

ワークショップ：ダークマターの天体物理学

アレクサンダー・クセンコ Alexander Kusenko

UCLA 物理学・天体物理学教授、Kavli IPMU 客員上級科学研究員

2015年10月13日から16日まで行われたKavli IPMUフォーカスウィークワークショップ「ダークマターの天体物理学」には、素粒子物理学者と天体物理学者が集まり、宇宙の最も興味深いミステリーの一つ、ダークマターのミステリーについて議論しました。

宇宙の物質はほとんどダークマターです。ダークマターは通常の原子から作られたものではなく、新しい未発見の素粒子から作られています。ダークマターの存在は、その重力によって分かります。ダークマターの質量は、幾つかの方法によって測定可能です。第1に、重力レンズ効果は重い物質によって光が曲げられることに基づくもので、ダークマターで形成された「レンズ」の質量の測定に使えます。第2に、X線観測から推定される銀河団の中のガスの温度は、そのガスを含むポテンシャル井戸の深さを決めるために使えます。第3に、ビッグバンからの残留放射である宇宙マイクロ背景放射の温度ゆらぎのスペクトルは、重力を及ぼす全物質と、ダークマターとは異なり光の圧力を感じる通常の物質との比を測定するために使えます。最後に、銀河団の中の銀河の速度と銀河の中の星の速度を測定すると、銀河団や銀河の中に存在する質量による引力を知ることができます。これら全ての独立な測定は、ダークマターの質量が通常の物質の5倍以上であるという同じ結果を与えます。

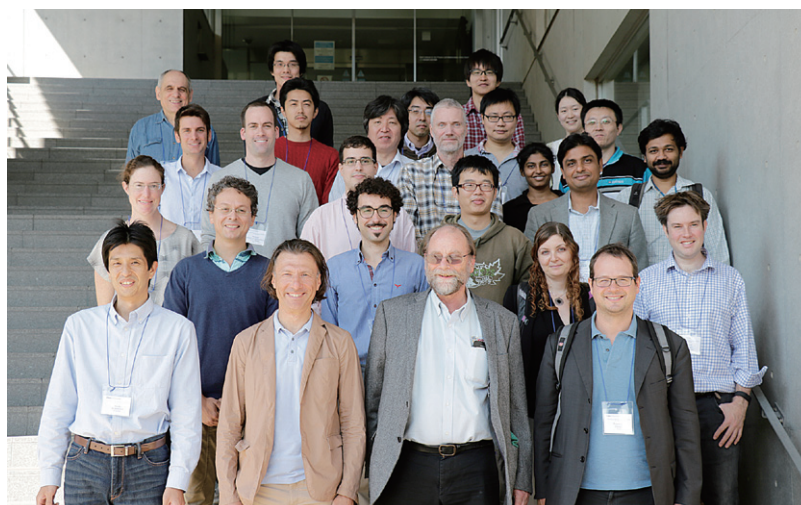
しかし、ダークマターの組成はミステリーのままです。これまでに発見された素粒子には、ダークマターの構

成要素になれるものは無いということを示すことができます。従って、ダークマターの正体が分かれば、それは少なくとも1種類の新粒子の発見を意味し、素粒子とその相互作用の標準模型を超える新たな方向にサイエンスを導くでしょう。

ダークマターのミステリーを解決するには、ダークマターがもつかもしれない非重力的な相互作用を理解する必要があります。なぜなら、このような相互作用によって、ダークマターの素粒子を識別することができるかもしれないからです。天体物理学では幾つかの方法でダークマターの性質を探ることができます。

ダークマターは、銀河や銀河団等のような、現在私たちが宇宙に見る構造の形成を主導する役割を務めました。宇宙で可能な最も小さな構造は、ダークマターが冷たいか暖かいかが、つまり、構造形成が始まったときにダークマターの素粒子がどれだけの速度で動いていたか、に依存します。また、ダークマター・ハローの密度分布はダークマター素粒子相互の自己相互作用の影響を受ける可能性があります。矮小楕円体銀河の観測と、銀河および銀河団のダークマターの分布の決定は、ダークマター素粒子の性質を解明する可能性があります。

