

天体素粒子物理学の グローバルロードマップに向けて

宇宙の基本的構成要素についての大問題

私たちは、これからなすべき仕事、得られるであろう新しいデータの豊富さ、という観点から非常に面白い時代に生きていると言えます。既に多くの成果が得られました。宇宙の密度と幾何学的構造、年齢、進化のパラメーターは高い精度で知られています。また、目に見える宇宙を形作る物質のもととなる粒子についての理解は、いわゆる素粒子の標準模型として驚くほど進みました。

しかしながら、私たちには宇宙の密度の95%を占める、目に見えない暗黒物質と暗黒エネルギーの正体がまだ分かっていないのです。21世紀初頭の私たちの宇宙に関する知識は、20世紀初頭のガスに関する理解にたとえることができます。私たちは宇宙の全体的なパラメーター、つまりその熱力学あるいは巨視的な物理については知っていますが、その基本的構成要素、つまり微視的物理学についての完全な知識にはまだ欠けているところがあるのです。

さらに、目に見える物質に関する私たちの理論はまだ完全ではありません。私たちは、理論が可能な最小のスケール（最大の相互作用エネルギーと等価）まで整合性のとれたものかどうか知る必要があります。この点、標準模型を拡張した理論が暗黒物質と最小のスケールへの適用という両方の難問にエレガントな解答を提案していることには勇気づけられます。また、理論は異なる種類に見える相互作用の統一を予言し、一連の現象、例えば陽子の有限の寿命あるいはニュートリノの性質、が最小のスケールへ達する手段となることを示

唆します。

天体素粒子物理学の幕開け

天体物理学においては、激変天体現象である星の死や合体を通じて銀河の形成や進化を決定し、最大のスケールに影響を及ぼすメカニズムについて段階的に理解が進んでいます。ここでは天体物理学は、そのメカニズムを理解するため、また星からの新しい情報を検出するために、素粒子物理学の助けを借りる必要があります。新しい種類の観測は光学望遠鏡および電波望遠鏡と相補的であり、天体物理学の対象を探るため、高エネルギーの光子、ニュートリノ、荷電宇宙線、あるいは重力波を用います。

稼働中の検出器から得られた、強い影響力を持つ最近の一連の結果によって、この分野は形を変えつつあります。それらの結果は高エネルギーガンマ線天文台（H.E.S.S, MAGIC, CANGAROO 及び VERITAS、それに間もなく GLASTが加わる）、高エネルギー宇宙線観測所（AUGER）、および地下検出器（スーパーカミオカンデ、カムランド、Borexino）から得られました。

他の観測所で最近完成したもの、あるいは完成間近なものにニュートリノ望遠鏡のICECUBE（南極）と ANTARES（地中海）、重力波アンテナのVIRGOとLIGOがあります。暗黒物質とニュートリノ質量の探索は、数年のうちに感度が大きく飛躍することが期待できる時期にさしかかりました。T2K、DCHOOZ、DAYA-BAYなどのニュートリノ実験プログラムは、次の2010年代初めまでにニュートリノの性質を表す行列

で欠けている部分を完全なものにしましょう。素粒子物理学と宇宙論の最重要プロジェクト（2008年開始のLHCと2009年開始のPLANCK）は全分野に大きなインパクトを与えることでしょう。

