

暗黒宇宙の解明に銀河を利用する

1. 暗黒宇宙

人類は太古の昔から華麗な夜空に魅了されてきました。そして人類の好奇心は、宇宙の起源や運命といった、根源的な疑問の探求に私たちを駆り立ててきたのです。天体物理学的な観測は、この探求の最前線、しかもその中心に位置しています。これまでに、そういった観測が、私たちを待ち受けている宇宙の暗黒の謎を幾つも解き明かし続けてきました。

これまでの多くの天体物理学的な発見の中で、ダークマターとダークエネルギーの存在は最も難解な問題となっています。ダークエネルギーは普遍的かつ一様に存在するエネルギーで、真空中に固有のものとされています。一方、ダークマターは、電磁的な相互作用をもたず動きの遅い物質粒子とされています。この2つの成分が宇宙のエネルギー密度のほぼ95%を占めており、私たちがこれまで実験室での実験（例えば大型ハドロンコライダー LHC のような加速器による実験）によって探求し理解してきた通常の物質のエネルギー密度を凌駕しています。

ダークマターとダークエネルギーの正体は何か？ その性質は？ 通常の物質との関係は？ それらは本当に存在するのだろうか？ それとも宇宙論的なスケールで重力の理論が不完全であることによるものなのだろうか？ こういった疑問は素粒子物理学と宇宙論の接点に存在し、現在進行中の研究の中心となっています。Kavli IPMU はこれらの問題に挑戦するため、天体物理

学的な観測と実験室での実験による多角的な取り組みを行っています。それは、自然の謎の成分であるダークマターとダークエネルギーの理論的な理解を得るために資するものとなるでしょう。

2. 初期宇宙と銀河の誕生

様々な観測結果を統一的に説明する最も簡単な宇宙論モデルでは、初期宇宙は非常に高温・高密度で始まり、量子場の微かな揺らぎが宇宙論的に巨大なスケールに急激に引き延ばされたインフレーションという時期が起きます。これらの揺らぎはダークマター粒子の密度場に痕跡を残します。そして、重力の作用によりダークマターの揺らぎが成長して宇宙の構造を形成します。

計算機によるシミュレーションの助けを借りて、これらの揺らぎの成長を調べることができます。この話題は、以前 *Kavli IPMU News* で取り上げられました（2014年9月号の吉田直紀による解説を参照のこと）。最も大きなスケールでのダークマターの統計的な分布は、宇宙の物質質量、初期密度揺らぎの振幅、といった幾つかの重要な宇宙論パラメータに支配されます。これらの揺らぎの成長を時間の関数として描き出すことは、ダークマターとダークエネルギーの時間的な振る舞いを理解するために重要です。しかし、ダークマターは光を出さないため、検出困難です。幸いなことに、銀河は大量の光を放射するので、非常に遠方の銀河ま

