

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

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 答申

1.1 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

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

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的描像が構築された。

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を変化させることによる系統的な研究が不可欠である。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。

1.2 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。

1.3 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)
- 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。

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。

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。

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。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				¥¥	¥	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。

1.4 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、以下に述べる方針を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。

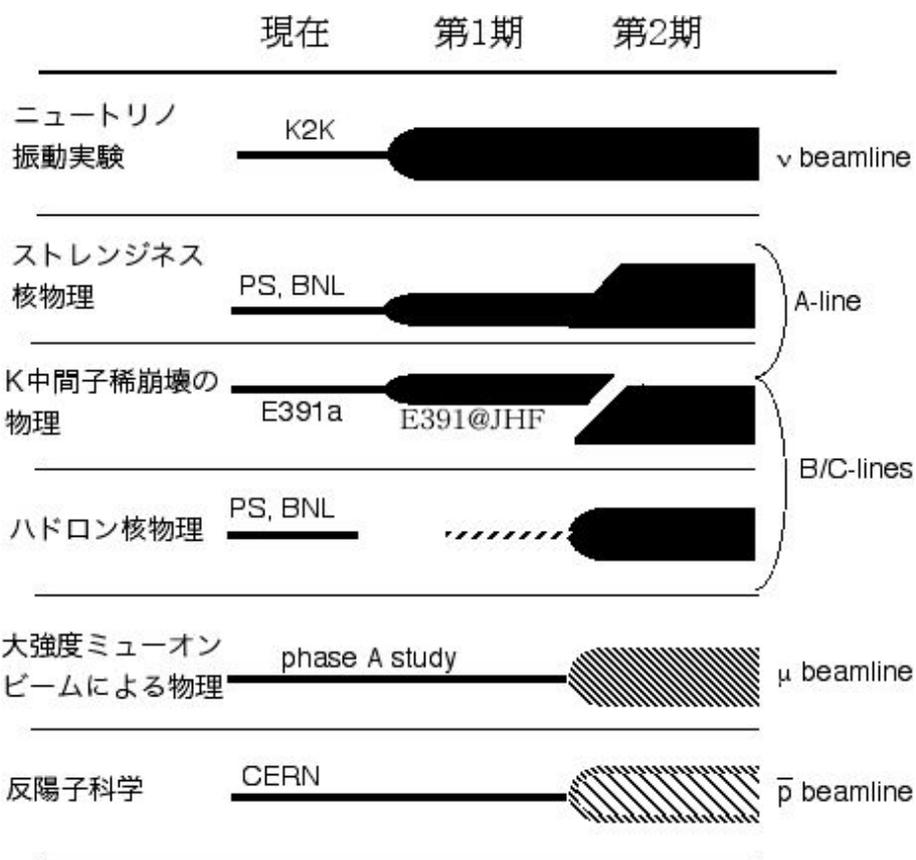


図 1: 研究計画委員会の提言する JHF での実験プログラムの進め方の概念。μ の第 2 期は phase A study の結果に依存する。反陽子科学は海外の情勢に依存する。