

# 数物連携宇宙研究機構

9月27日

機構長のビジョン、カリフォルニア大学バークレイ校、村山斉

我々は世界で唯一の、純粋数学から理論物理、実験物理、天文学、そして応用数学までにまたがる数物連携の宇宙研究機構を提案する。この機構は、宇宙の基本的原理、宇宙の始まりと終わり、そして宇宙に存在する未知の暗黒物質と暗黒エネルギーに迫る。そのためには、宇宙の統一理論を作り上げる必要がある。これには今までにない新しい数学が必要になり、その新しい数学に基づく物理学の理論が構築される。この理論は、実験で検証される現象の予言を導く。さらに、技術的な進歩が新しい実験を可能にし、そこで必要な実験データの解析が応用数学の進歩を促す。こうして螺旋状に進歩していくことで科学が発展し、一般人の興味を引き、学生が数学・科学・工学へと進む動機となり、次世代の人材を育てていく。

## 1. はじめに

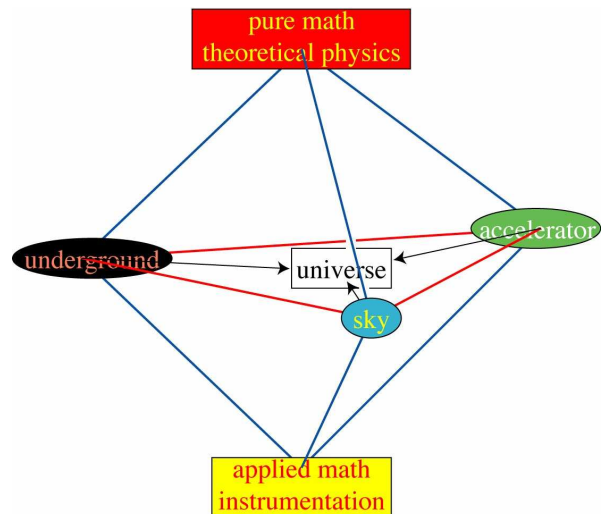
歴史を遡れる限り、人類は常に宇宙の始まり、構造、仕組み、終わりについて考えをめぐらせて来た。宇宙についての考察は最も古い科学であり、また、一番基本的な科学でもある。近年技術の進歩と理論的な枠組みを使ってこうした古来の疑問に科学の力で迫ることができるようになって来ている。この機構は

- (1) 宇宙はどうやって始まったのか？
- (2) 宇宙は何でできているのか？
- (3) 宇宙はこれからどうなるのか？
- (4) 宇宙の基本法則は何か？
- (5) 宇宙にどうして我々が存在しているのか？

という人類の究極の疑問へ迫ろうとするものである。これらの疑問は非常に基本的で、重要で、そして難しい問題である。アインシュタインが夢見て実現できなかった「統一理論」によってしか解決できないと思われている。この機構では宇宙の統一理論に数学、物理、天文の三分野を融合して迫っていく。このような数学から実験物理に及ぶ研究所は世界に例がない。機構に参加する主任研究員は世界的に知られ、分野をまたがって仕事をして来た者ばかりで、更に世界中からトップレベルの研究者を呼んでくる魅力になる。こうして機構から新しい数学の枠組みを発見し詳細なデータを提供し、宇宙の新しいパラダイムを作り上げる。

## 2.機構のサイエンス

この機構では宇宙についての基本的な問題に多角度、かつ包括的に迫っていく。そのために三つのアプローチを二つの共通項で結びつける。



### 2.1 なぜ物理と数学か？

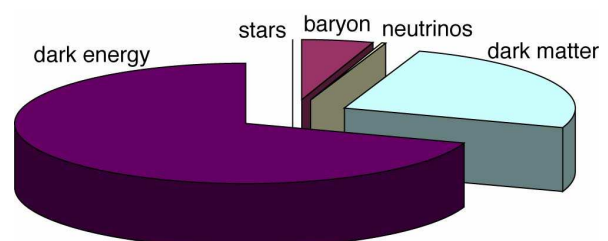
物理、数学、天文を融合する目的はとてもはっきりしている。数学は全ての分野の科学の土台である。物理と天文は科学の中で最も定量的な分野であり、非常に高度な数学を使っている。一方、物理学の最先端の理論を作ろうという試みは数学者を感化し、屢々数学の新しい分野を作ってきた。これは近年のフィールズ賞の多くの例にも見られる。

宇宙を理解するための数学の大きな役割はガリレオ・ガリレイの有名な言葉に見ることができる。「科学はこの宇宙という名の分厚い本の中に書かれていて、私たちの目の前にいつも開いてあるのだが、その本に使われている言語を学び文字を解釈しなくては理解することはできない。その言語とは数学であり、これを知らないと宇宙の一文字も読むことができない。」