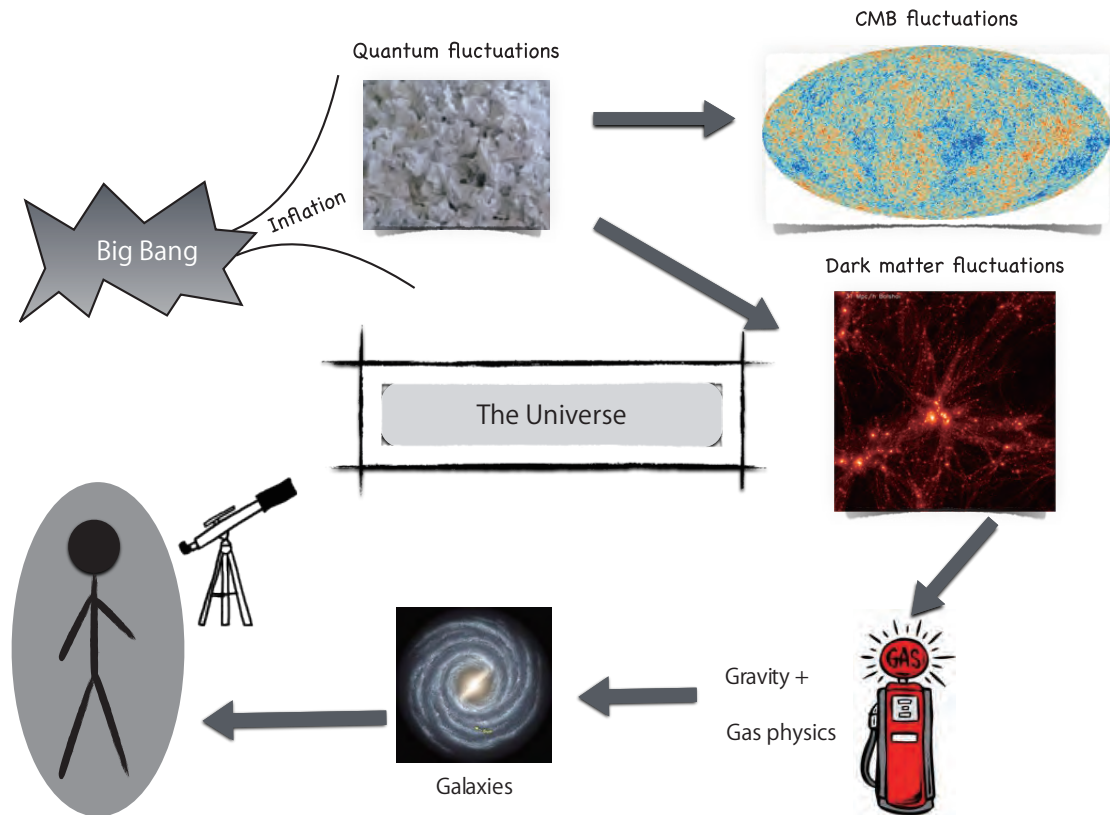


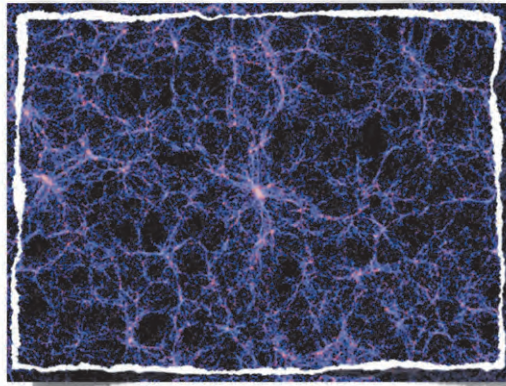
図1. 宇宙のインフレーションは、微小な初期揺らぎが仕込まれた、ほとんど一律な宇宙を作り出しました。これらの微小な揺らぎは物質の分布に痕跡を残しました。宇宙マイクロ波背景放射を調べることで、ビッグバンから38万年後の揺らぎのスナップショットを観測できます（2010年6月発行の*IPMU News No. 10*に掲載されたデービッド・スパーゲルの解説を参照）。ダークマターの揺らぎは宇宙規模の網目状の構造に成長し、宇宙の構造の骨格を形成しました。その後、複雑な天体物理学的な過程を経て銀河が形成され、進化してきました。銀河には知的生命が誕生し、宇宙を観測し、その歴史を解明するということが起こります。

で検出が可能です。では、これらの銀河は、ダークマターとどのような関係にあるのでしょうか。

ダークマターの粒子は凝集して、ダークマター・ハローと呼ばれる重力的に束縛された塊を形成します。こういった塊は形も大きさも様々で、小さな塊は数多くありますが、大きな塊は比較的希な存在です。主として原始ガス雲として存在するバリオンは、これらのダークマター・ハローの重力ポテンシャルの中心に向けて引き寄せられます。ダークマターが豊富に存在する場所には、より多くのバリオンが引き寄せられます。バリオンは、一連の複雑な天体物理学的プロセス（放射冷却、星形成と超新星爆発によるフィードバックな

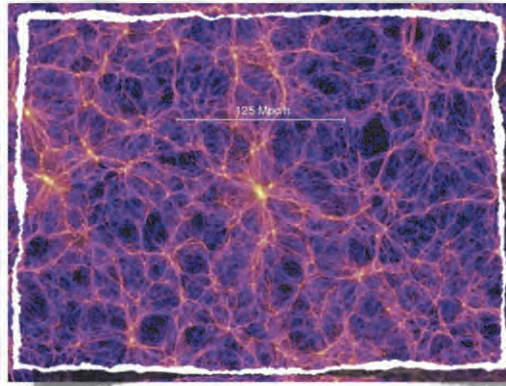
ど）を経て、やがて私たちの天の川銀河のような銀河を形成します。

最も大きなスケールでは、重力だけによるので、銀河の分布はダークマターの分布をトレースしたようなものになることが期待されます。どこであろうとダークマターが多い場所では、より明るい銀河がより多く形成されると期待されます。従って、銀河を使ってダークマターの分布の構造とその時間的成長を探ることができ、それにより私たちのダークマターとダークエネルギーの正体についての理解を進歩させることができます。



