

宇宙物理学と素粒子物理学の 相乗的かつ統一的な発展のために

素粒子と宇宙連絡会

平成 19 年 8 月 21 日

はじめに

高エネルギー委員会では、高エネルギー物理学研究の現行計画ならびに将来計画について、国内の様々な研究グループからの報告を受け、また国内外の状況を分析した上でそれらの学術的重要性と日本が推進すべき課題について検討を重ねた。この結果は「素粒子物理学の展望」としてまとめられ、2006年10月の高エネルギー物理学研究者会議総会で承認された。「素粒子物理学の展望」において検討された将来計画はいずれも加速器を用いた研究計画である。加速器は今後も素粒子研究の重要な柱であり続けると考えられるが、宇宙の理解や非加速器実験が素粒子研究に果たす役割は増大しつつある。一方で、素粒子の理解に基づく微視的宇宙像の構築も求められており、今や素粒子物理と宇宙物理は不可分の学問領域を形成しつつあるといえる。このような研究状況を背景に、高エネルギー委員会では、素粒子物理と宇宙物理の相乗的かつ統一的発展のために、研究者コミュニティの垣根を越えたフォーラム形成の必要性を強く認識し、「素粒子と宇宙連絡会」を発足させた。「素粒子と宇宙」に関連する研究者が一体となって将来計画を提案できる体制作りが最終目標ではあるが、第一段階として高エネルギー委員会に宇宙・宇宙線・原子核分野の研究者を招き（*）、各分野の研究の現状とそれぞれの将来計画について意見交換を行った。この結果をまとめたものが本報告書である。

（*）高エネルギー委員は飯嶋（名大）、生出（KEK）、駒宮（東大）、徳宿（KEK）、中家（京大）、野崎（KEK、委員長）、羽澄（KEK）、幅（KEK）、日笠（東北大）、山下（東大）、山中（阪大）。また、高エネルギー委員に加えて「素粒子と宇宙連絡会」に参加をお願いしたのは以下の方々である（敬称略）。相原（東大）、岸本（阪大）、黒田（宇宙線研）、杉山（名大）、須藤（東大）、高橋（ISAS）、鳥居（早稲田大）、中畑（宇宙線研）、二宮（京大基研）、宮崎（天文台）。

2月17日の顔合わせと意見交換に続き、3回の会合を開き各分野の紹介をお願いした。講演者と分野は以下の通りである。

3月26日 野崎（高エネルギー）、杉山（宇宙論）、岸本（ダブルベータ崩壊）

4月21日 高橋（X/線天文）、鳥居（高エネルギー宇宙線）、黒田（重力波）

7月7日 相原（ダークエネルギー）、中畑（ダークマター）

1 微視的宇宙像と素粒子の基礎法則

最近の宇宙の精密観測は、暗黒物質と暗黒エネルギーが宇宙のエネルギー組成の実に 96% を占めているというという驚くべき事実を我々に突き付けている。更に、インフレーションと呼ばれる初期宇宙の急膨張を間接的に示唆する観測結果も得られており、宇宙誕生の瞬間を科学の目により検証することが空想ではなく現実のものとなってきている。インフレーション、暗黒物質、暗黒エネルギーはいずれも現在の素粒子標準理論では説明がつかない大問題である。従って実験、観測、理論の総力をあげて新しい物理の基礎法則を確立し、微視的宇宙像を構築することが 21 世紀における物理学の大きな課題となっている。そのためには、宇宙物理学と素粒子物理学のコミュニティーが、両者の相互理解を促し、融合した研究を更に喚起し、両分野の更なる発展を目指すことが肝要である。

2 宇宙論

2.1 インフレーション

アインシュタインが構築した一般相対性理論に基づいてフリードマンが発見した膨張宇宙解は、ハッブルによる遠方の銀河の後退速度の観測によって現実の宇宙に対応していることが明らかになった。それに基づいてガモフが提唱したビッグバン宇宙論は、宇宙背景放射の発見によって検証され、ここに始めて人類は科学的な宇宙史を持つことになった。ビッグバン宇宙論は宇宙に存在するヘリウムの起源を説明できる優れた理論であったが、「なぜ現在の宇宙はこんなに大きく、一様でしかもさまざまな物質で満ちているのか？」という、根源的な問題には答えることができなかった。