最近の幾つかの進展により、このワークショップはタイムリーで興味深いものとなりました。報告された3.5 keVの単色X線の起源がダークマターの崩壊である可能性を、銀河スケール以下の構造形成に関する幾つかの異常と組み合わせた議論が特に注目を集めました。最近のダークマターとバリオンとのN体シミュレーションでのブレークスルーは、特に冷たいダークマターと暖かいダークマターの両方についての記述を改善するものですが、小スケールの構造をダークマターの性質と関係付けるツールとしてより良いものとなるのが期待されています。自己相互作用をもつダークマターを含む素粒子物理の模型の急増は、ダークマター素粒子の微視的な性質が、ハローの形と3軸不等性から密度分布、銀河団の衝突、あるいは超重ブラックホールの形成まで、天体物理学的にどのような形で現れるかという問題との関連で新たな問題を提起しています。N体シミュレーションは、ダークマターとバリオン物質の理解に関して、新たな段階に到達しています。重力レンズを用いた観測技術は成熟しています。こういった進展全てによって、天体物理学者と素粒子物理学者が集まり、充実した議論を行ったこのワークショップがタイムリーなものとなりました。



TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015

川崎雅裕 かわさき・まさひろ
Kavli IPMU 主任研究員

松本重貴 まつもと・しげき
Kavli IPMU 准教授

2015年10月26日から30日にかけて柏の葉カンファレンスセンターで開催された国際会議“TeV Particle Astrophysics (TeVPA) 2015”は大成功を収めたと言えます。この会議は東京大学の二つの研究機関、カブリ数物連携宇宙研究機構と宇宙線研究所の運営で行われ、テラスケールの高エネルギー素粒子天体物理学の現在までの進展と将来への展望を主眼に据えたものでしたが、以下の二つの理由によりその開催が特に渴望されるものもありました。一つ目は最近のガンマ線観測（HESS実験等）、宇宙起源の高エネルギーニュートリノ観測（IceCube実験等）、そして高精度の宇宙線観測（AMS-02実験等）により、宇宙線の起源解明に向け大きな進展があったことです。二つ目はテラスケールの高エネルギー素粒子天体物理学が暗黒物質の探査（特にその質量が電弱スケールより高く、加速器実験では探査が難しい場合）に非常に重要となりつつあることです。

これらのトピックは15の招待講演と4つパラレル・セッション（暗黒物

質、ニュートリノ、宇宙線、ガンマ線の4つのセッション）で深く言及されました。高エネルギーニュートリノに関するトピックでは、データが蓄積されてきたこともあり、その起源について活発な議論が行われ、同時に将来のニュートリノ実験の展望についても意見が交わされました。宇宙線に関するトピックでは、最新の高精度観測が明らかにしたエネルギースペクトル、化学組成、そして到来方向の非対称性が聴衆の大きな注目を集めました。ガンマ線天文学は、現在までチェレンコフ望遠鏡の発展と共に進展してきましたが、将来においては宇宙線の加速機構やその起源天体の解明に大きな寄与をすると期待されています。このため、会議ではこれらについて多くの側面から言及され、内容の濃い議論が行われました。

一方、暗黒物質に関わる講演では、その殆ど全て（招待講演及び依頼講演）が高エネルギー素粒子天体物理学と暗黒物質の間接検出の関わりについて議論するものでした。現在素粒子天体物理学及び関連する天文学が大きく進展

しており、近い将来には我々の銀河や近傍銀河での暗黒物質分布等の詳細情報が得られると期待されています。そのため、これらの発展が暗黒物質探査に与える影響について、多くの参加者が強い興味をもっていました。会議では当然これらのトピックについて包括的かつ詳細に言及され、同時に活発な議論も行われました。その結果、参加者の多くはこの分野の現状と展望を深く理解することができ、また将来における研究の指針をも得るに至りました。

