JHF では大強度の K^- , π^\pm ビームを利用して、上に述べたストレンジ核物理の研究を高精度でかつ系統的に行う事が可能になる。 YN , YY 相互作用に関しては、これまでの加速器ではビーム強度が不足して行えなかった実験を通じて、 S (ストレンジネス) $=-2$ の ΞN , $\Lambda\Lambda$ 相互作用のデータや $S=-1$ の ΛN , ΣN 相互作用のスピン依存性のデータが得られる。また、ストレンジネスを含む原子核の特徴的な例としては、最近実験的に検証された「 Λ 粒子が入ることによる原子核収縮」[1] が名高いが、これ以外にも陽子・中性子からなる原子核とは質的に異なる多体現象が理論的に予言されている。ハイペロンの磁気モーメントの核内での変化、 K^- 中間子が原子核に深く束縛されたコンパクトで高密度の中間子原子核の出現、原子核内での大きな ΛN - ΣN 結合や $\Lambda\Lambda$ - ΞN 結合効果などの研究が JHF の大強度 2 次ビームで可能になる。

これらのデータを統一的に理解するためには実験と理論の密接な相互フィードバックが要求される。バリオン間相互作用のデータが蓄積されれば、これを理論的に基礎付けるモデル的考察（例えば構成子クォーク模型など）や格子 QCD の第 1 原理計算との比較が不可欠になり、また従来とは質的に異なる原子核が生成された場合にはクォーク自由度まであらわに考慮した原子核構造の研究が必要になると考えられる。これらの研究は原子核研究の枠組みを大きく広げるばかりでなく、高密度ハドロン物質の理解へもつながるものである。

5.2 実験の説明

SKS スペクトロメーターによって KEK で発展した (π, K) 反応による系統的なハイパー核研究に加え、大立体角 Ge 検出器によるハイパー核 γ 線分光やハイブリッド・エマルジョン法によるダブルハイパー核の検出などの革新的な実験手段の開拓によって、1990 年代以降、ストレンジネス核物理は日本のリードのもとで発展してきた。JHF で提案されている実験の多くは、これらの既に確立した実験方法によって、KEK-PS の約 100 倍の強度の π ビーム、BNL-AGS の数 10 倍の強度の K^- ビームを用いて行なわれるものである。

下表は、ストレンジネス核物理関係者が 2000 年に発表した Letter of Intent[2] に提案されている実験をまとめたものである。以下で各実験の内容について述べる。

表 5: JHF で計画されているストレンジネス核物理実験

テーマ	反応、 ビーム運動量、強度 (sec^{-1}) ビームライン、測定器、その他
Ξ 核分光	(K^-, K^+) , $1.8 \text{ GeV}/c$, 1×10^7 K1.8 + SKS (将来は専用 spectrometer を導入)
Λ 核 γ 線分光	(K^-, π^-) , $1.1\text{--}0.9 \text{ GeV}/c$, 1×10^7 K1.1 + spectrometer + Hyperball(upgraded)
$\Lambda\Lambda$ 核 (hybrid emulsion 法)	(K^-, K^+) , $1.8 \text{ GeV}/c$, 1×10^5 ($\pi/K=0.1$) K1.8 + spectrometer + emulsion + SSD/SCIFI
$\Lambda\Lambda$ 核 (π^- 崩壊法)	(K^-, K^+) , $1.8 \text{ GeV}/c$, 1×10^7 K1.8 + spectrometer + CDS
YN 散乱 (Ξp)	(K^-, K^+) , $1.7 \text{ GeV}/c$, 1×10^7 K1.8 + spectrometer(SKS) + CDS
YN 散乱 ($\Sigma p, \Lambda p$)	$(K^-, \pi^\pm)/(\pi^\pm, K^+)$, $1.0\text{--}1.6 \text{ GeV}/c$, 1×10^7 K1.8/K1.1 + spectrometer + CDS
K^- 原子核束縛状態	$(K^-, N)/(K^-, \pi)$ etc., $\sim 1 \text{ GeV}/c$, 1×10^7 K1.1 + spectrometer(SPESII 等) + n-counters
(π, K) 高分解能分光	(π^\pm, K^+) , $1.0\text{--}1.5 \text{ GeV}/c$, 1×10^9 高分解能 pion beamline + K spectrometer

5.2.1 Ξ ハイパー核分光

(π^+, K^+) 反応 $[\pi^+ n \rightarrow \Lambda K^+]$ で Λ ハイパー核分光を行ない Λ の核ポテンシャルを決定した実験 [3] と同様の手法を (K^-, K^+) 反応 $[K^- p \rightarrow \Xi^- K^+]$ に適応し、 Ξ ハイパー核を世界で初めて生成・検出する。 ^{28}Si , ^{58}Ni , ^{208}Pb 等の Ξ ハイパー核のエネルギースペクトルから Ξ の核ポテンシャルの深さを決定し、 ΞN 間の相互作用の大きさを求めることができる。また、 ΞN - $\Lambda\Lambda$ 結合の強さ、 ΞN 相互作用のアイソスピン依存性やスピン軌道力などの情報が得られる可能性も高い。K1.8 ラインを用い、当面は現有の SKS を増強した磁気スペクトロメータで実験を行なう。JHF での最初の実験とされている。将来は、分解能の高い専用の磁気スペクトロメータの建設を計画している。

5.2.2 Λ ハイパー核の γ 線分光

Ge 検出器を用いた精密 γ 線分光の手法 [4] により、様々な Λ ハイパー核の励起状態のレベル構造や遷移確率を調べる。ハイパー核の構造を精密に理解することによって ΛN 相互作用の全体像（スピンスピン力、スピン軌道力、テンソル力、 Λ - Σ 結合と 3 体力、odd-state の相互作用、荷電対称性の破れなど）を確立することが出来る。また、ある種のハイパー核を選び、その $M1$ 遷移確率の測定を行うことにより核内での Λ の磁気モーメント決定することが出来る。核内 Λ の磁気モーメントは核媒質効果によって変化している可能性があり、磁気モーメントの起源を探る研究となる。

$E2$ 遷移確率は原子核の変形度と対応した測定量である。この測定から、 Λ によって誘起される原子核の形や構造の変化を調べることが出来る [1]。中性子過剰 Λ 核やダブル Λ 核の γ 線分光を行える可能性もある。主に (K^-, π^-) 反応 $[K^- n \rightarrow \Lambda \pi^-]$ でハイパー核を作り、大型化した Hyperball を用いて γ 線を測定する。 (K^-, π^-) 反応では、断面積が大きく運動量移行の小さい 0.8-0.9 GeV/c 付近と、スピン反転を起こすことができる 1.1 GeV/c のビーム運動量を用いる必要があり、この運動量において大強度で良い π/K 比のビームが得られる独立した K1.1 ラインを用いることを想定している。

5.2.3 ダブル Λ ハイパー核

Λ 粒子を 2 つ含む原子核の研究により、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用の大きさ、 $\Lambda\Lambda$ - ΞN 結合の効果、核内での H ダイバリオン的な状態（二つの Λ が近距離相関した状態）の可能性を調べることが出来る。これらは、核力の斥力芯の起源や中性子星の内部組成に直接関わる研究である。様々な種類のダブル Λ ハイパー核のイベントを多数捕らえ、束縛エネルギーの質量数依存性を調べることになるが、実験的には以下の 2 つの手法が考えられる。

Hybrid emulsion 法は KEK-PS で開発され、すでに大きな成果を上げている実験手法である [5]。磁気スペクトロメータで (K^-, K^+) 反応からの Ξ^- 生成事象を同定し、カウンターで測定した Ξ^- の軌跡を延長して、近接して置かれたエマルジョン（原子核乾板）中の Ξ^- の軌跡を選び出し、これをたどることによってエマルジョン中の Ξ 吸収点を容易に見つけることが出来る。ダブル Λ 核は、吸収点から 2 段階の崩壊が起こった事象として確認できる。