この宇宙の一様等方性の問題に対する解答として、「インフレーション」と呼ばれる急膨張が宇宙の非常な初期に起こったというアイデアが 1980 年代に提唱された。インフレーション理論は、宇宙に満ちたスカラー場の持つ「真空」のエネルギーによって、上記の急膨張を起こすものである。宇宙背景放射のゆらぎの観測による検証を経て、現在では、宇宙誕生に関する最も有力なパラダイムと考えられている。インフレーションのより直接的な検証、またインフレーションを実現し、かつ重力の量子効果を取り込んだ新しい素粒子論の構築は、宇宙物理学、素粒子物理学の双方にとって最重要課題のひとつである。

2.2 バリオジェネシス (宇宙バリオン生成)

宇宙物理学と素粒子物理学の双方にとって、宇宙の反物質が消えた謎の解明は重要である。1970 年代に提唱された素粒子の大統一理論を初期宇宙に適用することにより、バリオン非対称の起源にせまることがはじめて可能になった。標準模型においても、宇宙初期の高温の時期に限ってはバリオン数を保存しない反応が頻繁に起こり、物質反物質の比が変化することも明らかになった。(一方で、バリオン数とレプトン数の差は一定となる。)しかし、標準模型では現在の宇宙のバリオン非対称性を説明することは不可能であり、 CP 対称性を破る未知の粒子・相互作用の存在が必要となる。エネルギーフロンティア、フレーバー物理の両方において

これに関する手がかりを探ることが重要である。また、宇宙の非常な初期に生じたレプトン数を、バリオン数に転化する可能性（レプトジェネシス）も魅力的であり、ニュートリノの物理はこれと関係が深い。

2.3 暗黒物質

1930年にオールトが銀河系内の星の運動を測定して以来、銀河団内の銀河の運動、銀河の回転、重力レンズの効果等の観測を通して、宇宙には星として輝いている物質以外に、電磁波では見えないが重力の源となる物質（暗黒物質）が存在していることが明らかになった。宇宙背景放射のゆらぎや、宇宙初期に生成された軽元素の量の測定により、暗黒物質の大半は陽子や中性子からできている通常の物質ではなく、未知の粒子でなければならない。その有力な候補として、超対称標準模型の超対称粒子のうち最も軽いもの（LSP）があり、その検出がさまざまな方法（直接検出、太陽中心や銀河内での対消滅の間接探索）により試みられている。

2.4 暗黒エネルギー

近年の宇宙論的観測の進歩にはめざましいものがあり、特に、Ia型超新星の距離分布、宇宙背景放射、宇宙の大規模構造の精密な解析によって、宇宙論は精密科学として誤差解析に耐えられる域にまで発展し、素粒子物理との詳細な比較検討も可能な段階になりつつある。

これらの観測結果により、原子は宇宙のエネルギー組成の4%しか担っておらず、残りは暗黒物質（20%）や暗黒エネルギー（76%）と呼ばれる、実体の知られていないものであるという驚くべき事実が我々に突き付けられている。観測結果は現在宇宙の膨張速度は速まりつつあることを示しているが、この原因が「真空」のもっている暗黒エネルギーであるとされる。これはアインシュタインが導入した宇宙項と類似の性質を持つものであるが、その実体となる場が存在するならば、完全な「宇宙定数」でなく、時間とともに変化することは十分考えられ、その性質を調べることが重要となる。

3 新しい物理と力の統一

3.1 素粒子標準理論を越えて

素粒子物理学は、物質の究極単位とそれらの間に働く相互作用を統一的に理解することを目的としてきた。19世紀の終りにトムソンが電子を発見し、今世紀の始めに原子核が発見され、量子力学が新たなパラダイムを形成した。加速器がない時代には宇宙線の研究から陽電子、 μ 、 π 、 K などの新粒子が次々と発見された。第二次大戦後、高エネルギー加速器が次々と建設されるとハドロンと呼ばれる強い相互作用をする多くの種類の粒子が作られ、それらを統一する為にクォークモデルが生まれた。

20世紀後半、素粒子物理学では実験と理論があいまって著しい展開が起こり素粒子の「標準理論」が構築されるに至った。標準理論は、(1) 物質を構成する基本粒子はクォークとレプトンである、(2) それらに働く三種類の力はゲージ原理に支配されている、(3) 素粒子の質量の