Millennium simulation, Springel et al. 2005

Galaxies



Dark Matter

図2. 標準的宇宙モデルで期待される現在の銀河の分布（左図）とそれに対応するダークマターの分布（右図）。ダークマターの分布は大規模な計算機シミュレーションによって得られたものです。ダークマターの構造の内部での銀河の分布を予測するには、銀河の形成と進化の物理について半解析的な取り扱いが適用されました。大規模なスケールでは銀河の分布はダークマターの分布をトレースしています。異なる宇宙年齢の時代で銀河を観測すると、ダークマターの構造の成長率の研究に用いることができます。構造の成長を測定すると、ダークマターとダークエネルギーの正体を理解する上で役立ちます。

3. ダークマター・ハローのクラスタリング

銀河はダークマター・ハローの中にあるため、ハローがダークマターの分布とどのように関係しているかを理解することが重要です。ダークマター・ハローは、密度場の分布のピークで形成され、そして最も大質量のハローは、稀にある密度場の非常に高いピークで形成されます。このような大質量のハローの分布は、低質量のハローと比べると非常に密集しており、この振る舞いは、定性的に地球上で見られる最も高い山のピークに似ています。つまり、山のピークが別のピークのすぐ近くにある可能性が非常に高いのです。（山頂の高さ 7200 m 以上の山は全てヒマラヤ山脈地帯に存在しています。）従って、密度場のピークを調べるだけではダークマターの分布について、偏った見解が得られてしまいます。幸いなことに、ダークマター・ハローの分布について、予測することと、ハローの質量に対する依存性を定量化することも可能です。ハローの質量に対するクラスタリング振幅の正確な依存性は、感度の良い宇宙論のプロープでもあります（図3参照）。観測ではハローの代わりに銀河を用いてクラスタリング振幅を測定することができます。さらにこれらの銀河のハローの質量を観測することにより、宇

宙論的な制限が得られます。

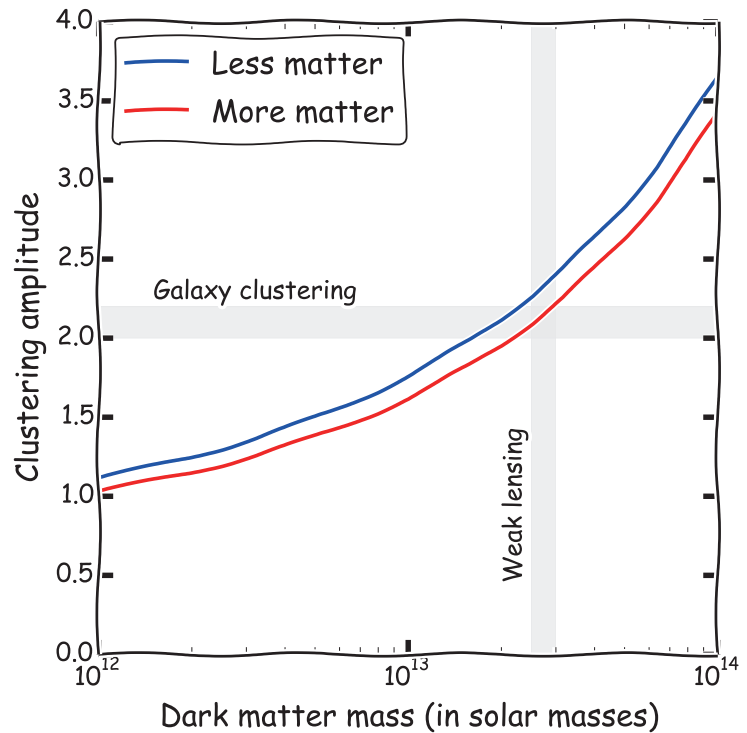
4. 銀河の観測量

4.1 銀河のクラスタリング

世界中の天文学者が大スケールでの銀河の分布をマッピングするため、大規模銀河探査を行っています。スローン・デジタル・スカイサーベイ (SDSS) はその主要な例の一つであり、最近その第3段階 (SDSS-III) が完結したところで、イメージングデータから銀河の天球面上の正確な位置が、また銀河のスペクトル線の長波長側 (スペクトルの赤に近い側) へのずれ (赤方偏移) を用いて、その視線方向の正確な位置が得られています。この結果、宇宙空間における銀河の3次元マップが作られました。