数学と物理の触発し合う発展は日本の強みであり、この機構ではこの二つの分野にまたがって研究している最高のメンバーを集めることができた。こうして物理学者と数学者が会う場を提供し、若い研究者を育て、日本の将来のこれらの分野での発展を確実にすることができる。数学の進展に依って新しい物理の理論が作られ、その予言をテストするために宇宙全体を一つの実験室としてとらえて天文学の更なる発展も必要となる。逆に、天文観測からのデータは宇宙の仕組みを理解するための鍵になることはコペルニクス、ニュートン、そしてアインシュタインから現在に至るまで変わっていない。

### 2.2 三つの実験的アプローチ

まず宇宙が何でできているかについて今わかっていることを簡単に振り返ってみる。何世紀もの間、宇宙は我々と同じもの、つまり原子でき



ていると人類は信じて来た。つい過去十年ほどの間に、この考えは完全に覆されてしまった。原子は宇宙全体の 5%にも満たない。まだ正体の分からない暗黒物質が残りの物質で宇宙の約 23%を締めている。残りの約 72%は暗黒エネルギーと呼ばれ、宇宙の膨張が加速している。この正体は暗黒物質よりも更に不明である。こうして正体不明のものが宇宙に満ち満ちていることがわかっただけでなく、そもそも宇宙にあるはずのものが無いということもわかった。反物質である。反物質は実験室で作ることができるようになり、ビッグバンでは必ず作られたはずなのだが、宇宙の中に見当たらない。更に、我々の知る限り宇宙は一種の超伝導状態になっており、そのために「弱い力」はナノメートルの更に十億分の一の距離しか届かなくなっている。この超伝導体のエネルギー密度は宇宙のエネルギー合計の  $10^{60}$  倍と見積もられていて、このエネルギーがどこへ行ってしまったのかも分かっていない。何かしら別の寄与が 60 桁にわたって正確に打ち消したのだと思われる。こうした不思議な観測事実は宇宙の新しいパラダイム、従って新しい物理学と数学を必要としている。

## a) 地下実験

宇宙の問題に迫る一つのアプローチは地下実験でとても稀な現象を探すことである。これは日本が世界をリードしている分野で、機構ではそれを更に発展させていく。超新星 1987A からのニュートリノをとらえたことに対して小柴昌孝が 2002 年にノーベル物理学賞を受賞した。超新星は大きめの星が寿命に達し銀河全体に匹敵するほどの光を放って大爆発するものである。小柴は当時のカミオカンデ検出器を使い、幽霊のように捕まえるのが難しいニュートリノを使って宇宙を研究することを示したわけである。現在のスーパーカミオカンデおよびカムランド実験はまぎれもなく世界をリードしていて、宇宙とその背後にある統一理論についての深遠な問題に迫っている。これらの実験はニュートリノが実は非常に小さい質量を持っていることを示して世界中を驚かせた。しかもその大きさは現在の粒子加速器のエネルギーの  $10^{13}$  倍もの高いエネルギーで起きる統一理論の予言と大体合っているのである。つまり、ニュートリノは非常に高いエネルギーの物理、また宇宙の非常に初期の状態について探るのに役立つことになる。

この地下から宇宙を探るアプローチは更に今後盛んになっていく。例えば、地下実験は宇宙の暗黒物質を発見するのに適している。我々の天の川銀河のほとんどの質量は暗黒物質であるが、その正体はわかっていない。直感に反するが、宇宙を占める粒子を探るのに一番良い方法が地下に潜ることなのである。また、東海村の J-PARC 加速器からスーパーカミオカンデにニュートリノのビームを打ち込み、ニュートリノの新しい混合を発見しようとしている。これは宇宙にどうして我々が存在するのか、つまりどうして我々のような物質があって反物質がいのかを探る第一歩になると考えられている。

## b) 天文実験

言うまでもないことだが、宇宙を調べる当然の方法は空を見上げて天体を観測することである。地上の望遠鏡でも衛星による観測でも、近年大きな進歩があった。例えば、宇宙のエネルギーの内訳が分かったのはこうした進歩の一つである。正体不明の暗黒物質に加えて、さらに正体の分からない暗黒エネルギーが宇宙の殆どを占め、宇宙を引き裂いている。観測で分かっている限り、エネルギーの無限の源であるらしい。今後拠点での活動で、応用数学の発展による巧妙なデータ解析の方法を用い、精密・大規模な銀河の分布地図をからバリオン振動を見て暗黒エネルギーの性質が精密に調べ、宇宙背景輻射で特に **B-mode** の偏光で宇宙の始まりのインフレーションのエネルギー密度がはり、宇宙の理解が革命的に進むことが期待できる。日本はアメリカやヨーロッパに追いつこうとしているところだが、すばる望遠鏡のお蔭で今後画期的な進歩をしていけると考える。