起源はヒッグス粒子である、という三本の支柱から成っている。標準理論は多くの実験によって高い精度で検証され、大きな成功を収めてきた。また、宇宙が 100GeV 近辺の温度であった時代の様子が分かるようになった。しかし、標準理論の一本の支柱であるヒッグス粒子が未発見なので、ここは実験的に未検証のままである。また、標準理論では三種の相互作用が統一されておらず、重力相互作用はその枠に入っていない。更には、何故クォークやレプトンの種類（フレーバー）が 3 世代 12 種類存在しているのかという本質的な疑問が残っている。従って、標準理論は究極の理論とは考えられず、これを越えて素粒子物理が如何なる方向に進んでいくかが今まさに問われている。

標準理論を越えた新たなパラダイムとして最も有望視されているのが超対称性理論である。超対称性は、時空に関する新しい対称性であり、素粒子標準理論の基本対称性を拡張する。超対称性を TeV（テラエレクトロンボルト、 10^{12} 乗エレクトロンボルト）というエネルギースケールに導入することにより、ヒッグス粒子の質量を安定化し、後に述べる力の大統一を可能にする。更に超対称性粒子は暗黒物質の有力な候補となる。超対称性が見つければ、後に述べる重力も含めた究極の統一理論である超弦理論へ有力な手掛かりが得られる。

3.2 力の大統一

自然界に存在する四種類の基本的な力の中で、電磁気力、弱い力、強い力の三種はいずれもゲージ理論の枠組みで記述することが出来る。これらの力は地上の実験室で作り出せるエネルギーレベルでは大きく異なって見える。しかし宇宙のごく初期に相当する非常に高いエネルギーでは、三種の力の強さは同じになり、統一されることが期待されている。これまでの高エネルギー素粒子実験で精密に測定された力の強さを超対称性理論によって非常に高いエネルギーに外挿すると、この力の大統一を実現することができる。

3.3 量子重力理論

力の大統一がなしとげられても、重力を量子論の枠組みと融合させるという大問題は残る。超弦理論は四種の力全てを統一する最終理論の有力候補である。超弦理論では、我々の存在する時間 1 次元空間 3 次元の 4 次元時空の他に 6 次元の隠れた空間次元が存在し、この空間の幾何学によって素粒子の内部自由度が説明されるという。但しこの隠れた次元はプランク長 (10^{-35} m) 位の大きさにコンパクト化されているか、または素粒子標準理論の粒子が余剰次元方向に行けない為に観測できないとされる。超弦理論は必然的に重力を含むので、長年の懸案であった重力と量子論の融合が可能となる。超弦理論から派生した最近のブレーン宇宙論では、宇宙の開闢やインフレーションに関わる議論もされている。

4 プロジェクト

4.1 加速器実験

高エネルギーでの粒子衝突実験は、宇宙初期の高温高密度の世界を地球上で一瞬つくり出すものであり、エネルギーフロンティア加速器は、宇宙史を遡り宇宙初期に迫るための手段である。現在の加速器は宇宙開闢の 10^{-12} 秒後の世界に到達しようとしている。これらの実験から統一理論などの明確な方向が分かれば、更に初期の宇宙を推測することが可能となる。

2008 年から本格的に実験が始まる LHC では、高いエネルギーの新物理を俯瞰する。次に続く ILC では電子・陽電子衝突のクリーンな環境での精密測定によって、その背後の物理法則を解きほぐし、素粒子物理学の新たなパラダイムを確立することが期待される。素粒子物理学における最も緊急かつ重要な課題はヒッグス粒子と「超対称性粒子」の発見とそれに続く詳細研究であるが、これらを直接生成して研究できる時代がまさに始まろうとしている。インフレーション、暗黒エネルギーのいずれも、「真空」の量子数を持つ「スカラー場」の導入により微視的理解が得られるという考え方が有力である。従って、スカラー粒子であるヒッグス粒子の発見とその性質の研究は、インフレーションや暗黒エネルギーの解明への第一歩となるだろう。