このデータを用いて、2点相関関数という最も簡単な空間統計の一つにより銀河のクラスタリングを定量化することができます。相関関数は、与えられた距離にある2つの銀河を見出す確率が、銀河がランダムに分布しているとした場合よりどれくらい多いかを定量化するものです。もし銀河が強く群れ集まっているとすれば、互いの距離が比較的近い銀河のペアが数多く見られます。私たちはSDSS-III サーベイから非常に高

図3. 質量の異なるダークマター・ハローのクラスタリング振幅は宇宙の物質密度などの宇宙論パラメータに依存します。同じ質量のダークマター・ハローに対して、宇宙の物質が多い場合はクラスタリング振幅は小さくなります。銀河はダークマター・ハローの内部に存在します。銀河のクラスタリングを測定することにより、ダークマター・ハローのクラスタリングを測定できません。これらの銀河の周りで弱い重力レンズ効果を測定すれば、銀河を包むハローの質量を測ることができます。このような観測を両方行うことにより、図4に示すような宇宙論パラメータに対する制約条件を得ることができます。(本図は次の論文中の図から翻案したものです。S. More et al., "The Weak Lensing Signal and the Clustering of BOSS Galaxies II: Astrophysical and Cosmological Constraints," arXiv:1407.1856; *Astrophysical Journal* に出版予定。)



い信頼度で銀河のクラスタリングの信号を観測しました。この結果から、これらの銀河が属しているハローのクラスタリング振幅が得られます。しかし、ハローの質量を決めるにはどうすればよいのでしょうか。

4.2 重力レンズ

私たちが日常見る光は常に直進します。しかし、光が非常に重い物体の近くを通過する際、その進路は著しく曲げられるであろう、ということはアインシュタインの偉大な洞察でした。重力レンズと呼ばれるこの現象は、天体物理学にとって極めて有用な手段であることが分かりました。単に光の曲がり具合を定量化することにより、ダークマターの検出、測定に用いることができるのです。強い重力レンズ効果と呼ばれる場合には、宇宙における美しい蜃気楼を発生させ、例えば銀河が薄く引き延ばされた円弧のように見えたり、時には一つの銀河（あるいは超新星のような天体）の像が何個も見えたりさえします。

弱い重力レンズ効果と呼ばれる場合には、球状の天体が、途中に介在する質量によりレンズ効果を受けて楕円形に見えます。この楕円の短径は、天体と介在する質量を結ぶ方向を向いています。楕円率の信号を測定することにより、銀河の周りのダークマターの分布を、従ってダークマター・ハローの質量を測定することができます。

銀河の周りでこのような測定を行うには、背景にある複数の銀河を見つけてそれらの形を測ることが必要です。背景の銀河は遠くにあるため非常に暗いので、これは非常に難しい仕事です。

私たちは、SDSS-III で観測された銀河の周りで、カナダ・フランス・ハワイ望遠鏡レガシーサーベイ*によって得られた深宇宙撮像データを用いてこのような測定を行いました。そして、この結果を SDSS-III カタログにある銀河を取り巻くダークマターの分布、特にダークマター・ハローの質量を理解するために使うことができました。