## c) 加速器

最後に宇宙初期の謎を探る最も直接的な方法は、粒子加速器を使って実験室でビッグバンを力づくで再現することである。小さな粒子をどんどん高いエネルギーに加速して互いにぶつけてやることでビッグバンならぬ「リトルバン」を作り、宇宙の始まりの状況を調べる。日本は加速器の建設・運転では世界的なリーダーで、KEK-B はアメリカのライバルにデータ量で三倍も勝っている。今年世界最高エネルギーの加速器 LHC がヨーロッパで運転を開始することになっているが、これにも日本は重要なメンバーとして金銭面でも技術面でも参加している。一方この分野で将来の展望を切り開くには、大規模データ解析で貴重なデータから最大限物理を引き出し、ヨーロッパ勢と互角に競っていかなくてはならず、人的資源を増やして更に力を付ける必要がある。

このような実験での三つのアプローチでは既に予算化されている実験があつて、機構の予算は実験の建設に使われることはない。むしろ機構では、そうした実験からサイエンスを最大限引き出すために主任研究員を他の職務から解放して研究に専念させ、ポスドクや特任教授・准教授・助教を雇ってデータ解析の人的資源を確保し、更に将来の実験計画へ向けて新しいアイデアをすぐ試してみる開発をサポートしていく。

## 2.3 二つの共通項

宇宙の謎を解明していくにはこうして地下、空、そして加速器、といろいろな角度から同時に攻めていく必要があるのは間違いない。機構では、日本に既にある強みを行かしつつこの三つとも現実的な戦略で進めていく。一方、この多角度の戦略はこの三つをつなぐ包括的な共通項が無いとうまくいかない。この共通項の役割をするのは、

非常に高度な純粋数学と理論物理の組み合わせでもたらされる理論的な枠組みと、どのアプローチにも共通した進んだ応用数学による大規模データ解析と **instrumentation** の開発である。

理論物理ではデータから宇宙の統一理論を探り、予言を引き出して次の実験への計画を練っていく。宇宙初期の想像もできない極限状況の謎に迫るためには非常に進んだ数学が必要になる。分野を超えた物理・天文と数学の融合がまさに機構の成功の必須である。日本はこの点では湯川・朝永のノーベル賞を始め長い伝統がある。歴史を遡れば数学の大きな進歩は屢々物理での重要な問題の定式化のために生まれたという経緯があり、現在でもこのパターンは続いている。宇宙をもっとも基本的なレベルで理解するためには今までに無い新しい数学が必要であると考え。こうした困難だが取り組み甲斐のある問題はきっと機構の世界をリードする数学者を触発し、数学での新しい方向性が生まれていくに違いない。同時に機構の物理学のリーダー達はこうした新しい数学を使って宇宙の統一理論を築いていくことになる。

また、次世代の実験から得られる巨大なデータを使いこなすには応用数学・統計学からの新しいアプローチが必要になってくる。将来の加速器、天文観測、地下実験からのデータはペタバイト（10億メガバイト）を超え、重要なサイエンスを引き出すのはとてつもない仕事になる。近年 **neutral network**、**boosted decision tree**、**Markov chain Monte Carlo** といった新しい手法がデータ解析に入って来たのはそのため、一方こうした事情は応用数学者にも新しい問題を提起する。例えば、幾何学的なデータ（銀河の形等）をどう統計的に扱うかというのは未だ解の無い難しい問題である。この「確率論的幾何学」は今まで大きな発展をしてこなかったが、これは明確に定義された問題がなかったため、機構で扱うデータで目標がはっきりしてくる。こうして応用数学・統計の分野での発展を促し、機構での様々な実験をまたがる共通の問題を解くべく数学・物理の相互触発になる。

更に、理論と実験の境では新しい実験のアイデアが生まれ、現実的な実験計画として競争的資金を確保する以前に何らかの「試し」を行い、アイデアを磨いていく必要がある。**Instrumentation** とデータ解析での専門知識と経験を共有することと、若干の資金を使つての「試し」と開発を機構ではサポートしていく。こうして開発が進めば主任研究員は信憑性を持って競争的資金確保へ進むことができる。最初の数年は将来の銀河分布の観測のためのマルチファイバーの分光器、将来の地下実験のための新しい光電子増倍管や極低放射能環境の開発に取り組むことになる。ハイテクの国として日本は世界をリードしていくことができるはずである。

このようにして、純粋数学・理論物理と応用数学・**instrumentation** は三つの実験アプローチに共通項となり、機構の研究活動を互いに結びつける。

この機構は日本の科学の現在の強みを活かし、三つの異なる実験のアプローチを積極的に推進し、一方二つの共通項でその活動を結びつけ、全体として統一・一貫した活発な研究環境を作っていくことができると考える。

このような研究機関は世界でも類を見ない。Kavli Institute for Theoretical Physics は理論物理ではすばらしい研究環境を持つが、あくまでも理論物理だけである。世界には数多くの数学と理論物理の研究所がある。例えばケンブリッジの Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences、プリンストン高等研究所、フランスの IHES、バークレイの Mathematical Sciences Research Institute などである。しかしどれも実験物理はプログラムにない。また、理論と実験物理の研究所としては CERN（欧州原子核研究センター）、Fermilab、スタンフォード線形加速器センター、高エネルギー加速器機構等があるが、数学は入っていない。この機構で展開するサイエンスはその独特の組み合わせと将来のブレイクスルーへの期待で、きっと世界中からトップの研究者を引きつけるであろう。