更に、インフレーション後の宇宙の発展を解明する為には、インフレーション直後の超高温宇宙に生じた様々な素粒子群の種類とそれらの相互作用の解明が必須である。LHC では比較的早期に超対称性粒子の証拠が発見できると考えられおり、ILC の到達エネルギーの範囲に超対称性粒子の 閾値があれば、その生成・崩壊の精密測定からその性質の解明が行なわれ、軽い超対称性粒子が暗黒物質であるかを決定し、LHC の結果 と併せて超対称性の破れの原因が解明できると期待される。これらの発見と詳細研究は、宇宙物理学にも大きな影響をもたらすだろう。

現在の素粒子物理学の知識からは、軽いヒッグス粒子が存在すると考えられている。また多くの研究者が TeV までに超対称性粒子が存在すると予想しており、これが暗黒物質の有力候補となっている。しかし、予想外の展開となる可能性もあり、実験と理論があいまって全く新たな物理学の地平が開かれる可能性もある。

軽いヒッグス粒子が見つかり超対称性という大枠が決定しても、何故 3 世代 12 種類のクォークとレプトンが異なる質量を持ち、異なる世代で混合し CP の破れを生じるのかという本質的な問題が残る。これに突破口を見出そうとするのがフレーバー物理である。B ファクトリーでは、クォークセクターのフレーバー混合の大枠が小林・益川理論で説明できることが最も精度よく検証された。B ファクトリーのアップグレードでは、レプトンコライダーというクリーンな環境においてフレーバー物理の基本的データを精度を上げて収集していくことによって、標準理論からのずれを探索する。特に超対称性に起因する CP 非保存の発見があればバリオジェネシスへの効果を通して宇宙論へ波及する。

ニュートリノの CP 非保存は B-L (バリオン数とレプト数の差) 保存を通じて宇宙の反バリオンが消えた謎と関連している可能性がある。T2K 実験などでの精密測定により θ_{13} を決定し、ニュートリノセクターでの CP 非保存発見への道を切り拓くことが重要である。更に、ニュートリノ振動や荷電レプトンのフレーバー混合・ CP 非保存と、B ファクトリーなどでのクォークセクターのフレーバー混合と CP 非保存に、大統一理論や超対称性との関連で関係が

つけば、宇宙論へのインパクトは大きい。

4.2 宇宙観測

宇宙史の標準的なモデルはインフレーションによって一様等方の宇宙が生じたと考えられているが、どの時点でインフレーションが生じ、その際どのような密度揺らぎが生じて現在の物質優勢の宇宙が形成されたかの詳細は分かっていない。これらの説明は宇宙物理学だけでなく素粒子物理学の問題でもある。宇宙背景放射において僅かに観測される温度と偏極の異方性は、宇宙初期に起こったインフレーションとそれによって生じた密度と温度の揺らぎの情報を含んでいるため、インフレーションを起こしたスカラー場の素粒子物理的性質を直接反映している。プランク衛星が2008年に打ち上げられ、温度揺らぎの決定的測定が行われる予定である。それ以後の最大のターゲットは、宇宙背景放射の偏光の精密測定を通して、Bモードと呼ばれる偏光の非等方性を発見することである。大スケールのBモードはインフレーション時の重力波によってのみ生成されるインフレーションの確かな痕跡であり、その強度からインフレーションのエネルギースケールを決定できる。

宇宙観測による暗黒物質と暗黒エネルギーの探求は、切り分けて考えるべきものではなく、むしろ一体となって進んでいくものである。また、異なる「目」を持つプロジェクトの相乗効果により新しい展開が期待される。Ia型超新星分布の精密測定、重力レンズ効果を用いた宇宙の物質分布の「断層撮影」、宇宙望遠鏡を用い、X線で遠方の銀河団を数多く観測することにより、銀河団の平均的な質量変化を知ること、あるいは、「隠されたバリオン」として銀河団同士を結ぶフィラメント状の大構造によって沿って分布していると考えられている中高温プラズマ(WHIM)の構造分布を撮像型高精度X線分光で直接観測することによる暗黒物質分布の精密決定、などが計画されている。これらの観測から、暗黒エネルギーが宇宙のスケールとともに変化していったのかどうかを追求していく。アインシュタイン方程式の宇宙項では暗黒エネルギーを説明できないことが明らかになれば、一般相対論を超えた枠組みが必要となり、物理学の大きな変革となる。暗黒物質の最有力候補であるWIMPsと呼ばれる粒子には、素粒子物理学と直接関連する超対称性粒子などの候補が挙げられている。それらの対消滅や崩壊で生じるガンマ線や反粒子の観測は、暗黒物質探索の極めて有力な手段であり、理論的予測内で検出可能な大型観測計画がいくつか予定されている。