この会議はもともと規模がそれ程大きくならないことが想定されていましたが、蓋を開けてみると参加者数は当初の予定を大幅に超える事態となり、200人近くにも上りました！この事実は、この本会議のトピックが現状において多くの素粒子物理学、宇宙論、そして天文学の研究者から最重要課題の一つであると認識されている証左であり、近い将来に再度カブリ数物連携宇宙研究機構を含む柏地区で同様の会議を開催することが重要となります。



PFS-SSP Galaxy Survey Workshop 2015

矢部清人 やべ・きよと
Kavli IPMU 博士研究員

宇宙にある多様な銀河はどのようにしてできたのでしょうか？その答えを探る方法のひとつが、遠くの銀河を観測し形成途中の銀河の姿を統計的に明らかにすることです。銀河の性質を詳細に調べる方法の一つに分光観測がありますが、遠くの銀河は一般的に暗くなるため観測が難しくなります。従って、より口径の大きい望遠鏡を用いた観測が必要となります。また、暗い銀河の効率的な調査のためには、一度にできるだけ多くの銀河を分光観測することが求められます。

Kavli IPMU が推進するすばる望遠鏡主焦点多天体分光装置 Prime Focus Spectrograph (PFS)は、視野1.3度の中に2400本のファイバーをもち、可視から近赤外にかけて同時に多天体分光観測できる装置です。現在、我々はこの装置を用いた大規模な銀河サーベイの準備を行なっています。今回、2015年11月13日にKavli IPMUで日本にいる多くの銀河研究者およそ40名が一同に会し、具体的なサイエンスの

例や観測計画などを議論しました。

PFSでは、銀河の活動が最も活発であった赤方偏移2付近(宇宙年齢約30億年)の銀河の性質をこれまでにない統計量で明らかにすることを目的の一つとしていますが、観測可能な波長範囲が広いと、様々な赤方偏移の銀河をターゲットとすることが可能です。本研究会では、主に赤方偏移1付近(宇宙年齢約60億年)から赤方偏移7付近(宇宙年齢8億年)における様々な銀河や活動銀河核(AGN)などのターゲットについて、PFSを用いてどのようなことを明らかにできるか、またそのためにはどのような戦略で観測を行うべきかの議論が行なわれました。また、銀河形成進化理論の立場から観測に期待する点なども挙げて頂き、PFSがこの分野で果たす役割の重要性を再確認しました。

本研究会において、日本における銀河研究者のPFSに対する期待の大きさが明らかになりました。PFSは国際協力をベースとした研究計画ですが、日

本のコミュニティが主導して観測を行っていくことが期待されています。今回の研究会を通して、具体的なサイエンステーマが明らかになっただけでなく、個々のテーマをリードする研究者も決まりました。

今後、PFSコラボレーションの研究者が集まり、全体会議で様々な議論を行ないます。本研究会での議論の結果も、この全体会議において報告され、全体のサーベイ計画との整合性が議論されていきます。PFSは2019年後半から実際の観測が始まります。今後もこのような研究会を定期的に行ない、具体的な観測計画へのフィードバックをかけることで、PFSによる銀河サーベイが世界に類を見ない研究成果を出せるサーベイとなるようにしていく予定です。

ワークショップの運営にご尽力いただいたKavli IPMUのスタッフおよびマイク係を引き受けてくださった東京大学の大学院生の方々に感謝致します。



代数幾何学における圏論的及び解析的不変量1, 2

アレクセイ・ボンダル Alexey Bondal

Kavli IPMU 主任研究員

2015年に日露2国間交流事業共同研究「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量」が開始されました。日露2国間交流事業は日本学術振興会およびロシア基礎科学財団 (RFBR) から資金援助を受け、本共同研究は斎藤恭司とアレクセイ・ボンダルが代表者を務めます。