### 3. 数学と物理学の連携

数学と物理が具体的にどのように互いを触発していくかは自明ではないかもしれないので、特に機構の研究者の過去の成功の経験を強調しつつ、この背景を説明してみたい。

そもそも自然の基本法則の探求のためには新しい数学を発明する必要があり、数学の多くの発展の要因となって来た。例えば、1990 年以來のフィールズ賞の約 4 割が物理学における量子場の理論や弦理論に関わりの深い分野に授与された。数学にこれほど大きな影響を与えた科学の分野は他にはなく、今後この傾向は更に加速していくであろう。逆に、数学で発展した理論的な技術は素粒子物理学の進歩に甚大な影響を及ぼした。例えば、数学の発展は量子場の理論や弦理論で 20 年前には考えられなかったような強結合の効果の理解を可能にして来ている。

過去数十年の間、弦理論の幾何学への応用がすばらしい発展を生んで来た。ミラー対称性は物理学者が予言し数学者が証明した新しい数学的構造で、シンプレクティック多様体のグロモフ・ウィッテン不変量の計算に強力な手段となった。また数学者と物理学者の共同研究から、この数学がゲージ理論のインスタントン、可積分統計系、組み合わせ論等の数学の他の分野と驚くべき関係を持っていることがわかった。現在これは幾何学で最も活発な研究分野の一つであり、この発展により Kontsevich と Okounkov がフィールズ賞に輝いている。

大栗博司はこの分野での物理学でのリーダーであり、グロモフ・ウィッテン不変量や関連する数学を使って統一理論や量子重力の基本的な問題を研究して来た。また、この分野で重要な仕事を来た数理論物理学者で、機構の特任准教授に適任と思われる候補がすでにおり、柏に常駐してもらうことを考えている。この人は現

在海外の名門大学において数学教室と物理教室併任の助教授であり、数学者とも物理学者とも共同研究の長い経験がある。また、駒場の数理科学研究科にもグロモフ・ウィッテン不変量や関連する数学の研究をして来たメンバーがいる。フランス IHES 研究所の Kontsevich と Nekrasov は連携研究者として機構に参加してもらえることになっている。機構はこの分野で世界のリーダーになるであろう。

恐らく物理に触発された新しい数学の発見で最も有名なのは、ニュートンによる力学と微積分学の発見であろう。この場合無限小と連続の厳密な数学的定式化が不可欠であった。将来を考えるに、無限自由度の系を扱うツール「無限解析」が 21 世紀の数学と物理の同程度に重要になると考える。

素粒子の間の「強い相互作用」を記述する量子色力学 (QCD) は無限自由度の系の一つの例である。2000 年にクレイ数学研究所は七つの「ミレニアム賞金問題」を発表した。この一つは QCD での閉じ込めの証明であり、この証明ができれば高エネルギー物理学の最先端に画期的な展望を与え、また新しく実りのある今後の数学研究の土台を作ることになる。無限解析のもう一つの例としては弦理論の幾何学がある。伝統的には幾何学は点を基本に組み立てられて来たが、空間に広がった弦を基本にすることで幾何学に新しい視点を持ち込むことができる。このことは既にミラー対称性やグロモフ・ウィッテン不変量等で明らかだが、氷山の一角に過ぎず、まだまだ今後数学でこの方面から進歩が期待できる。そしてこの分野での数学の発展は物理学者の手に渡り、弦理論からより確かで実験的に検証可能な予言を引き出すのに役立つであろう。

無限解析はまた幾何学的物体の統計に役立つ。例えば、共形場理論の手法は self-avoiding random walks の確率論的幾何学の研究に使われ、Werner へのフィールズ賞授与の理由になった。この方向での研究は天体観測や加速器実験での幾何学的なデータの解析に役立つであろう。

日本では 80 年代後半から 90 年代初めにかけて、数学者と物理学者の共同研究が特に盛んであった。90 年代初めにはこの学際的な研究に学術振興会から五年間で約 10 億円の資金があたえられた。この機構の主任研究員の内、数学の神保道夫、河野俊丈、土屋昭博、そして物理の大栗はこの学際研究の研究分担者でもあった。この学際研究は大成功で、数学者と物理学者による数々の重要な共同研究がなされた。また、数学でも物理でも若い研究者を見つけて育てるのにも貢献した。特にこの盛り上がりの中で育った物理の大学院生が日本の名門大学の数学の教官になったことに注目したい。私自身この活発な研究環境の中で東京大学の大学院生として生まれ、院生時代最初の二本の論文は Witten のフィールズ賞論文に触発された数学と物理の境界領域についてであった。