重力波天文学は、21世紀に花開くことが期待される新しい学問分野である。中性子連星からの重力波の放出により連星の公転周期が遅くなるという計算が観測とあうことは重力波の間接的な証拠となった。重力波の直接発見は、その源泉である天体現象の研究に重要であるばかりでなく、重力を媒介する素粒子=重力子が存在する証拠となる。また、宇宙論的な背景重力波の観測は初期宇宙の状態方程式を直接反映するため、宇宙の極初期の情報を提供してくれる。重力波を検出しようとする試みは40年も前に開始されているが、ようやく本格的な検出が議論できるような技術が展開されつつあり、近い将来に劇的な変化が起こることが期待される。この変化は今後の宇宙と素粒子の関わりをさらに深めていく嚆矢となると予測される。

宇宙論に直接関わる観測の他にも素粒子物理学と関連する多様な宇宙物理学の観測や実験がある。宇宙線の加速機構の全容と超高エネルギー宇宙線の起源は、いまだ謎に包まれている。GZK極限を越えるエネルギーを持つ超高エネルギー宇宙線の観測、コスミックストリングや

モノポールなどの宇宙の位相欠陥の探索、原始ブラックホールとその蒸発時に生成する高エネルギー粒子の探索などは、素粒子物理学の発展に大きな貢献をなすことが期待できるテーマである。

4.3 非加速器実験

暗黒物質は、宇宙初期に生成され、今まで生き残っていた相互作用の弱い粒子である。粒子同士の対消滅と、宇宙の膨張による粒子同士の乖離との競争で現在の暗黒物質の密度が決定される。暗黒物質は重力によって宇宙のそこそこに集まり、銀河を形成する種となったと考えられている。地下での暗黒物質の探索実験が世界中で遂行されており、超対称性で予想される銀河内での密度領域へと探索は進んでいる。

超新星 SN1987A からのニュートリノの観測によって、わが国で小柴氏が開いたニュートリノ天文学と、その後のスーパーカミオカンデでのニュートリノ振動の発見は、宇宙と素粒子を結ぶ研究の一翼をニュートリノが担っていることを意味する。大型地下実験は、陽子崩壊の探索やニュートリノ振動の研究を通して素粒子の根元理論を探求していくとともに、超新星観測などの宇宙ニュートリノ観測にも威力を発揮する。近年、南極の氷や深海を利用して高エネルギーの宇宙ニュートリノを捉えようとする試みも行なわれている。ニュートリノは荷電粒子の様に星間磁場によって曲げられることもなく、物質との相互作用が弱いいため、宇宙の遠くまで宇宙の加速現場を探ることができる。原子核のニュートリノレス二重ベータ崩壊は、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが決定でき、かつニュートリノの質量の絶対値を決めうる実験であり極めて重要である。

4.4 プロジェクトを支える技術

新たな地平を切り拓くために必要となるのは、研ぎ澄まされた道具である。加速器・測定器とそこで培われたきた技術は、これまでも高エネルギー物理学を支えてきた、最も先鋭的な道具であったが、今後も最も頼りとするものである。それらが持つ新たなポテンシャルを引き出し、新しい発想で組み立てなおす。そうすることで、既存の宇宙物理観測や非加速器実験には無かった斬新な方法論も生まれてくる。たとえば加速器の技術には極端条件を作り出すのに適したものが多くあり、様々な観測の感度を飛躍的に向上できる可能性を秘めている。過去にも axion 探索などで、この種の試みがいくつか存在した。測定器関連技術においては、すでに多くの高エネルギー物理学出身の研究者が、観測的宇宙物理などの分野で、その積極的な応用を行い大きな成功を収めており、さらなる意表をつく応用も期待される。こういった意味で、今後は既成の応用にとらわれない技術開発の展開を意識的に進める必要がある。

5 結語

宇宙高エネルギー粒子の実験的な研究では、元々素粒子実験の研究者だった人材が非常に多く参入し、素粒子実験で培われた測定器技術やデータ解析方法を用いて研究を活性化してい