この共同研究は、代数幾何学と解析幾何学、ホモロジー代数、および超弦理論分野で活発に研究を行っている日本人およびロシア人の中から優れた専門家を結集し、複素多様体の構造やそのミラー対称性に対して意味をもつ関連した諸々の不変量—導来圏、半無限ホッジ構造、トポロジー相関関数、量子モチーフ等—についての洞察を得ることを目的とします。

この共同研究の後援による最初の研究集会「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量1」は2015年9月14日から18日までモスクワのステクロフ研究所で開催され、Kavli IPMUのメンバー数人と東京大学大学院数理科学研究科、京都大学、大阪大学、首都大学東京、モスクワのステクロフ研究所、ロシア国立研究大学高等経済学院から数学者が出席しました。

次に、2015年11月16日から20日まで、研究集会「代数幾何学における圏論的及び解析的不変量2」がKavli IPMUで開催され、ロシアと日本だけでなく他の幾つかの国々からもこの共同研究の課題の専門家を惹きつけ、前回より多くの参加者を数えました。

数学的な考え方では、ミラー対称性は複素世界とシンプレクティック世

界の神秘的な双対性として理解され、そこでは、弦の境界条件であるブレーンは純粋に接続層の複体、あるいはラグランジアン部分多様体のいずれかと解釈されます。この理由により、この共同研究にはシンプレクティックと複素という2つの側面があり、研究集会での講演の多くはミラー対称性の一方の側面の研究か2つの側面の比較に焦点を合わせるものでした。

この事業の研究課題が物理学で発見されたミラー対称性に端を発するものであることから、研究集会でも物理学者が重要な役割を果たしました。Kavli IPMUで超弦理論を研究している堀健太郎が最初の講演を行い、ゲージ化線形シグマ模型の観点から説明しました。

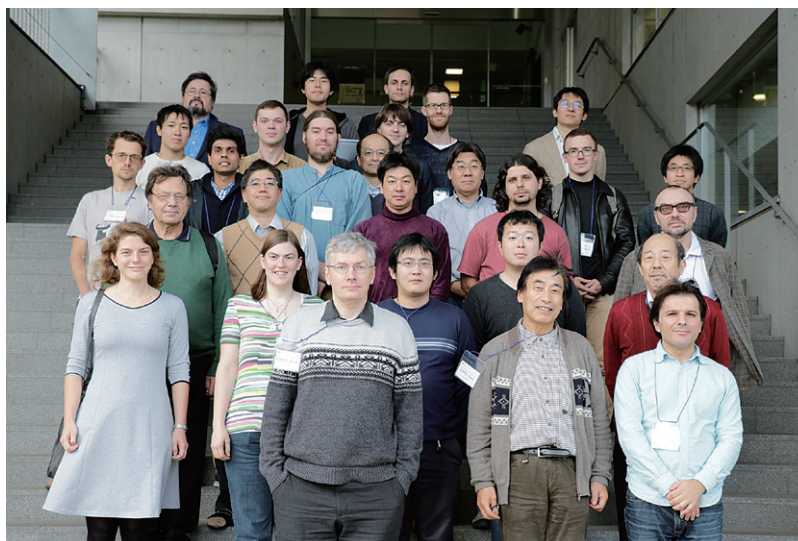
ミハイル・カブラノフは、偏屈層と呼ばれる特殊な位相的構成可能な層の複体を圏化することによってラグランジアン・サイクルの深谷圏の解釈を与えました。彼は、この新しい理論の広大な圏論的、位相幾何学的眺望を解説するとともに、ワルドハウゼンの構成法により有限個の点 (puncture) を除いたリーマン面の場合について具体的に適用してみせました。

有名なロシア人物理学者のアレク

サンダー・ペラビンは、2次元ミニマル Liouville 重力理論における相関関数の計算という物理学の問題に対する、関数の特異点に関連した斎藤恭司のフロベニウス構造の応用について報告しました。彼の提案した予想では、原始形式の選択は極めて重要です。