世界的には過去十年間数学と物理学の境界領域は凄まじい進歩を遂げた。しかしながら同時期日本では数学者と物理学者の共同研究はどちらかという下火になっていった。この機構でかつての学術振興会の学際研究のメンバーを再結集し、

数学と物理の共同研究を再び盛り上げることで、21世紀の数学・物理学の新しいパラダイムを作ることに繋がっていくことができると考えている。

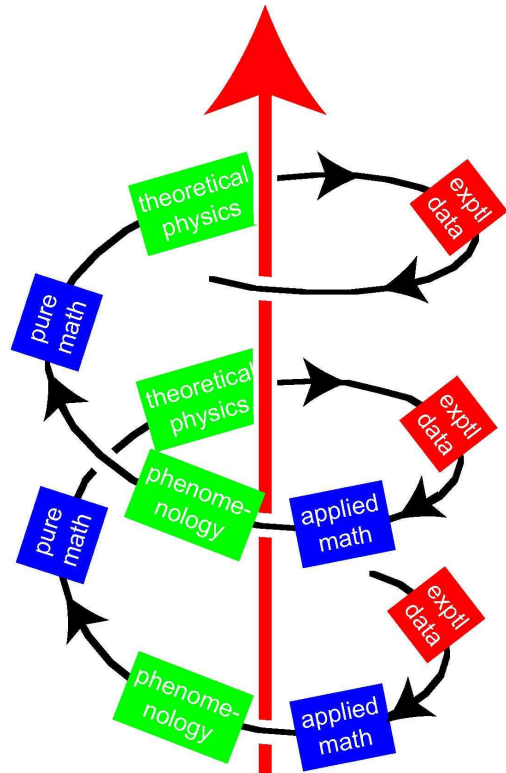
## 4. 発見と成果のシナリオ

この機構でのかつてない相互交流により生まれる発見と成果の可能性をいくつかの例を挙げて説明したい。こうした発展は数学、物理学、天文学をめぐって「上向螺旋」を描いて進んでいくと期待できる。

### 4.1 初期の研究活動

機構の初期には次のような分野で研究が進められる。

- 銀河分布の新しい観測で暗黒エネルギーの性質が詳細に決められ、量子論的な真空エネルギーが暗黒エネルギーの候補から落とされ、新しい量子場の力学が必要になる。
- ニュートリノの質量と混合が精密に決められ、統一理論、超新星爆発の機構、重元素の起源、物質・反物質の非対称性などについての理解が深まる。
- LHC のデータを実験物理と理論物理の研究者が共同で解析し、宇宙初期にしか存在しなかった新しい力と対称性を発見する。
- 新しい地下実験により我々の銀河の暗黒物質が新しい素粒子であることを確立、また地球内部をニュートリノで詳しく観察。
- 可積分系の手法と AdS/CFT correspondence などによる量子場理論と重力理論の関係を使って強結合での量子場の理論の振る舞いを解明、クレイ数学研究所の「ミレニアム賞金問題」の一つを解決。
- 幾何学での新しい手法が発展して弦理論の解の空間を解明。
- 応用数学での統計手法で新しいアルゴリズムを発見、ペタバイトスケールの天文観測データから暗黒エネルギーの性質を抽出。



### 4.2 成果の例



機構での研究から最終的にどのような成果が出るのかを正確に予測するのは難しいが、いくつかの大きな成果の可能性と機構の学際的な研究による相互触発の重要性を推測してみる。

- 宇宙の暗黒物質の正体についてのつじつまのあった描像。神岡での地下実験での暗黒物質の検出、LHC のデータの高度な解析、そのために機構で開発された新しい数理解析の手法が鍵になる。機構の理論物理の研究者はこれらの様々なデータを統一的に理解する枠組みを考え、ニュートリノやガンマ線による検出方法を予言、新しい実験の計画へ進む。同時にこの暗黒物質についての新しい知見を包含する統一理論の建設の努力が始まる。弦理論に基づく統一理論から実験への予言を引き出すために新しい手法を生み出す。更にその手法を用いて機構の数学者が多様体の新しい不変量を発見、幾何学の大問題の解決への足がかりになる。
- 大規模な三次元銀河分布の観測から宇宙の膨張を加速している暗黒エネルギーの性質を割り出す。機構の応用数学の研究者の助けにより弦理論の解の空間の「風景」を調べる方法を開発し、解の多くが実際データで示唆されるような暗黒エネルギーの性質を持つことがわかる。その結果宇宙の将来は膨張の加速が永遠に続くわけではなく、数十億年後には量子論的な泡の生成によりエネルギーの低い解へトンネル現象で遷移し、減速膨張に戻ることを示す。
- 銀河分布の観測からのもう一つの情報は密度揺らぎのスペクトル指数で、これによりインフレーションのモデルに制限をつける。インフレーション宇宙のような時間に依存する弦理論の解は現在よくわかっていない。機構の物理の研究者は数学の可解系の研究者と協力して時間に依存する解の記述を作り出す。これをふまえて天体観測者、素粒子と弦理論の理論家が共同でデータは弦理論の解を著しく限定することを示し、限定された解から更にテンソル・モードの密度揺らぎ等の宇宙論的予言をし、新しい機構の観測で予言を検証していくことになる。また大規模データから微妙なシグナルを読み取るための解析の必要性は応用数学と統計の研究者に新しい解析の手法の開発を促し、新手法を用いて予想されていなかった暗黒エネルギーの振る舞いが見つかる。
- 機構では次世代のニュートリノ実験のデータ解析に研究者を投入、新しいタイプのニュートリノ混合を発見する。この発見で地球上にある鉄より重い元素が過去の超新星爆発により作られたのかどうかの理解が進む。更に物質素粒子の質量と混合についてこれで完全な情報がそろい、弦理論のコンパクト化に制限をつける。そして我々が宇宙に存在できる理由、つまり反物質と物質の非対称性についてゲージ理論のトポロジーを変える遷移が関係していた可能性を強く示唆する。
- 機構の研究開発で可能になった実験で陽子崩壊が発見され物質は全て  $10^{35}$  年で崩壊することがわかり、銀河観測のデータとの弦理論の解空間の解析から多元宇宙が確からしいこともわかり、一方宇宙の膨張の加速が更に 1