る。理論研究者の分布は、いわば宇宙から素粒子までの連続スペクトラムとなっており、素粒子と宇宙の垣根がなくなっている。

壮大な時空を探求する宇宙物理学と極微の世界を探求する素粒子物理学は融合し、大きな学問体系として展開しつつある。宇宙物理学と素粒子物理学のコミュニティーが、両者の相互理解を促し、融合した研究を更に喚起し、両分野の更なる発展の為に、その戦略を協議していくことにより、相乗効果が新たな物理学の地平を開くであろう。

用語集

- **B ファクトリー**
B 中間子を大量に生成するための電子・陽電子衝突型加速器（電子・陽電子コライダー）のこと。現在、わが国の高エネルギー加速器研究機構、及び米国スタンフォード加速器研究センターの二ヶ所に存在する。これらは小林・益川理論に基づいて三田等が予言した大きな CP 非保存を精密に測定することを主目的として建設された。
- **CP 非保存**
パリティ変換（ P 変換）と荷電共役変換（ C 変換）を同時に行う CP 変換によって、素粒子のふるまいが違ってしまふこと。物質と反物質の本質的な違いを意味し、宇宙初期におけるバリオジェネシスで重要な役割を持つ。K 中間子と B 中間子の崩壊において発見されている。
- **ILC**
次世代の電子・陽電子の最高エネルギーにおける素粒子実験、国際リニアコライダー（International Linear Collider）計画の略称。衝突エネルギー 500GeV での実験の実現に向けアジア・欧・米の研究者からなる国際共同チームにより加速器・測定器の技術開発および設計作業が進行中。
- **J-PARC**
東海村に建設中の、大強度陽子加速器計画（Japan Proton Accelerator Research Complex）の略称。陽子を大量に加速することにより、大強度の中性子、K 中間子、ニュートリノなどを生成する。物質、生命から原子核、素粒子物理まで幅広い分野の研究に用いられる。
- **LHC**
大型ハドロン衝突型加速器（Large Hadron Collider）の略称。スイス・ジュネーブにある欧州原子核研究機関（CERN）に建設中の、周長 27km の陽子・陽子衝突型加速器。重心エネルギーは 14 兆電子ボルトに達し、世界で最高のエネルギーの衝突実験ができる。2008 年夏に運転が始まり、ヒッグス粒子やダークマター候補の粒子の発見が期待されている。LHC では 4 つの大きな実験が計画されているが、日本はその中の ATLAS 国際共同実験に主に参加している。
- **T2K**
ニュートリノ振動の高精度・高感度測定を目的とする国際共同実験で、スーパーカミオカンデ検出器と J-PARC で生成する大強度ニュートリノビームを使用する。T2K は Tokai-to(2)-Kamioka の略で、実験は 2009 年に開始予定である。
- **大統一理論**
標準模型に含まれる強弱電磁相互作用の 3 つのゲージ相互作用を真に統一する理論。そのエネルギースケールは弱い相互作用のスケールより 14 桁も大きい。物質場であるクォークとレプトンをも統一するが、陽子が有限の寿命を持つことはその一つの帰結である。

- 超弦理論
素粒子として点状のものでなく，1次元的に広がった「弦」に基づく理論。超対称性を持つため「超弦理論」と呼ばれる。点粒子の理論にある発散の問題がなく，重力を含み，自然のあらゆる相互作用を統一する最終理論と目されている。
- 超対称性
アインシュタインの相対性原理の唯一の拡張ともみなすことのできる対称性。超対称性を持つ標準模型においては，あらゆる粒子に対し，スピンの $1/2$ だけ異なる超対称パートナーが存在する。特に，最も軽い超対称粒子は，宇宙暗黒物質の有力候補である。
- バリオジェネシス（宇宙バリオン生成）
宇宙の物質・反物質の非対称性を生成する機構。我々の宇宙における非対称性は，標準模型では説明できず，新しい相互作用の存在を示唆する。
- ヒッグス粒子
標準模型において， W , Z 粒子やクォーク・レプトンの質量の起源となる仮説的な粒子。その相互作用は，従来知られている4力とは異なる性格を持つ未知のものである。LHC 加速器においてはその発見が期待されている。