この実験では、多様なダブル Λ 核の束縛エネルギーを精度良く決めることができる。JHF では、陽子ビーム強度が強いので、現在の K^- の強度を維持しつつ K^- の純度を上げる（ π/K 比を下げる）ビームラインを作ることができる。この高純度 K^- ビームにより emulsion の無駄な被曝が減り実験の効率を圧倒的に高めることができる。

π^- 崩壊法は、日本人研究者が中心となって BNL で行った実験で確立された手法である [6]。 (K^-, K^+) 反応

の検出と同時に、2つの Λ の崩壊による π^- 2個を、標的回りの円筒型スペクトロメータで測定し、2個の π^- の運動量からダブル Λ 核を同定する。上記のエマルジョン実験と異なり、大強度のK-ビームを使うことができるので、エマルジョンより2桁高い統計量のデータが得られる。

5.2.4 ハイペロン核子散乱

1–2 GeV/cの π^\pm や K^- を用いて Λ , Σ^+ , Σ^- , Ξ^- を生成し、これらを水素標的で p と散乱させ、数100 MeV/c領域での YN 散乱断面積の角分布とそのエネルギーの依存性を高統計で測定する。 Ξ^- の散乱実験は前例がない。 Λ , Σ については偏極観測量も測定できるようになり、例えば生成時の偏極と偏極標的に対する散乱の非対称性を測ることで、これまで測られたことのない反対称スピン軌道力(ALS)を求めることができる。また、 $\Sigma^-p \rightarrow \Lambda n$ や $\Xi^-p \rightarrow \Lambda\Lambda$ のようなハイペロン転換の断面積も初めて測定できる。これらのデータは、自由空間での YN , YY 相互作用を決めるものであり、バリオン間相互作用のモデルの良否判定や改良に決定的な役目を果たす。ハイパー核から得られるバリオン間相互作用の情報よりも直接的な情報が得られるが、反応チャンネルやスピン依存性などによっては実験の難しさもあり、両者は相補的である。ハイペロンの生成頻度が高いので、従来KEK-PSで用いられていたイメージ観測による手法ではなく円筒型スペクトロメータを用いた実験手法を採用している。

5.2.5 K^- 原子核の深い束縛状態

K^-N 間に強い引力が働くことにより、 Λ の励起状態である $\Lambda(1405)$ が K^-p の束縛状態として記述できる可能性が理論的に示唆されている[7]。この理論に基づく、原子核内では K^- が自分自身の質量と同程度の数百MeVの深いポテンシャルに束縛され、同時に K^- が原子核を強く収縮させ、通常の数倍の密度を持つ K 中間子原子核が出現することになる[7]。この現象は中性子星内部における K 中間子凝縮の可能性とも密接に関係している。このような特異な束縛状態は、 $K^-N \rightarrow \Sigma\pi$ の崩壊がエネルギー的に禁止されて状態の幅が細くなり、ピークとして観測できる。1 GeV/c近辺の (K^-, N) 反応[8]や (K^-, π^-) 、 (K_{stop}^-, n) 反応によってこれを探索することができる。

5.2.6 (π, K) 反応によるハイパー核の高分解能分光

$10^9/\text{spill}$ の大強度パイオンビームを高い運動量分解能で分析することのできる、専用の高分解能パイオンビームライン[9]を建設し、従来は1.5 MeV(FWHM)が限界であった (π, K) 反応の質量分解能を300 keVに向上させ、様々なハイパー核の分光を行なう。ビーム強度が飛躍的に上がるため、 (π^-, K^+) 反応 $[\pi^-pp \rightarrow \Lambda n K^+]$ 及び $[\pi^-p \rightarrow \Sigma^- K^+]$ による中性子過剰 Λ 核や (π^-, K^+) 反応による Σ 核の研究も進めることができる。中性子過剰 Λ 核の分光では、 Λ による中性子ハロー構造の劇的変化や $\Sigma\Lambda$ 混合が明らかになる。

最近 Σ の核ポテンシャルが斥力であることを示すデータが得られており[10]、単純に考えると Σ 核は存在しない。しかしながら重い核では、 Σ^- のクーロン力が核力を打ち消して束縛するhybrid状態があることが期待される。このような原子核が見つかり、 ΣN のスピン軌道力の情報も得られる可能性がある。

一般の Λ ハイパー核の生成頻度は画期的に増大するため、崩壊粒子の同時計測を行うことにより Λ ハイパー核のweak decay($\Lambda N \rightarrow NN$ のメカニズムと $\Delta I = 1/2$ 則の起源)の研究を行なうことも可能になる。

5.3 海外の計画との比較

これまで KEK-PS とともにストレンジネス核物理の世界の 2 大拠点の一つだった BNL-AGS では、JHF 完成後はストレンジネス核物理の研究の場を JHF に移動することが関係者間で合意されている。その際、AGS の D ライン (2 GeV の double-stage separator line) を JHF に移動することが検討されている。

ジェファークソン研究所では $(e, e'K^+)$ 反応 $[e^-p \rightarrow \Lambda e^-K^+]$ による Λ ハイパー核分光の研究が進められている。初期の実験の成功 [11] を受けて、現在、高分解能 (300 keV) を持つ専用スペクトロメータを建設中である。これを用い、 p -shell から中重核までの様々なハイパー核の高分解能スペクトルを測る実験が 2003 年より開始される予定である。この実験計画は JHF2 期の「 (π, K) 反応によるハイパー核の高分解能分光」の一部と同じテーマである。しかしながら $(e, e'K^+)$ 反応では制動輻射バックグラウンドのため実験できない重いハイパー核も、 (π^+, K^+) 反応では研究できるという利点がある。また、 (π^+, K^+) と $(e, e'K^+)$ 反応では作られるハイパー核が互いに鏡像核であり、励起されるスピン状態も異なるため、両者のデータを合わせることで YN 相互作用の荷電対称性やスピン依存性が調べられるという互いに相補的な関係にある。

GSI では、現在の陽子ビームでパイオンビームを作り、 (π^+, K^+) 反応によって Λ 核を作って γ 線の精密分光を行なう実験が認められている。新しい大型 Ge 検出器を開発し、現在 π^+ ビームとトラッキング検出器を開発中だが、本実験開始は数年後であり、当面は現在の KEK や BNL での γ 線実験と同程度かそれ以下の収量にとどまると思われる。GSI の将来計画⁸では、反陽子から $\bar{p}p \rightarrow \Xi^+\Xi^-$ によってできる Ξ^- を用いてダブル Λ 核を大量に作り、その γ 線を測定する実験が提案されている。陽子強度は JHF より低い、反陽子を用いる新しい方法が彼らの主張通りに有効であれば、JHF のハイパー核プログラムの中心課題である $S=-2$ の系の研究にとっての強力な競争相手となる。

他のハイパー核実験を行なっている施設 DAFNE, COSY, JINR は、それぞれ特徴的な方法で主に Λ ハイパー核の weak decay を研究しているが、JHF のプログラムへの影響は小さい。DAFNE での実験は、JHF2 期の「 (π, K) 反応によるハイパー核の高分解能分光」の一部である Λ ハイパー核の weak decay と中性子過剰ハイパー核の研究に関して、先に何らかのデータを出す可能性があるが、収量や質量分解能では JHF の実験が凌駕する。

5.4 評価、意見

1. 物理的意義についての意見

JHF におけるストレンジネス核物理の目標は、ストレンジネスを含むハドロン多体系の基礎となる YN, YY 相互作用を確立すると同時に、ハドロン多体系の新しい現象を見出し、ひいては高密度ハドロン物質の理解への手がかりを得る事である。JHF は、大強度 2 次ビームを用いた多様な実験が可能であることと、KEK と BNL で活動していた研究者がまとまることにより、ストレンジネス核物理の最大・最強の施設となるであろう。提案されている研究計画はその可能性を網羅したものであり、上記の目標に向け着実な歩みをもたらすものとして評価できる。