* www.cfht.hawaii.edu/Science/CFHTLS/

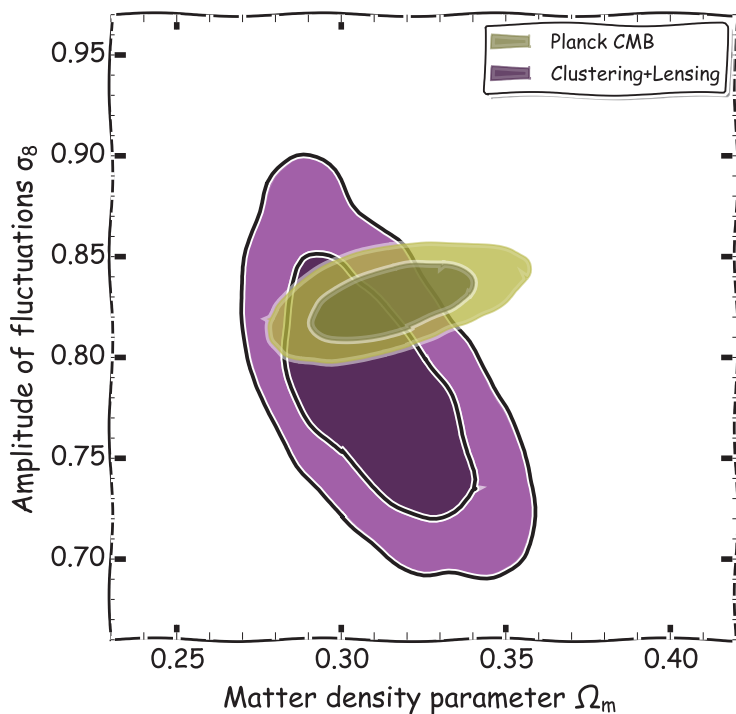


図4. 私たちはSDSS-IIIのバリオン音響振動サーベイ (BOSS) により銀河のクラスタリング振幅を測定しました。(H. Miyatake et al., "The Weak Lensing and Clustering of BOSS Galaxies I: Measurements," arXiv:1311.1480; *Astrophysical Journal* に出版予定。) これらの銀河を包むハローの質量は、弱い重力レンズ効果を用いて測定されました。以上の測定により、現在の宇宙の物質密度パラメータと密度揺らぎの振幅に対して宇宙論的な制約条件が得られました。マゼンタ (赤紫色) の等高線は68%信頼域 (内側の等高線の内部) と90%信頼域 (外側の等高線の内部) を示しています。私たちの結果をプランク衛星を用いた非常に初期の宇宙のCMB観測を解析して得られた結果 (黄色の等高線) と比較すると、2つの結果 (前者は最近の宇宙の非線形重力物理に基づき、後者は非常に若い時代の宇宙の物理に基づく) には顕著な整合性と相補性が見られます。(本図は次の論文中の図から翻案したものです。S. More et al., "The Weak Lensing Signal and the Clustering of BOSS Galaxies II: Astrophysical and Cosmological Constraints," arXiv:1407.1856; *Astrophysical Journal* に出版予定。)

5. 首尾一貫した宇宙像

現在の宇宙論モデルを、様々な観測量を用いて検証することは重要です。それはモデルの信頼性を立証するだけでなく、現在の記述が、根底にある事実を必ずしも忠実に反映してはいないかもしれないにせよ、十分に妥当な近似であることを意味します。現在の宇宙論モデルを支持する主な観測には、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測、および Ia 型超新星 (SN_{Ia}) とバリオン音響振動 (BAO) の観測から得られた距離と赤方偏位の関係などがあります。

銀河のクラスタリング振幅とダークマター・ハローの質量を用いて、宇宙の物質密度の大きさや宇宙初期の密度ゆらぎの振幅のような宇宙論パラメータに対する制約条件を推定することもできます。これらの制約条件は首尾一貫した宇宙像を与え、また多くの場合 CMB、BAO、SN_{Ia} の観測と相補的な性質を有しています。

6. 未来はここに!

ハワイのマウナ・ケアのすばる望遠鏡に搭載されたハイパーシュプリーム・カムはエンジニアリングにおける驚異です。広い視野を有しており、天体望遠鏡に搭載される世界最大のカメラです。この装置を用いる大規模サーベイが昨年 (2014年) 3月に開始されました。このサーベイは、前例のない深さで天球の大領域をカバーする高品質の撮像データを提供することを目的としています。

このサーベイが完了すると、弱い重力レンズ効果の観測からダークマターのマップを構築することが可能となります。すると、天体物理学と宇宙論の分野で、数多くの非常に面白い研究が可能となります。私は、特に、SDSS-III のカタログにある銀河の弱い重力レンズ効果に立ち返り、新しいデータに照らして再検討することを楽しみにしています。ここで紹介したような銀河のクラスタリングと弱い重力レンズ効果の同時解