研究集会での入谷寛によるトーリックスタックのミラー対称性に関する講演は、ミラー対称性の両方の側面の背後に潜む本質を探ろうというもう一つの試みでした。ミラー対称変換の下でのトーリックスタックの解析的不変量と圏論的不変量の振る舞いに矛盾がないことが細心の注意を払って調べられました。

研究集会での他の講演は、全てミラー対称性の一方の側面、すなわち複素代数幾何学あるいはシンプレクティック幾何学に関する圏論的あるいは解析的不変量の最新かつ最先端の研究に焦点を絞ったものでした。優れた専門的知識をもった研究者が参加したため、報告された研究は通常2カ国の範囲で期待されるレベルをはるかに超えるもので、本当に世界的なレベルでした。この研究集会が著名な外国人研究者数名の注意を惹きつけたのは、この理由によるものでした。



B Mode from Space

菅井 肇 すがい はじめ

Kavli IPMU 准教授

2015年12月10日(木)～16日(水)の1週間、Kavli IPMU大講義室で行われたB Mode from Spaceワークショップに130人が集結しました(<http://indico.ipmu.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=72>)。研究者達の狙いは、ビッグバン以前の宇宙の姿、つまり宇宙の始まり直後の指数関数的膨張時代(インフレーション期)の存在を検証することです。このために、インフレーション仮説により発生する原始重力波の痕跡として宇宙背景放射(CMB)に現れる偏光の空間的パターン(Bモード)を測定します。CMBはミリ波帯域にスペクトルのピークをもちますが、CMB以外の成分、つまり銀河系内からのシンクロトロン放射やダスト放射等の前景放射をスペクトル形状から成分分離することがポイントです。

ワークショップでは、CMB偏光観測による原始重力波検出以外のサイエンス、例えば宇宙再電離時代の理解やニュートリノ質量への制限という観点も議論されましたが、前景放射除去に

ついて丸一日かけて議論されました。除去方法そのものについての講演はもちろん、ダスト放射機構についての講演もお願いし、理解を深めました。

CMB偏光についての経験と将来計画という観点から、SPT, ACT, POLARBEAR/Simons Array, ABS, QUIJOTE, CMB-S4等といった地上観測、短期間測定ではあるが大気吸収・放射に比較的強い気球観測(EBEX, PIPER等)、さらには大気から完全にフリーで長期間測定を行う衛星観測(Planck, LiteBIRD, PIXIE等)が当事者達によって報告・議論されました。COBE, WMAPに続くCMB観測衛星Planckの責任者Jan Tauberが懇親会挨拶で発言したように、CMBの偏光観測に向けた大きな国際的なうねりが表出したワークショップでした。

後半には、衛星用のコンパクトな光学系、半波長板を用いた偏光変調系、断熱消磁冷凍機を含む100 mKに至る冷却系、TES/MKID超伝導検出器及び読出系等それぞれの技術に焦点を当

てた進展報告・議論が行われました。Kavli IPMUはLiteBIRD(Lite(Light) satellite for the studies of B-mode polarization and Inflation from cosmic background Radiation Detection)衛星計画にコアメンバとして参加しており、私は光学系設計について発表しました。35 GHzから450 GHzの観測帯域にて全天・大角度における直線偏光測定を3年間行う計画です。

参加者内訳は、CMB観測の分野をリードしている日本、アメリカ合衆国、欧州からそれぞれ4割、3割、3割というバランスがとれたものでした。当日の運営等は小濱さん、その他Kavli IPMUの事務スタッフや日本の学生達の協力に支えられました。組織委員は、片山伸彦(Kavli IPMU)が中心となり、長谷川雅也(KEK)、羽澄昌史(Kavli IPMU/KEK)、石野宏和(岡山大)、松村知岳(JAXA)、関本裕太郎(NAOJ)および菅井が努めました。