実験個々に対する優先度の設定は難しいが、実験提案が最も数多いことから、K1.8 ビームラインでの実験を早期に実現することがよいと考えられる。KEK-PS において、大立体角 Ge 検出器を使いこなして成し遂げた世界初のハイパー核 γ 線分光を発展させることは JHF の重要な使命であるが、そのためには独立した低運動量ビームライン K1.1 の建設が不可欠である。ゲルマニウム検出器群の大型化のための努力も必要で

⁸この加速器計画については「ハドロン物理」と「反陽子」に詳しい記述がある。

ある。さらに、K1.1 ラインは K 中間子束縛状態や YN 散乱の実験にも適しており、K1.8 と K1.1 の両方を同時に運転することで様々な実験プログラムを効率良く進めることができる。

また、専用のビームラインの建設を前提とした「 (π, K) 反応によるハイパー核の高分解能分光」は KEK-PS の SKS で発展した手法の強力な展開であり、第 2 期での実現が強く望まれる。

2. 実験の feasibility

LOI に書かれている実験に関しては、その殆どが現在確立している実験手法の延長であるため、実現度は高い。最もビーム強度の強くなる「 (π, K) 反応によるハイパー核の高分解能分光」実験では運動量分解能のよいビームラインを用い、大強度の π ビームのトラッキングを避けている。 K^- ビームに対するトラッキングは、現有の検出器 (1mm MWPC) で当面期待されるビーム強度 ($2.5 \times 10^7 K^-/\text{sec}$) まで対応できる。しかしながら将来 JHF の陽子強度が上がった時に備え、より高い計数率に耐えられる検出器の開発を継続的に進める必要がある。ゲルマニウム検出器の高速の読出し法は重要な開発事項である。

これまで KEK-PS や BNL-AGS でストレンジネス核物理実験に携わったグループの殆んどが参加を表明しており、マンパワーの問題はない。ビームラインの設計や検出器の開発も KEK と大学が連携して進めている。今後は外国からの正式参加ができる枠組みを作り、ビームラインの移設などを含めた努力を進めることを期待する。

3. 実験の緊急度

多くの実験は、ビームが出ればすぐに開始でき、ビーム強度が十分に上がる前から成果が出せるという特徴がある。そのため JHF 完成直後から実験が開始できるように準備しておく必要がある。弱いビームで成果の出る実験からスタートし、ビーム強度に応じた効率的な実験ができるように実験プログラムを考えておくべきである。

2009 年以降になると GSI の反陽子を使ったハイパー核実験が始まる可能性がある。JHF ではそれ以前にビーム強度を十分に上げて主要な $S = -2$ のハイパー核実験を行うべきである。

5.5 結論

この分野は、日本がリードして革新的な実験方法を開拓することによって、ストレンジネスを含む核力の理解に大きく貢献してきており、世界的な注目度も高い。JHF では、大強度の 2 次ビームを用いて、ハイパー核の構造やハイペロン・核子散乱などを、より系統的に研究することが可能になり、核力の本質的理解に大きく寄与する。このような研究は、ストレンジネスを含む核物質の性質を明らかにするばかりでなく、中性子星のような高密度核物質の理論を構築する上でも重要な役割を果たす。JHF の稼働後早期より着実な成果が期待できるので、提案されている多様な実験に優先度を設定して、初期より継続的に進めるとともに、装置や 2 次ビームラインの新設によってさらに発展を図るべきである。

参考文献

- [1] K. Tanida *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 1982;
H. Tamura, Eur. Phys. J. **A 13** (2002) 181.
- [2] K. Imai *et al.* "Letter of Intent for the Experiments on Strangeness Nuclear Physics at the 50-GeV Proton Synchrotron", http://www-jhf.kek.jp/JHF_WWW/L0I/50GeVNP-L0I-v1.0.pdf (2000). なお、1999 年以前の参考文献はこの中に取り上げられているので、以下にはそれ以降のものを中心に掲げた。
- [3] T. Hasegawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74** (1995) 224, Phys. Rev. **C 53** (1996) 1210; H. Hotchi *et al.*, Phys. Rev. **C 64** (2001) 044302.
- [4] H. Tamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **84** (2000) 5963;
H. Akikawa *et al.*, Phys. Rev. Lett. **88** (2002) 082501;
S. Ajimura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **86** (2001) 4255.
- [5] H. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 212502.
- [6] J.K. Ahn *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 132504.
- [7] Y. Akaishi and T. Yamazaki, Phys. Rev. **C65** (2002) 044005.
- [8] T. Kishimoto, Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 4701.
- [9] H. Noumi, Nucl. Phys. **A639** (1998) 117c.
- [10] H. Noumi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **89** (2002) 072301.
- [11] E.V. Hungerford, Nucl. Phys. **A691** (2001) 21c.

6 ハドロン物理の実験

6.1 物理的意義

現在のハドロン物理学は、QCD 真空の構造やハドロンの深部構造を、クォーク・グルーオン多体問題の立場から明らかにすることを目標の一つとしている。またこの研究を通して、ビッグバン直後のクォーク・グルーオン・プラズマ状態が QCD 相転移を経てハドロン物質に転化する機構や、星の進化の最終段階における高密度星中心部でのクォーク物質の発現機構など、広範囲にわたる物質形成のダイナミクスも明らかにすることができる。

JHF の 50GeV PS は大強度陽子ビームのみならず、大強度 2 次ビームの生成を可能とする。このため、QCD の多体現象を高統計で測定できる世界的にユニークな環境を提供している。実施できる研究テーマは多岐に渡るが、以下に代表的なものをあげる。

(1) 「ハドロン質量の起源とカイラル対称性」

ハドロン質量の起源は、カイラル対称性が真空中で自発的に破れていることと深く関係しているが、それを明らかにする実験的情報に乏しい。例えば原子核内では、破れていた対称性が密度の効果で部分的に回復すると予想されている。JHF で得られる 1 次ビームや大強度 2 次ビームを用い、原子核反応で生成されるレプトン対や中

間子対のスペクトル異常を観測する事で、核媒質中でのカイラル対称性を系統的に研究することができる。また、エキゾチックな粒子を探索するスペクトロスコピー実験もこのテーマと深く関連する研究である。

(2)「ハドロンと原子核のパートン構造」

核子や原子核の深部構造を調べることはハドロン物理の重要な課題であるが、高 Bjorken- x 領域でのパートン構造の研究は未だ不十分である。実際、反 u クォークと反 d クォークの分布関数の差 (Gottfried 和則の破れ) が発見されているものの、構造関数としての統一した記述をもたらすような精密データが欠如している。また、高 x 領域の分布関数は、標準模型を超えた物理を探る際の基礎として、高 Q^2 事象を解釈する上でも重要である。この他にも重中間子生成実験やハードパートンの核媒質との相互作用の測定は、重イオン衝突によるクォーク・グルーオン・プラズマ探索のデータを解釈する上での不定性を押さえる基礎データとなる。

(3)「高密度クォーク物質相の探索」

JHF のエネルギー領域での重イオン衝突では、原子核密度の 8 – 10 倍に達する高バリオン密度物質の生成が予想される。高密度クォーク物質やカラー超伝導状態の発現が理論的に予言されており、「高密度 QCD」という新分野の開拓に繋がっている。このテーマは、RHIC や LHC における「高温 QCD」の研究と相補的で、QCD の相構造についての新しい情報をもたらす。

6.2 各実験の説明・評価・意見

参考にした実験提案にかかわる資料は章末の参考文献に示す。ハドロン物理の実験計画は多岐にわたるが [1, 2]、この報告書では、Expression of Interest[3] に書かれている実験計画を取り上げた。いくつかの実験計画では大強度陽子を利用して実験を始め、最終的には重イオン加速や偏極イオン加速が実現されることを念頭においている。これらの実現は早くとも第 2 期以降であり、全体としては長期計画である。以下個々の実験について概説し、委員会としての評価と意見を併記する。