00億年以上続くこともはっきりして、社会に思想的・精神的・宗教的影響を与える。

### 4.3 目的達成のためのメンバー

機構の野心的な目的を達成するために必要な、単に「世界クラス」以上の、世界をリードする研究者を主任研究員に集めることができた。

地下実験については既に日本が世界をリードしており、その中で更にリーダーの鈴木洋一郎、梶田隆章、中畑雅行、そして東北大学の井上邦雄を結集した。UC Irvine の Hank Sobel とパリ大学の Stavros Katsanevas を加えて更に強力なグループになっている。「空」のアプローチではハードウェアと DAQ の中心人物として福来正孝と相原博昭が入っており、杉山直が大規模データの解釈を担う。プリンストンの David Spergel は WMAP の大規模データから宇宙のパラメータを決めた実績があり、相原と共にすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam 計画に入っている。野本憲一は重要な天体力学の専門知識を機構に持ち込む。加速器実験では相原のハードウェアの技術に相補的なシミュレーションとデータ解析の中心人物が必要である。私が LHC のデータを使う理論家のグループを作る役割を担う。既に特任助教授レベルで機構に採用したい LHC 実験の若いリーダーと、様々な新しい理論の LHC での信号を研究している特任准教授レベルの候補者が浮かんでいる。この二人の任用で日本のグループの力が大幅に補強される。

柳田勉は統一理論の構築に集中、カリフォルニア工科大学から大栗が統一理論の一番の候補である弦理論の専門家として参加。かつて名古屋大学の多元数理科学研究科長を勤めた土屋は数学と物理の境界領域で顕著な研究をし、またこの分野で研究者のグループをリードした実績があり、大栗とともに数学と物理の連携を積極的に進める。神保は可積分系、河野は幾何学のリーダーで、宇宙統一理論の構築へ向けての更なる力となる。それに加えて物理学者と共同研究の実績のある数学者三輪哲二と中島啓、湯川基礎物理学研究所所長の江口徹、フランスの IHES からフィールズ賞受賞者 Konsevich と Nekrasov が既に連携研究者として参加を決めている。宇宙の最初期の研究はインフレーション理論の提唱者の一人である佐藤勝彦が充分カバーしている。

私はバークレイで National Science Foundation の資金で10年間続いた Center for Particle Astrophysics (CfPA)の終わりの時期を体験し、また Center for Theoretical Physics の立ち上げを中心になって進めた経験がある。学際研究をするセンターの成功のために学んだ教訓が二つある。一つはポストドクが「自由に動き回る糊」の役割をする働きをすること。ティーチングや雑用等の仕事が無く知的好奇心旺盛なポストドクはごく自然に多くの研究グループと接触し、様々な研究グループ・主任研究員間の風通しを良くする。そして世界中からトップレベルの研究者をビジターやワークショップの参加者として連れてくることで、ポストドクを触発し大

学院生を育てることが、機構を最大限活かすことになる。もう一つは研究者が自然と各自のオフィスから出て来て、意見をかわし議論したくなる、魅力的な交流スペースを持ったオープンなデザインの建物が重要だということ。特に日本は生半可なアイデアを話すことを恥ずかしがって嫌う文化がある。むしろ「どんな質問や中途半端なアイデアでも恥ずかしくない」という相互理解を作ることが必要不可欠である。