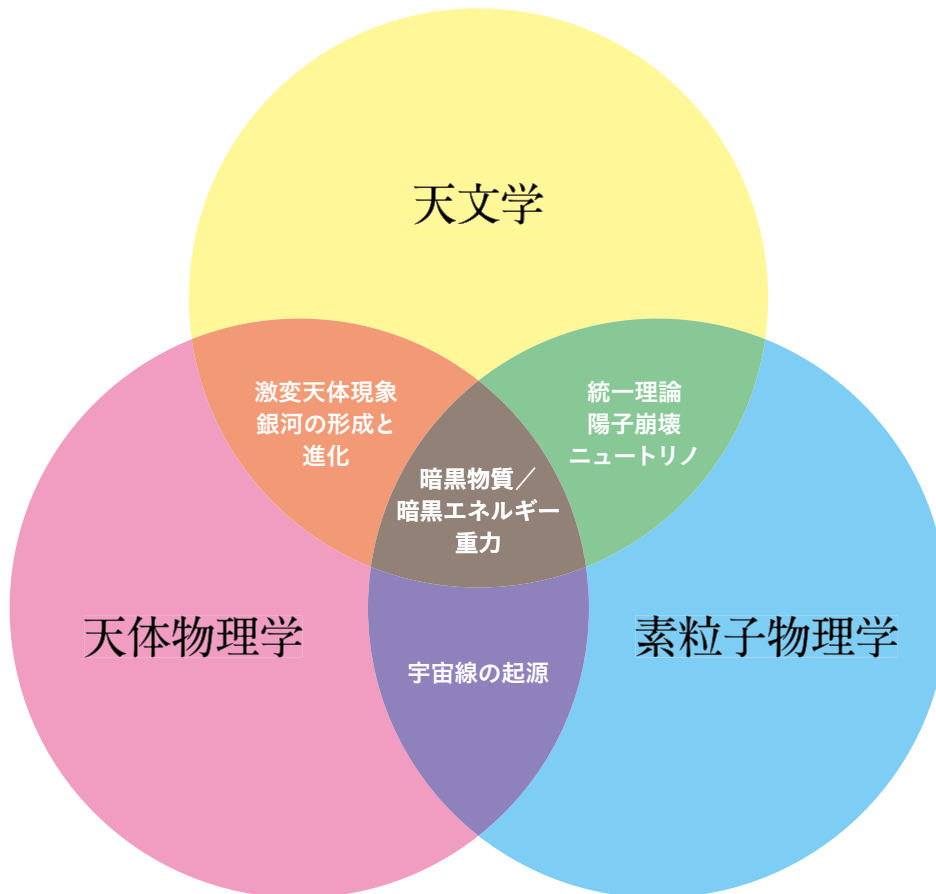
これらのデータを統一的に解析を行うことによってのみ、私たちの科学的世界像を進歩させることができるということは広く理解されているところです。この問題への分野を越えたアプローチは素粒子物理学、天体物理学、及び宇宙論の最前線の学際領域を形成し、それは時には天体素粒子物理学と呼ばれます（図1を参照）。天体素粒子物理学の由来を20世紀初頭の宇宙線の発見にたどることもできますが、多くの人たちはニュートリノによる超新星1987Aの観測（小柴教授が2002

年にノーベル賞を受賞）が新しい「天体素粒子物理学」時代の幕開けと考えています。

欧州の今後の実験計画

私はこれまで、上に述べた研究課題の色々な面に関わって来ました。まず標準模型の（私の感覚では）最も整合性のとれた拡張である超対称性の現象論的並びに実験的研究に対して寄与してきました。特に、私はCERNのLEP実験での超対称性の解析で、ほぼ全体的にその感度を評価するために使用されたモンテカルロ事象発生プログラム¹の著者の一人です。また、私はCERNからグランサッソへの長基線実験用二

図1 3つの学問分野の最前線と重なる天体素粒子物理学の主な研究テーマ



Feature

ニュートリノビームラインの設計、ニュートリノ振動実験OPERA、及び高エネルギーニュートリノ望遠鏡NESTORに大きく寄与してきました。2002年からは、フランス国立科学研究機構(CNRS)の国立原子核・素粒子物理学研究所(IN2P3)で天体素粒子物理学とニュートリノ物理学担当の副所長を務めています。

また、2006年から私はASPERA²の企画調整を行っています。ASPERAとは、欧州の研究機関が加わる組織で、各国の天体素粒子物理学に関する計画を取りまとめることを目的とし、欧州連合(EU)によって予算を措置されています。ASPERAはこれまでに欧州14ヶ国の研究資金援助のメカニズムを比較調査し、一例として次のようなことが分かりました。欧州ではこの分野で2,300人の研究者が活動し、毎年約7,000万ユーロが資本的支出として費やされ、(人件費を加えた)全支出では1.86億ユーロ/年となります。面白いことに、ざっと試算してみたところ、米国も同程度であることが分かりました。また、ASPERAはこれらの計画に参加国が協調して資金援助するメカニズムについても調査しています。しかし、主な仕事は将来の地上あるいは地下の天体素粒子物理学研究施設について、10年間のアクションプランを描くことなのです。これら研究施設について間もなく報告書が出版されますが、以下、簡単に紹介することにします。



図2 2007年9月にアムステルダムで行われたASPERAワークショップでのラウンドテーブルディスカッション。グローバルな協力の調整法について。左から J. Dehmer (NSF/US), A. Coates (STFC/UK), R. Staffin (DOE/US), T. Berghoef (BMBF/Germany), R. Blandford, C. Spiering, J. Zinn-Zustin (CEA/France), S. Katsanevas (立って司会), J. Ellis (CERN)