1. Study of chiral property of dense nuclear matter through measurements of the meson-spectral-change in medium

(高密度下で中間子の質量変化の測定によるカイラル対称性の研究)

核物質中で崩壊する中間子の電子対不変質量分布の測定によって有限密度下での中間子の性質 (質量や崩壊幅) の変化を捉えることにより、核物質の相転移にかかわる実験的情報を得、有限密度下でのカイラル対称性の自発的破れの様相を研究しようとするものである。

これは現在の KEK-PS で実施された実験 [4, 5] の発展であり、JHF では、多種多様な大強度 2 次ビームの利用により測定対象となる中間子の種類を増やし、且つ統計の向上により中間子の核物質中での分散関係を得ることを目指している。これまでの経験に基づいた新しいスペクトロメータの建設が提案されており、JHF の環境においても実験は可能であろう。

JHF での実験は RHIC、LHC での高温度核物質の研究とは相補的で、ハドロン物理の重要な課題をカバーしていると認められるが、GSI の現存計画、将来計画 [6] と競合する。しかし KEK の実験はすでに中間子の質量変化を示すデータを示しており、将来的にも、陽子入射、2 次ビーム入射で行う実験においては、十分に優位性が確保できると思われる。

この計画では軽い中間子の研究が論じられているが、理論的不定性の少ない K^* や D 中間子のような重い粒子まで研究を拡張することを考慮すべきである。

2. Physics of high-mass dimuon production at the 50-GeV Proton Synchrotron

(50GeV PS を用いた高質量ミューオン対生成の物理)

FNAL で確立された大強度ビームを利用したミューオンペアの測定技術 [7, 8] に立脚し、高 x 領域での構造関数の測定から、高密度核物質の物理に関連したテーマも視野に入れた幅広い実験計画である。具体的テーマとして、A) 核子核子散乱におけるドレル・ヤン過程の基礎的理解、B) 核子中での \bar{u} 、 \bar{d} クォークの存在確率 (構造関数) の違い、C) 偏極構造関数の測定、D) ドレル・ヤン過程での EMC 効果の研究、E) 核物質中のパートンのエネルギー損失の研究、F) チャーム生成機構の研究があげられている。ドレル・ヤン過程に的を絞り、大強度ビームの利点を生かすことにより、世界の他の加速器では到達できない高い x 領域での物理を開拓しようとしている。

JHF では、FNAL で見出された核子中での \bar{u} 、 \bar{d} クォークの存在確率の違い [7] をはるかに高精度でかつ高 x 領域で確認できる。偏極陽子が加速されれば、同様の測定を偏極構造関数の違いとして測定できる。現在高い x 領域での構造関数のデータははなはだ不十分であり、JHF の特長を生かし、他に追従を許さないデータを得られる実験として評価できる。

並列して提案されているパートンの核物質中でのエネルギー損失の測定は、現在 RHIC のデータとしてクォーク・グルーオン・プラズマ生成の可能性を示唆して話題になっているジェット・クエンチング現象を解釈する上で重要な基礎データとなる。また EOI には記載されていないものの、提案されているスペクトロメーターの導入によって、重イオン反応におけるドレル・ヤン過程の研究や、高密度状態での相転移がおこった際に特徴的な現象がおこると考えられているチャーム粒子 ($D, \bar{D}, \chi_c, J/\psi$) 生成過程の研究も視野に入れることができる。

大強度ビーム利用の実験技術を確立している FNAL の実験チームが参加表明をしていることは評価できる。ただし、50GeV PS ではより大きなアクセプタンスを必要とすることになり、実際のフィージビリティについてはより詳しい実験計画書を待って判定すべきである。実験は高 x 領域、高質量粒子対測定に重点があり、他に追従できる実験はない。ただし、Main Injector でも同様の実験が行われるように FNAL の方針が変わると、競合が発生する。

3. Multifragmentation (核多重破碎反応)

JHF によって得られる多様な大強度 2 次ビームを利用し、核子多体系としての原子核の気相・液相相転移を相図上の広い範囲で研究することが目的である。

このような研究は GSI と KEK で相補的に進展してきており、GSI との競合は今後も問題になる可能性がある。しかし、実験が比較的小型でもあり、KEK-PS などで行った系統的な測定実績 [9, 10] があるため有利に実験が進められると期待される。

4. Strangeness nuclear physics with high energy heavy ion beams

(高エネルギー重イオンを用いたストレンジネス原子核物理)

これは、狙いがハイパー核の物理であり、ここでは論じない。重イオンの加速を前提としている。

5. Systematic Study of collective behavior in hadron production

(ハドロン生成における原子核の流体的ふるまいの系統的研究)

重イオンビームを用い高密度核物質の生成とそこから生まれる流体的なふるまいを測定し、高密度核物質における相転移の情報に迫ろうという実験である。

重イオン反応で見られる流体的ふるまいの研究は、核物質の状態方程式を得るための手段として注目を浴びている。この研究は中性子星の内部を理解するために重要であり、高密度核物質のカイラル相転移を見出す可能性

もある。GSI の将来計画と大きく競合するものの、JHF でカバーできるエネルギー領域は高密度核物質を生成するのに適していると考えられており、RHIC、LHC などの高温核物質の研究と相補的な研究環境を与える。

EOI の段階では、実験自体に関する記述が少なく、判断材料に乏しい。しかしながら類似した実験が BNL-AGS[11]、CERN-SPS[12]、BNL- RHIC[13] ですで行われており、実験に大きな問題はないと思われる。

6. Polarized beam/target experiments

(偏極ビームとターゲットを用いた実験)

偏極ビームを用い、生成されるハドロンの測定を通して、フラグメンテーション過程におけるスピンの役割を調べる事を目的とする。

DESY の HERMES 実験 [14] は、フラグメンテーションで発生するハドロンの終状態が反応前のスピン方向との相関を保持していることを示す実験結果 [15] を得ており、このような QCD 非摂動過程におけるスピンの役割が注目されている。しかしながら今後 5 年間で、HERMES 実験、RHIC スピン実験の進展を考慮すると、むしろ実験 2. と組み合わせ、高 x 領域での研究に発展させるか、あるいは、別途提案されている偏極反陽子ビーム (偏極陽子も可能) の実験と組み合わせ、偏極を利用した総合的な実験プログラムに展開させる可能性を追求することが推奨される。

以上の計画をあわせ、EOI では多目的ビームラインの建設がうたわれている。その建設計画を中心にユーザーによって、実験プログラム間の調整が進められていることは評価できる。物理の大枠とそのビームの希望を表 6 にまとめる。

また EOI に書かれてはいないが、ワークショップなどで講演があったものに、ハドロンのスペクトロスコピー (メソン・バリオン・エキゾチック探索) の物理がある。特にラムダの崩壊を用い偏極反陽子ビームラインを作り、偏極反陽子を利用したスペクトロスコピーを行う提案や、10GeV 程度の大強度 K ビームを RF セパレーターを用いて作り出し、エキゾチック粒子探索を行うという提案があるが、現時点での資料不足からこの報告では触れない。

表 6: JHF におけるハドロンの物理実験の物理とビーム

	physics	beam
1	核物質とカイラル対称性	50GeV-陽子ビーム 10^9 pps, 2 次ビーム 10^9 pps
2	構造関数・核物質・基礎過程	50GeV-陽子ビーム 10^{12} pps, 偏極陽子ビーム
3	原子核の液相・気相相転移	5-50GeV 陽子ビーム、2 次ビーム 10^9 pps
4	高エネルギーハイパー核	重イオンビーム 10^{10} pps
5	高エネルギー原子核反応の流体的性質	重イオンビーム 10^{10} pps
6	偏極構造関数	偏極陽子ビーム