## 5. 機構の運営

機構長は人事、財務、設備、施設、計算機等研究機器、そしてアウトリーチ等対外公共活動に関する全ての決定に最終責任を持ち、機構を運営する。鈴木洋一郎と相原博昭は副機構長として日々の機構の業務を遂行するために機構長を助ける。中村健蔵事務部門長は副機構長の監督・指示のもと機構の業務を施行する。事務部門長は事務職員のグループを指揮して、全ての資金の出入り、事務処理、そして研究者の活動を手助けする。この三人のチームはサイエンスの面でも事務的な面でもすばらしく、機構を運営するのに必要な全ての援助が得られることと確信している。

Scientific Advisory Committee (SAC)は機構長が選ぶ4-5人の主任研究員からなる。機構の予算と研究の方向性について機構長に助言をする。SACの役割はあくまでも助言であり、最終的な決断は機構長が行う。

主任研究員は独立してそれぞれの研究にあたる。研究に必要な費用は競争的基金を獲得して賄うが、研究を助けるためのポスドクや特任教授・准教授・助教を雇うことを機構長に提案する。SACに助言を求めつつ、機構長が自分のビジョンとプライオリティーに基づき任用について決定する。

機構の研究を本来提案された目的に沿って行うために、External Advisory Boardを作り、一年に一回研究活動をレビューして機構長に助言する。

機構を運営する仕事の以外にも、機構長は若い有望な研究者をリクルートし、また機構での研究結果を世界に伝える努力をしていく。

## 6. 組織

機構が成功するためには二つの相反する必要条件をうまく折り合わせていかななくてはならない。一つの条件はそれぞれの主任研究員が自分の計画に従って研究し、ポスドクを雇い、ビジターを招待し、ワークショップを組織するための十分な経済的サポートをして、できるだけ自由な時間と自主性を保証していくことである。一方もう一つの条件は様々な専門分野の研究者が、定期的なセミナーやワークシ

ョップ、ビジタープログラムを通して、互いに話ができるようになり触発し合うことである。この二つの条件を満たすことは容易ではないが、機構の成功のためには重要である。

これを実現するために必須の要素は東京大学柏キャンパスに拠点のための新しい建物を建てることである。大学本部の寛大な対応により、将来の間接経費の一部を前借りすることで、研究者が簡単に顔を合わせ、アイデアを交わすことができる施設を建設する。建物のデザインは UC Santa Barbara の Kavli Institute for Theoretical Physics や UC Berkeley の Center for Theoretical Physics のように広い交流のための場所と装備（例えばたっぷりとした自然光、エスプレッソマシン、冷蔵庫、そしていつでもどこでも議論がはじめられるように壁に張り巡らされた黒板）。こうして魅力的で他の研究機関と張り合える環境を作ることができる。

土屋と斎藤は主任研究員の一人として柏に常駐、また3節で触れた特任准教授の数理物理学者と拠点で雇う数学のポストドクも柏にいて、数学と物理の研究者の交流を容易にし、常に活発な研究活動が続くことを保証する。年二回ワークショップで数学と物理の研究者を集め共通の問題を確認する。また定期的に数学者と物理学者の間の知的な障壁を打ち砕くためわざと何が分かったかではなく、何が問題かを説明し合う集まりを持つ。その後電話やビデオで個別に連絡を取り、必要に応じて訪問し合い、また定期的なセミナーをビデオで中継して共通の興味を維持する。柏キャンパスに十分なオフィススペースを用意し駒場の数学者がいつでも来られるような環境を作る。また年中無休24時間の最新のビデオ会議施設を用意し、インターネット黒板も駆使して、いつでも準備をしなくても議論が始められるようにしておく。

実験物理学者の多くは柏キャンパスでかなりの時間を過ごし、データを解析し、セミナーで出合い、新しい機器を開発し、共通の興味を互いに分かち合い、また理論物理学者や数学者と議論をしていく。スーパーカミオカンデ、XMASS、T2K については、拠点でデータ解析の活動をホストする。すばる望遠鏡での HyperPrimeCam プロジェクトについては拠点でコンピュータークラスターを持ち、データ解析に必要な数値シミュレーションをホストする。また、ATLAS 実験に参加している助教を雇い、拠点の資金を使って CERN から頻繁に戻り、定期的に素粒子現象論の理論家と新しい理論のアイデアについて情報を交換し、日本の理論家と実験家両方のためにスクールを開催する。本郷キャンパスの物理学専攻と密な関係を持っていくことも重要である。本郷の教官を併任で機構に迎え、キャンパス観で定常的に人の行き来を確保していく。

External Advisory Board が年一度機構の研究活動をレビューするが、その際主任研究員は全員揃う。また、年に一回機構の研修会を持ち、主任研究員を全員集める。こうして機構のさまざまな研究活動を主任研究員全員の間で互いに知り一貫性を保ち、交流と共同研究を可能にしていく。

柏の機構の施設では毎日3時をティータイムとし、外へ出掛けていない研究者は全員参加必須とする。主任研究員や研究グループはそれぞれのセミナーを自由に定期的に持つが、機構の研究者は全員参加歓迎である。KITPやAspen Center for Physicsのような長期滞在型のワークショップを使ってビジターを招待し、知的な環境を作り機構が常に世界の最前線にいることを確実にしていく。