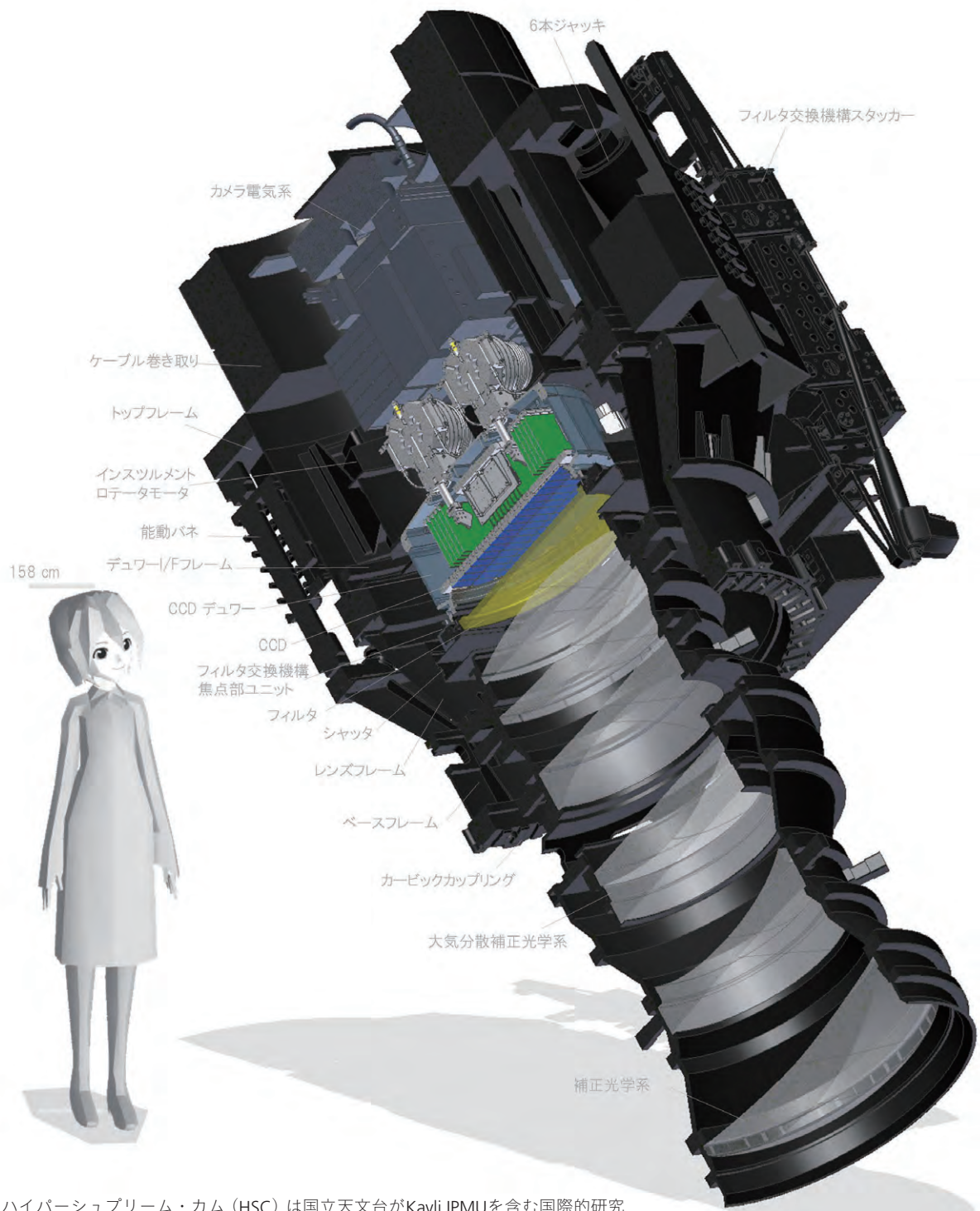


図5. ハイパーシュプリーム・カム (HSC) は国立天文台がKavli IPMUを含む国際的研究機関および産業界のパートナーと共に製作した巨大なデジタル・カメラです (Kavli IPMU News No. 23の40～43ページ参照)。このカメラはハワイのマウナ・ケア山頂に設置されている有効口径 8.2 m のすばる望遠鏡に搭載されており、現在、すばる望遠鏡戦略枠の一部として大規模な銀河撮像サーベイを実施中です。HSCサーベイは、完了すると天球の1400平方度を前例のない深さで観測することになります。(Image credit: NAOJ)

析は、宇宙の構造の成長を追いかけて異なる宇宙年齢の時代で行うことが可能です。これはダークエネルギーの正体を明らかにする上で極めて重要であり、こ

のサーベイの主要な目標の一つです。前途には間違いなくエキサイティングな時代が待ち受けています。