6.3 海外の計画との比較

ここでは構造関数の研究と、高密度核物質の研究の世界的な情勢に言及する。

構造関数の測定では DESY-HERA における電子陽子深部非弾性散乱実験が高 Q^2 領域の測定を進めている。そ

れ以外の実験はむしろ偏極構造関数の測定に移っており、CERN-SPSにおけるCOMPASS実験[16]（偏極ミューオン深部非弾性散乱）、HERAにおけるHERMES実験（偏極電子深部非弾性散乱）、RHICでの偏極陽子衝突実験などが進んでいる。今後5年程度でデータは充実し、スピנקライシス（陽子のスピンのクォークで記述できない問題）は解決をみるであろう。JHFの実験としては、高 x 領域での構造関数の研究を行うことが重要であり、大強度ビームの特徴を生かした方向である。

高密度核物質の研究においては重イオン加速を行う必要がある。JHFはCERN-SPSと同じエネルギー領域にあるがあるが、CERNは2003年でSPSにおける重イオン研究を終え、LHCにおける超高エネルギー重イオン反応の研究に集中することが決まっている。BNLのAGS加速器もJHFとエネルギー領域が重なるがBNLを利用する研究者全体がRHICにおける超高エネルギー重イオン反応の研究にシフトしており、実質上の競争関係は生じないと思われる。

ドイツGSIの将来計画は2009年に実験開始が予定されている。現時点では予算化されていないが、これが実現すると、重イオンを利用する研究ではJHFと競合する。GSIは2重リングを用い、遅い取り出しの低輝度一次ビーム（ $10^9/\text{sec}$ 程度）を生成し U^{+92} （92価）を22.3GeV/Aまで加速することができる。この実験はカウンター実験が実験が通常受け入れられるビーム強度を常時確保し、かつ、多数の実験が同時におこなえる魅力的な施設であり、低強度1次ビームの利用に関してはJHF50GeV PSを、加速粒子の種類、利用可能なエネルギー範囲とも凌駕することになる。

6.4 全体を通しての評価、意見

物理的意義で述べた3つのテーマのうち「ハドロンと原子核のパートン構造」の研究は、大強度1次ビームの利点を生かした高い x 領域での核子構造関数の研究に重点を置き、実験2で提案された実験計画を中心に進めるのがよいと考えられる。大強度のビームを扱える実験技術確立することが、将来にわたってJHFでの研究の優位性を保つために必須であろう。偏極陽子加速を行えば、より重要性の高いデータとなる。

「ハドロン質量の起源とカイラル対称性」の研究には多角的に取り組む必要がある。実験1に提案された電子対測定実験のみならず、JHFのもうひとつの特徴である大強度2次ビームを利用する多様な実験を展開すべきである。JHFの大強度を生かした特殊条件（偏極反陽子生成など）でのハドロン・スペクトロスコピーなどが考えられよう。

「高密度クォーク物質相の探索」の研究においては、重イオン加速が必要とされる。JHFにおいてこれを行い、高密度核物質を生成することの魅力は大きい。RHICで行われている高温核物質の研究とは異なり、高密度状況での核物質の相転移を調べることが可能になる。この領域では、カラー超伝導状態や非閉じ込め相転移等の興味深い現象が理論的に示唆されている。しかし、現在提案されている実験一件のみでは、重イオン加速を正当化するには不十分である。従って、例えば、ミューオン対測定のために提案されているスペクトロメーターを用いて、重イオン反応での高密度核物質の物理にも取り組むなどの展開を考慮し、高密度核物質の研究の厚みを増すことを検討すべきである。

現在、この分野の研究活動は日本人を含め、RHIC、HERMES、COMPASS、GSI、LHC(重イオン)などに分散されており、これらの実験からJHFに人材を引き寄せることが重要である。現在の世界の実験の情勢とJHF自体の進展から見て、第1期の後半には実験を開始するのが望ましい。

6.5 結論

ハドロン核物理分野で提案されている実験では、JHF の大強度を生かした固有の物理が展開できる。特に、大強度 1 次、2 次ビームを用いたレプトン対の観測によって、核子・原子核の構造関数や、原子核におけるカイラル対称性の部分的回復などの、非摂動的 QCD 現象を引き出すことが、主要な研究目標となる。従って、それらを可能にする多目的ビームライン・測定器の建設を推進すべきである。この分野は多彩な内容を含み、外国からの実験提案もなされているので、将来に渡って息長く継続していくことが望まれる。高密度核物質の生成に向けた重イオン加速は、新しいフロンティアの開拓につながるものであるが、GSI との競合を十分考慮して進める必要がある。

参考文献

- [1] 澤田真也。研究計画委員会（第二回）における報告
http://www-conf.kek.jp/ipns-rpc/slides/20020222/sawada_hadron.pdf
- [2] S.Kumano, talk at Workshop on Nuclear Physics at JHF, KEK Tsukuba, Japan, May 13-14,2002
<http://www-hs.phys.saga-u.ac.jp/talk02.html>
- [3] Expression of Interest for Nuclear/Hadron Physics Experiment at the 50-GeV Proton Synchrotron, KEK Report 2000-11, October 2000, H
http://ccdb3fs.kek.jp/cgi-bin/img_index?200024011
- [4] K. Ozawa *et al.* (E325 Collaboration), Phys. Rev. Lett. **86**, 5019 (2001).
- [5] <http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/phi/>
- [6] <http://www-aix.gsi.de/GSI-Future/project/eng/index.php>
- [7] J.C. Peng *et al.*, Phys. Rev. **D58**, 092004 (1998).
- [8] <http://p25ext.lanl.gov/e789/e789.html>
- [9] K.H. Tanaka *et al.*, Nucl. Phys. **A583**, 581 (1995).
- [10] <http://www-nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/activity/multi/index.html>
- [11] <http://www.bnl.gov/bnlweb/facilities/AGS.html>
- [12] <http://info.web.cern.ch/info/Press/PressReleasesReleases2000/ PR01.00EquarkGluonMatter.html>
- [13] <http://www.bnl.gov/RHIC/>
- [14] <http://www-hermes.desy.de/>
- [15] A. Airapetian *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87**, 182001 (2001).
- [16] <http://wwwcompass.cern.ch/>

7 反陽子科学実験

7.1 物理的意義

強い相互作用する反物質の一つ、反陽子はユニークなツールとして素粒子・原子核物理の発展に寄与してきた。昨今のビーム冷却、レーザー分光、荷電粒子トラップの技術革新は目覚ましく、反陽子ビームによる新たな反陽子科学が拓かれつつある。

超低速に減速された反陽子ビームを用いて以下の基礎・応用研究が可能となる。

1. 反陽子原子（特に反水素）の超精密分光による CPT の精密検証

水素原子 (H) の 1S-2S 準位差は、現在 14 桁の絶対精度でレーザー分光が可能になっている [1]。反水素原子 ($\bar{\text{H}}$) を大量に生成して冷却し、水素原子と比較分光を行うことにより、将来は $(m(\text{H}) - m(\bar{\text{H}}))/m(\text{H}) \sim 10^{-18}$ の精度で CPT の検証を行うことが考えられる。水素原子と反水素原子の基底状態の超微細構造分裂（水素メーザー遷移）の超精密比較も将来の課題である。これらは、現在考え得る限り最も高精度の CPT 直接検証実験である [2]。現在 CERN の Antiproton Decelerator (AD) で取り組みが始まっている反水素分光実験は、長期間にわたる研究開発が必要であり、10 年後にも反陽子物理の重要テーマであると思われる。

2. 反陽子による原子核研究（特に不安定核の中性子分布測定）

1996 年に閉鎖された CERN の低エネルギー反陽子リング LEAR では、原子核に吸収された反陽子が、中性子と消滅したか、陽子と消滅したかを核化学的手法により測定する実験が行われた。その結果、安定核においても $\delta = (N - Z)/A$ の増加とともに原子核の中性子半径が大きくなることが示唆された [3]。しかし、LEAR 閉鎖後に建設された AD で遅い取り出しが出来ないために、現在実験は中断している。JHF ではこの測定を更に系統的に行うとともに、不安定核にも測定を広げることが可能であり、実現すれば原子核物理へのインパクトは大きい。