私自身はこの秋は授業のためバークレイを離れることはできない。しかし制度上許される最も早い時期、つまり2008年の1月には柏に物理的に引っ越すつもりである。諸々の手続きは驚くべき早さとスムーズさで進んでおり、東大に附いてもバークレイについても1月の拠点長就任を実現すべく物事を進めてくれると確信している。

## 7. 社会還元

宇宙を最も基本的なレベルで理解しようとする基礎研究は、生医学やナノテクノロジーのように直接応用がうまれるものではない。しかしながら、若い生徒・学生は最先端の基本法則の探求に心を引かれ、特に過去の例を見ると最優秀な若者たちもそのグループに含まれていることが多い。機構の研究者による、宇宙の深い謎を明かす発見は、日本の高校生・大学生の興味を引き、数学や科学を勉強し、次の世代の人材を育成していくことに大きな役割を果たすだろう。この機構に独特なこととしては、数学と物理の間を専門的な職業として行き来し、統計と実験物理の間にも同じことがあると予想される。言うまでもなく、機構で研究する問題は一般の人にも理解し易い問題である。この基礎研究と教育の関係は最近では例えば“Rising Above the Gathering Storm”という米National Research Councilからの報告書でも強調されている。

我々は研究者の多様性を非常に真剣に考えている。現在日本では物理教室の教授レベルで女性の割合は2-3%だという。我々には既に女性の主任研究員がおり、近いうちに割合を10%まで上げるつもりである。更に民族的多様性も重要視し、特にアジアの研究者が拠点に参加することをより立てていく。既にインドの強力な物理学者達の参加を得ているし、中国や韓国の研究所との協力関係も議論している。

機構では数学と物理に関する一般人の理解・興味を深めるため一般講演会のシリーズを持ち、メディアやテレビと協力し、連携機関の学生の教育にも役立てていく。日本ではアメリカに比べて一般の人が科学技術での発見について興味を持っており、若者を触発して科学・工学へ進むことを促すのは比較的うまく行っていると考えている。私自身分かり易い文章を書いたり、ラジオに出たり、一般講演をしたりと研究成果の社会還元に勤めて来た。この機構では更に大きな発見と一致した努力で一般への科学啓蒙を行っていく。

更に、機構の研究で得られた手法やテクノロジーは間接的に社会に役立っていくに違いないと考えている。天文観測や加速器実験からの大規模データを解析する手法は金融市場や生物学のデータ解析に使えるだろう。次世代の実験設備を作るために開発するテクノロジーは、企業による利潤目的だけの研究では長期的すぎて対象にできないものも多い。例えば基礎物理学の実験のために口径20インチの光電子増倍管を開発し、その技術を応用して特に医学関係の応用では世界の市場の独占に近い位置に上りつめた企業もある。将来のニュートリノ検出器の開発は、原子炉の監視に役立つことも考えられる。また将来の大規模な天文観測に必要なマルチファイバーのテクノロジーは医学に診察、レーザー医療等で役立つ可能性がある。

機構の大事な点は日本から優秀な研究者の「頭脳流出」を止め、既に流出した者を連れ戻す可能性である。私自身個の新しい研究センターを自分のビジョンに基づいて企画する機会に惹かれ、また世界に類のない機構のあり方に魅力を感じた。既にカリフォルニア工科大学から大栗、UC Irvine から Sobel、プリンストンから Spergel が主任研究員として機構に参加すること、更に海外から特任で来てくれる人のめどがあることは、この機構がどんなに魅力的で独特な者であることを示している。この機構が更に多くの研究者を引き寄せ、数学と物理学の境界線を動かし、真に世界をリードする刺激的な研究センターになると私は信じている。

## 8. 結び

この機構は純粋数学から理論物理、実験物理、天文学、そして応用数学までにまたがる世界で例を見ない研究センターである。今後宇宙の大きな謎を解き明かしていくためにはどの一つの分野も欠かせない。機構で関与する実験からの新しい精密なデータを理解するためには既存の理論では不足になり、新しい理論を作るために必要な新しい数学の枠組みを作り出すことになるだろう。一方新しい数学を使って理論からより信頼できる予言を引き出し、更なる実験計画を生み、そのための新しいテクノロジーが開発されていく。こうして機構では数学と物理の狭間の未知の領域を探求していく。この何重にも絡み合った研究活動と相互触発は宇宙の理解を上向螺旋状に進歩させていく。機構の研究での発見、新しい知見は一般の人たちへ啓蒙していき、若者に興味を持たせて数学・科学・工学の勉強へ進ませ、次の世代の人材育成に結びつけていく。世界から優秀な研究者を集めてくることで、日本を人類の基本的な疑問に応え、知識を前進させる独特な場所に変えていくことができると考える。