高エネルギーの観測所の分野では、優先度の高い計画は高エネルギーガンマ線のチェレンコフ望遠鏡アレ(CTA)と高エネルギーニュートリノ望遠鏡のCubic Kilometre Network (KM3NET)です。これらは現在の測定器の感度を約10倍に拡張するもので、2012年には建設を開始することも可能と思われます。また、欧州の物理学者は、AUGERより大きい観測施設が、できれば北半球で国際的な背景のもとで実施されることを熱望しています。

地下観測所の分野では、今から2年以内にはっきりさせるべき描像があります。特に暗黒物質の探索では、1トン級あるいはそれ以上で低バックグラウンド、かつ暗黒物質に対して 10^{-10} pbの感度に到達可能な測定器1台あるいは相補的なもの2台を稼働させる必要があります。現在、段階的に進展が図られていますが、2010年から2011年頃に異なる測定技術の間の優先順位付けが行われます。ニュートリノ質量に関しては、1トン級で逆階層の場合の有効質量領域を探索可能な2重ベータ崩壊実験を、1つあるいは2つ建設し稼働させることを目指します。2013年頃に建設についての決定を下すことができるものと思われます。

また、陽子崩壊、ニュートリノの性質、および低エネルギーニュートリノ天体物理学の研究のために100万トン級の測定装置を建設する必要があります。この測定装置は長基線実験で加速器からのニュートリノを検出するための理想的な標的ともなるでしょう。カミオカンデ及びスーパーカミオカンデにより水チェレンコフの技術は十分に確立していますが、そのほかに液体アルゴンと液体シンチレーターの技術の開発が進められています。欧州の科学者は、欧州連合の資金援助による設計調査LAGUNAのもとで協力して研究を進めながら、3つの技術全部を追求しています。どの技術を採用するか、どこに立地するか、また世界中でどのように経費を分担するかによりますが、2010年代の半ばまでには建設を開始できるものと思われます。

重力波天文台の分野では、短期的には現在の世代の重力波検出器、なかでも“advanced VIRGO”の改良



図3 ヨーロッパの地下研究施設の分布。大きなもの、小さなもの、あるいは将来の努力目標を含む。

が優先されますが、長期的には巨大な地下重力波検出器、アインシュタイン望遠鏡が最優先とされます。その建設は、現在の重力波検出の世界的ネットワークがおそらく2016年から17年頃に最初の発見をした後になるものと思われる。

上述の観測装置に対する次の10年間の投資額は、研究開発費、現在実施中の実験の維持費、及び小型のプロジェクト経費25%を含めて約10億ユーロと見込まれます。これは欧州で現在利用可能な研究資金からの予測の50%増しとなります。

全世界の協力を呼びかける

忘れてならないことは、欧州がロードマップを描く唯一の大陸ではないことです。同様の努力は米国とアジアにも存在します。これらは全て将来の基盤施設という目標に向けて収束するのです。科学と予算の問題は全世界的な調整を必要とします。重力波天文台の例に倣えば、全世界的な組織を形成することも期待できるのではないかと思います。あるいは、これらの測

定器の多く（特に地下実験室に設置されるもの）は単独で機能するモジュールなので、これらのモジュールが異なる大陸に建設・設置され、しかし全体的には1つの組織として機能することが考えられると思います。これらは「中規模」の計画であり、異なる大陸に公平に分布させることは交渉可能です。その際、それぞれの国の優れた分野は尊重されるべきです。例えば、全世界的な100万トン級測定器の計画で日本が主役を努めないということは想像できません。

この調整に向けての準備段階としてASPERAはこの9月にブリュッセルで国際会議を主催します。ここで上に述べたような機会について議論がなされ、日本の状況についてはIPMUの機構長が報告します。この議論はOECDのグローバル・サイエンス・フォーラムの枠組みの中で継続されます。それは全世界の協力という野心的な夢ですが、成功すれば得られるものは大きく、確実に努力する価値があると私は固く信じています。

文献：

¹SUSYGEN 2.2: A Monte Carlo event generator for MSSM sparticle production. S. Katsanevas, P. Morawitz, Comput. Phys. Commun. 112: 227-269, 1998

²For more details see www.aspera-eu.org