さらに ~ 10 GeV に加速された反陽子ビームを用いてハドロン分光の新しい展開も期待できる。

3. 陽子・反陽子消滅反応によるメソン分光

LEAR においては、質量 $\sim 2\text{GeV}/c^2$ 以下の領域でエキゾチックメソン（特にスカラーグロースボール）の探索が精力的に行われ、メソン分光研究が進んだ。JHF において、charmed exotics を含む更に高い質量領域でエキゾチックメソン分光を行い、中間子のグルーオン励起状態などを探索することが可能となる。これは QCD 物理の重要テーマであり、世界から多くのユーザーが集まるであろう。

また以上の実験を支える技術開発および応用研究も重要である。

4. 反陽子トラップ技術の応用研究（医学、工学）と原子衝突などの原子物理研究

反陽子をペニングトラップに閉じこめて「冷却」する技術は、反水素生成に必須であるばかりでなく、超低エネルギー反陽子ビームの生成、大強度反陽子の再加速、反陽子の「運搬」に用いることができ、PET 用のアイソトープを病院で生成する等、医学応用への期待も大きい。

また、反陽子ビーム照射によるガン治療の可能性もある。反陽子が静止して原子核消滅を起こすと、約 2 GeV のエネルギーが解放されるとともに、残留核は数 MeV の反跳を受ける。この核反跳はガン治療に有効と期待されるとともに、大半のエネルギーが高速の π 中間子によって持ち去られるため、反陽子は入射点（体表

面)での被爆が陽子並みに少ないと期待される。またこの π 中間子を体外で検出し、反応点を求めることで、治療を行いながらビームの到達場所をモニターできるという利点もある。

反陽子科学実験施設ではこのような開発・応用研究も推進することができる[4]。基礎研究の結果これが実現できれば、その社会的波及効果は大きいものとなる。

以上の様に低速から 10 GeV までの反陽子ビームが得られると、素粒子・原子核物理の研究ばかりでなく、原子物理、医学応用など多分野でユニークな研究が展開できることから、反陽子科学実験施設の科学的・社会的なポテンシャルは極めて高い。

7.2 施設・実験の説明

JHF の主リングから取り出した 30-50 GeV のビームによって ~ 3 GeV の反陽子を生成し、これを反陽子蓄積リング (Antiproton Accumulator: AA – CERN から移管済み) によって捕獲・冷却する[5]。冷却された反陽子を取り出し、更に別のリング (たとえば現 AD を CERN から移管) と線形減速器 (RFQD: 東大グループが CERN において建設したものを移管) で減速し、これまで示した実験を行う。JHF において、現 CERN AD に優る低速反陽子源をつくるためには、この AA+AD の 2 リング構成にして、蓄積、冷却機能と、減速機構とを分離することが必須である。また、AD に遅い取り出しを加えると研究プログラムの幅を広げることが出来る。

PRISM と取り出しビームラインを共用すれば、反陽子生成標的の設置は可能である。但し、リング群は、道路を越えた北側に展開する必要がある (レポート末尾の施設の概要参照)。

オプションとして、反陽子を (たとえば現 KEK PS のようなリングで) ~ 10 GeV に加速し、取り出しビームないしは内部標的を用いて実験することも考える。このオプションは、前出の「陽子・反陽子消滅反応によるメソン分光」を行う場合に必要であるが、加速リングに高エネルギー電子冷却の機能を持たせる必要がある。

また、「不安定核の中性子分布測定」を推進する場合、超低速の不安定核ビームが必要となる。超低速不安定核ビームを生成する際には、標的に陽子ビームなどを照射して超低速の不安定核を生成する方式 (ISOL 方式) を採用することが望ましい。

低速ビームを使ったトラップ実験については AD で開発研究がすでに始まっている。基本的なトラップ技術も CERN - ISOLDE 等で蓄積がある。また、内部標的を用いた実験も欧州にある複数の陽子・重イオン蓄積リングで高い実績があり、技術的な飛躍を必要としない。

7.3 海外の計画、実験との対比

JHF における反陽子プログラムを考える場合、CERN と GSI の二つの計画との関係を熟慮する必要がある。

1. CERN の反陽子減速器 (AD)

14 年間運転された後 1996 年に閉鎖された LEAR の後継として、2000 年より稼働した。LEAR と異なり、反陽子の蓄積、冷却、減速を一つのリングで行っているため、蓄積リングを別途持っていた LEAR に比して単位時間あたりに使える反陽子数が 1.5 桁程度少ない。またパルス取り出ししか出来ないため、同時計測を必要とする実験、すなわちメソン分光、X 線分光などは行われていない。

当初、AD の運転期間は LHC 完成までとされていたが、ユーザーが望めば LHC 完成後も AD は ISOLDE と類似の位置づけで長期間運転される公算が高まり、2010 年までの長期計画書 (CERN Long Range Plan)

にはその旨が記載された。一方、CERN が AD の閉鎖を決めた場合にはこれを JHF に移管して早期に立ち上げることが必須である。

2. GSI の将来計画 (HESR)

GSI[6] は、30 GeV と 60 GeV の二重シンクロトロン + 高エネルギー蓄積リング (HESR) などからなる将来計画を現在提案中である。この計画の一つの目玉は 0.8 - 14 GeV の高エネルギー蓄積リング (電子冷却付き) であり、反陽子・陽子消滅反応によるメソン分光が中心テーマである。HESR は 2010 年完成を予定している。この計画が予算化されるか否かは 2003 年春に明らかになるとされている。従って JHF の反陽子科学実験施設に加速リングを加える必要があるかどうかは、GSI の決定に大きく依存する。

以下に、JHF、AD、GSI(HESR) での反陽子施設の比較を示す。但し、JHF は既存の AA に減速リングと加速リングの両方を付け加えたデザインを示す。

時期	pbar@JHF > 2010?	AD 2010 までは確実か? その後も延長可	GSI(HESR) 2010?
構成	50 GeV PS + AA (既存) + AD(CERN より?) + RFQD(CERN より) + 加速リング	26 GeV PS + AD + RFQD	30 GeV PS + 蓄積リング + 冷却リング + HESR
反陽子生成数/hour	$> 1 \times 10^{10}$	1×10^9	1×10^{10}
反陽子エネルギー	60±60 keV (RFQD) 5 MeV (AD) 3 GeV (AA) 3-12 GeV? (加速リング)	60 ± 60keV (RFQD) 5 MeV (AD) 3 GeV (AD)	0.8 - 14 GeV (HESR)
取り出しモード	Pulse (AA) Pulse+Slow (AD 改造) slow + internal (加速リング)	Pulse only (AD)	internal target (HESR)
運転モード	常時	常時	不安定核と切り替え
物理	反水素 原子核 Exotic Meson 医学応用等の開発研究	反水素 医学応用等の開発研究	Exotic Meson 医学応用等の開発研究

7.4 評価、意見

低速から 10 GeV までの反陽子ビームが得られると、素粒子・原子核物理・原子物理の研究や反物質の重力測定など物理学の基礎研究が可能であり、また医学応用など社会的波及効果も期待できる。このように反陽子科学施設では、多分野でユニークな最先端研究・技術開発が展開できることから、科学的・社会的なポテンシャルは極めて高いと言える。また CERN-AD での超低速反陽子ビームを用いた実験は、日本人研究グループが先導的役割を担っていることは特筆すべきである。

JHF における反陽子プログラムの内容及び実施時期、緊急度は、CERN における AD の処遇・プログラム内容および GSI 将来計画の進展状況に大きく依存する。一方、JHF で蓄積リング AA と減速リング AD をともに建設した場合、大強度の低エネルギービームが直流で得られ、世界的にユニークな特徴を持つ。このビームの特徴を生かした素粒子・原子核・原子物理に関する実験プログラムの検討が望まれる。

JHF での AA と AD 建設については、CERN からの技術移転が行われれば開発要素は少ない。加速リングが必要で特に高エネルギー電子冷却を行う場合は、新たな設計と開発が必要となり、GSI との協力は必須である。建設に際しては振動や歪みからリングを守るため、深くパイルを打つことが必須となり、その建設費用は安価ではない。

現時点における反陽子実験に関係する研究者は全世界で 300 人程度（反水素など AD の関係で 100 人弱、メソン分光で 200 人強）である。研究者の数は世界に類似の施設が複数必要とされるほどには大きくないが、この分野の今後の発展の重要性を考慮すると、世界の研究機関の間での調整を行って、確実に研究が継続できる場所を保証していくことが極めて重要である。

今後の CERN 長期プランの変更、GSI 将来計画の予算化（2003 年）の成否によっては、CERN、GSI と協議の上、緊急に JHF に高エネルギー反陽子リング群を作るための作業を立ち上げる必要がある。この際、日本グループの持つ実験技術を AD でさらに継続的に発展させるとともに、施設完成後の円滑かつ効率的な実験拠点の移設が望まれる。

7.5 結論

反陽子を用いた物理は、CERN を拠点に日本人研究者が先導的に推進しており、最近、反水素の大量生成に成功した。この成果により反陽子研究は新たな段階に入ったと言える。JHF では、反陽子ビームの大強度化により、CPT の精密検証や不安定核の中性子分布の測定、また、反陽子の医学応用など、基礎から応用に至る幅広い研究をさらに発展させることが可能となる。反陽子施設での実験プロジェクトは海外研究施設の動向によるところが大きい。一方で JHF の特徴は低エネルギー大強度ビームが直流で得られることと判断され、これを生かした戦略を練り上げることが望まれる。

参考文献

- [1] Udem et al., Phys. Rev. Lett. **79** (1997) 2646.
- [2] M. Charlton et al., 1994, Phys. Rep. **241**, 65; J. Eades and J. Hartmann, Rev. Mod. Phys. **71** (1999) 373.
- [3] A. Trzcińska *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 082501.
- [4] G. Jackson, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France.
- [5] E. Widemann, at the 5th PRISM Workshop, Kyoto University, March 22-23, 2002.
- [6] “An International Accelerator Facility for Beams of Ions and Antiprotons – Conceptual Design Report”, GSI, December 2001 (CD-ROM available).

Appendix A. JHF50GeV の実験施設

図 2 に JHF50 GeV PS および実験施設のレイアウトを示す。50 GeV PS には直線部が三つあり、一つを 3GeV PS からの入射、残りの二つをビームの取りだしに用いる。取り出しラインの一つは遅い取り出しビームラインで、約 0.7 秒間にわたってビームが取り出され、原子核素粒子実験ホールへと導かれる。もう一つは速い取り出しビームライン（ニュートリノライン）で、ビームを一周回約 5μ 秒の間に取り出して、ニュートリノ施設に導く。また、将来の拡張として、速い取り出し部を用いて、ニュートリノラインの外側へバンチごとに数ナノ秒の極短パルスのビームとして取り出す、第 2 の速い取り出しビームラインが提案されている。以下にそれぞれ現時点での予備的なレイアウトとともにその詳細を説明する。

遅い取り出しビームライン

図 3 に示すように、取り出されたビームは上流で 2 本の一次ビームライン A-line と B-line に分岐し、B-line からはさらに下流で C-line が分岐する。A-line 上には上流から T0, T1, T2 の三つの生成標的がおかれ、それぞれで生成する大強度の二次粒子ビームが実験に利用される。T0 からはテスト実験用ビームラインが引き出されテスト実験エリアで利用される。T1 からは、様々な二次ビームライン（K1.8 ライン、 μ ライン、中性 K 中間子ビームライン、荷電 K 中間子ライン、汎用二次ビームライン等）の引き出しが検討されている。一方、B-line からは大強度中性 K 中間子ビームラインが引き出される。C-line は一次ビームあるいは二次ビームを用いる多目的ハドロンビームラインとして利用される。T0 標的から B-line, C-line へ二次粒子を取り出す案（BR-line）も検討されている。なお、現時点で 1 期計画で建設することが決定しているのは A-line および T1 標的である。

速い取り出しビームライン（ニュートリノライン）

図 2 にニュートリノラインと関連する施設を示す。50 GeVPS リングから速い取り出しにより取り出された一次陽子ビームは常伝導磁石および超伝導磁石で構成されたビームラインによりスーパーカミオカンデ検出器の方向に偏向され、ターゲットステーションにおいて標的にあてられる。標的に生成したパイオンをホーン電磁石により前方に収束し、崩壊領域で崩壊させて大強度のニュートリノビームを発生する。そのさらに前方にはビームモニタ用のミュオン測定器、ニュートリノ前置検出器が配置される。

第 2 の速い取り出しビームライン

図 2 に示すように、50 GeVPS の外側に短パルスビームを利用する施設群を建設するという案が提案されている。陽子ビームはミュオン実験施設内の標的に導かれ、そこで生成するミュオンは PRISM、EDM 実験で利用される。また、ミュオン、反陽子はトランスポートラインを介して反陽子実験施設、およびミュオン g-2 実験施設にも輸送され、実験に用いられる。

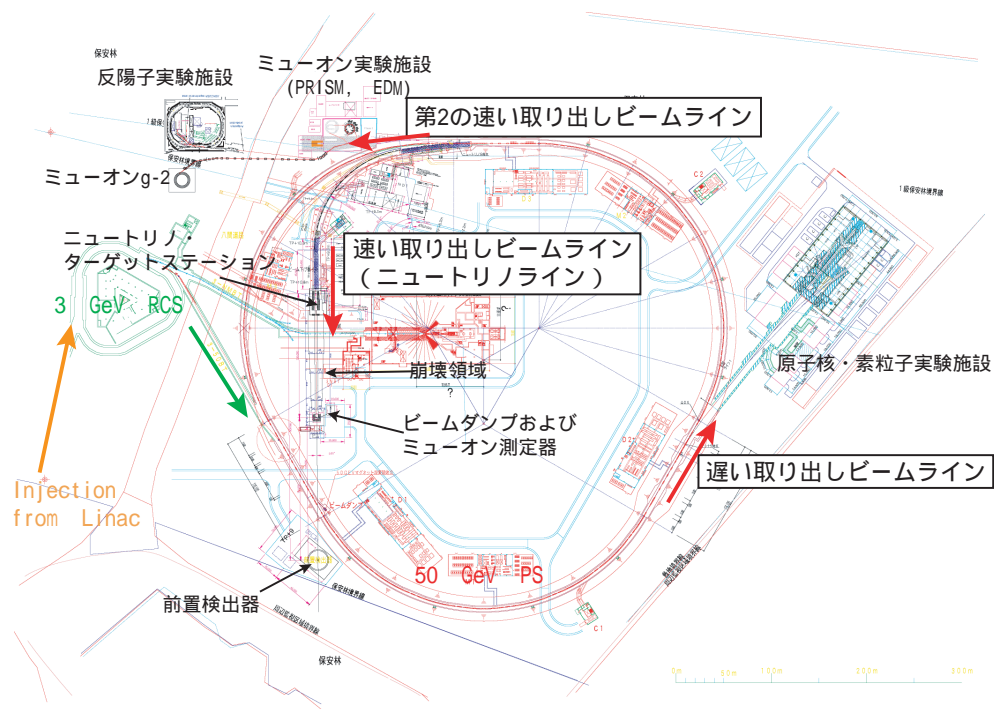


図 2: JHF 50 GeVPS の実験施設の概要

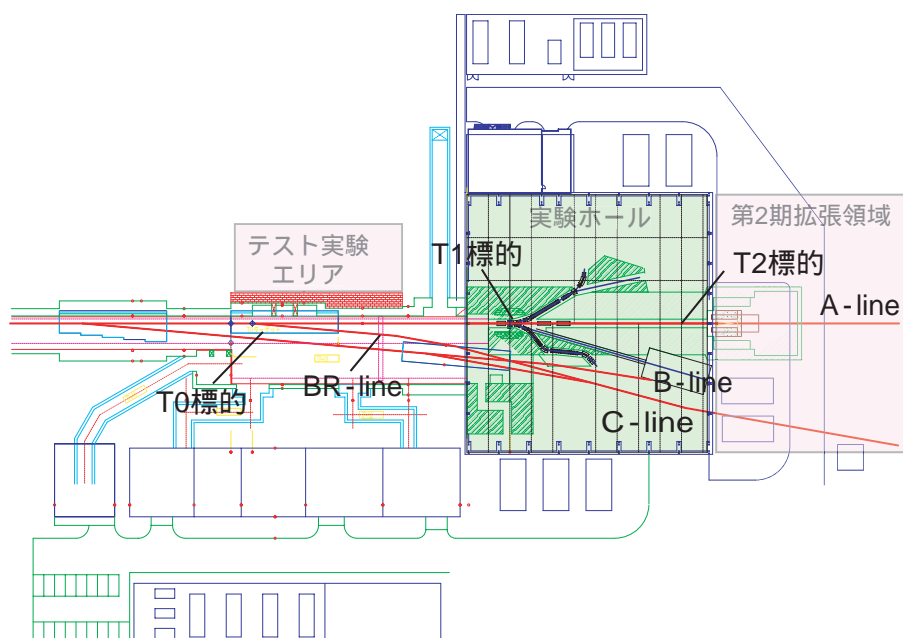


図 3: 遅い取り出しビームライン

Appendix B. 素粒子原子核研究計画委員会委員

任期 2001 年 6 月 1 日－2003 年 3 月 31 日

氏名	現職	備考
延與秀人	理化学研究所主任研究員	原子核物理
岡田安弘	物理第 2 研究系教授 *	理論物理
神谷幸秀	加速器研究施設長 *	官職指定
金 信弘	筑波大学物理学系教授	高エネルギー物理
黒川真一	加速器研究施設研究総主幹 *	官職指定
近藤健次郎	共通研究施設長 *	官職指定
櫻井博儀	東京大学大学院理学系研究科助教授	原子核物理
高橋忠幸	宇宙科学研究所次世代探査機研究センター教授	宇宙線・宇宙物理
田村裕和	東北大学大学院理学研究科助教授	原子核物理
中畑雅行	東京大学宇宙線研究所 附属神岡宇宙素粒子研究施設 助教授	宇宙線・宇宙物理
中家 剛	京都大学大学院理学研究科助教授	高エネルギー物理
野尻美保子	京都大学大学院理学研究科助教授	理論物理
羽澄昌史	物理第 1 研究系助教授 *	高エネルギー物理
初田哲男	東京大学大学院理学系研究科教授	理論物理
日笠健一	東北大学大学院理学研究科教授	理論物理
藤井恵介	物理第 2 研究系助教授 *	高エネルギー物理/幹事
宮武宇也	物理第 4 研究系助教授 *	原子核物理
山中 卓	大阪大学大学院理学研究科教授	高エネルギー物理/委員長
吉村浩司	物理第 3 研究系助教授 *	高エネルギー物理

* : 機構内委員

Appendix C. 委員会開催記録

- 第 1 回
日時：2001 年 10 月 12 日（金）
場所：KEK 4 号館セミナーホール
主な議題：委員長指名、幹事選出を行い、所長による委員会の趣旨説明を受けた。中尾、応田、Lim、小林、澤田、石山各氏よりそれぞれ Belle、ハイパー核、K、K2K、統合計画、不安定核について、素・核研の現状報告を聞いた。JHF での実験の進め方についての検討を当面の課題とする事に決定した。
- 第 2 回
日時：2002 年 2 月 22 日（金）
場所：KEK 4 号館セミナーホール
主な議題：NP01 ワークショップのワーキンググループ代表者：家入、澤田、小松原、久野、西川各氏から、ストレンジネス、ハドロン、K、 μ 、 $\bar{\nu}$ の報告を聞いた。答申内容に対する議論、今後の進め方、まとめ方に関する議論を行った。
- 第 3 回
日時：2002 年 4 月 12 日（金）
場所：KEK 3 号館 1 階会議室
主な議題：山内、田中 (礼)、松井、今井、谷畑各氏より、B、ハドロンコライダー、リニアコライダー計画、国内外での JHF 以外での原子核物理学の現状と将来について、計画推進者の立場からの報告を聞いた。それを受け、答申の内容に関する議論や今後の進め方の検討を行った。
- 第 4 回
日時：2002 年 5 月 17 日（金）
場所：KEK 3 号館 1 階会議室
主な議題：肥山、山口各氏より、原子核、素粒子理論の現状と将来についてのレビューを聞いた。また、永宮氏より、JHF 計画の進捗状況に関する現場からの報告を受けた。今後のまとめ方に関して、作業内容、作業方法、作業分担、作業日程の検討を行った。研究プログラムごとの作業班を設置し、各作業班のまとめ役を選出した。次回までにまとめ役は、議論の叩き台を作ってくる事に決めた。
作業班は、できるだけ幅広い分野の委員が入るように考慮し、以下のように決めた。
 ν : 中家、黒川、櫻井、田村、中畑、野尻、藤井
K: 山中、岡田、神谷、高橋、羽澄、宮武
 μ : 吉村、黒川、中畑、日笠、山中
Y: 田村、高橋、野尻、藤井、宮武
Hadron: 延與、近藤、金、羽澄、初田、日笠、吉村
 $\bar{\nu}$: 櫻井、岡田、神谷、金、中家
- 第 5 回
日時：2002 年 6 月 19 日（水）
場所：KEK 4 号館セミナーホール

主な議題：作業班ごとに分かれての議論を行った。続いて、まとめ役が各作業班での議論の内容の報告を行い、作業方法などについての意見交換を行った。まとめ役が、議論の結果をもとに答申のドラフトを用意し、メーリングリストを活用して検討する事に決定した。

- 第 6 回

日時：2002 年 7 月 23 日（火）

場所：KEK 4 号館セミナーホール

主な議題：前回同様、作業班ごとに分かれての議論と、それに続いて各作業班からの報告およびその内容に関して全体での議論を行った。議論を受けて各班で改訂を行い最終版に近いものにすることにした。

- 第 7 回

日時：2002 年 8 月 17 - 18 日（土、日）

場所：KEK 4 号館セミナーホール

主な議題：2 日間にわたり、 π 、 K 、 μ 、ハイパー核、ハドロンについて各班から報告と議論を行った。また、研究プログラムの進め方（図 1）、星付け（表 1）など、全体に関する議論を集中的に行い、方針を打ち出した。

- 第 8 回

日時：2002 年 9 月 7 日（土）

場所：東京大学、理学部

主な議題：反陽子とハドロン班からの報告と議論を行った。また、星付け、研究プログラムの進め方など、答申の中身についての集中的な審議を行った。議論の内容をドラフトに反映させ、次回には 答申のまとめ部分の完成を目指すことになった。

- 第 9 回

日時：2002 年 9 月 17 日（火）

場所：学士会館分館（本郷）

主な議題：答申のまとめ部分について集中審議を行った。まとめの内容について、メーリングリストを通じ木曜までに全てのフィードバックを行い、再度調整の後、9 月 24 日に答申の要旨を所長に提出する事に決定した。

- 2002 年 9 月 24 日（火）

山田所長に、答申の要旨（第 I 部）を提出した（山中、藤井）。

- 第 10 回

日時：平成 2002 年 10 月 25 日（金）

場所：KEK、4 号館 4 階会議室

主な議題：答申のまとめ部分に続く、第 2 部について、Grand View、各実験プログラムに関する議論を行った。また、最終版を作るためのスケジュールを決める。本答申に関する全体会合はこれを最後とする。

- 2002 年 11 月 22 日（金）

山田所長に最終報告書を提出。