

Probing the Dark Side of the Universe

国立天文台理論研究部 杉山直

近年、観測的宇宙論の進展はめざましいものがある。宇宙の進化を記述する重要なパラメータである宇宙論パラメータは、ほぼ決定されたといっていよう。WMAP によって、空間の曲率はほぼ 0 であり、宇宙のエネルギー密度は、宇宙項が 73%、ダークマターが 23%、通常の物質であるバリオンはわずか 4%であるということが示されたのはよく知られているところである。また、高赤方偏移超新星探査によって宇宙項の必要性が叫ばれるようになってきたのは 90 年代終わりである。さらに Keck 望遠鏡によって重水素の Ly- α の吸収が直接測定できるようになり、これまでよりも精密にバリオンの量が見積もれるようになったのは 1990 年代中頃のことであった。また重力レンズ、銀河団の存在量、大規模構造などからダークマターの存在量も近年かなり正確に決定することができるようになってきた。WMAP を含めたこれら総ての観測結果が、先の宇宙項・ダークマター・バリオンの値を示唆するのである。

宇宙論パラメータの決定以外に重要な観測は、宇宙の構造の形成と進化に関するものである。最初期天体形成については、WMAP の偏光観測からこれまで思っていたよりも早い時期、宇宙誕生後 2 億年(赤方偏移 20)の頃であることが示唆された。しかしこの観測に関しては、まだ不定性も大きく、銀河からの偏光に関する寄与の見積もりも難しいために、さらに二年目・三年目のデータが待たれるところである。すばるは赤方偏移=6.6 の銀河を発見し、また最近ではガンマ線バーストも $z=6.3$ に見つかっている。SDSS によって多くの高赤方偏移の QSO も発見され、それらを用いた Gunn-Peterson テストによって、宇宙の再電離が $z \sim 6$ 頃に終了したことがわかってきはじめている。つまりこの時までには、天体形成が進んで、銀河間ガスを星、ないしは QSO の出す紫外光によって電離したと考えられるのである。一方 SDSS や 2Df といった広域銀河サーベイ計画によって比較的近傍の銀河の分布に関しては多くのことがわかってきた。宇宙の大規模構造が、銀河のネットワークを張り巡らせた大規模な cosmic web であることや、コールドダークマターモデルによる自己重力構造形成がこのような構造を形成することなどである。

さて、今後の宇宙論であるが、次の三つのテーマを巡って観測を中心に展開することとなるであろう。すなわち、ダークエネルギー、ダークマター、そしてダークエイジである。そのためには、これまでのような広く・しかし浅いサーベイ、ないし深く・しかし狭いサーベイではなく、広域かつ深いサーベイが必要となる。

ダークエネルギーは、宇宙項の一般化した概念である。宇宙を支配する「物質」の密度 ρ と圧力 p との関係、すなわち状態方程式を $p=w\rho$ と表したとき、パラメータ w の値が $-1/3$ より小さければ、宇宙は加速膨張することがフリードマン方程式より明らかである。アインシュタインの考えた宇宙項は $w=-1$ の場合になる。ダークエネルギーとは、 $w<-1/3$ の

場合すべてを含む、すなわち宇宙を一般に加速させる存在のことを指す。正体は不明であるが、スカラー場がその候補である。ダークエネルギーを詳しく調べるためには、宇宙の膨張速度の時間進化を赤方偏移の関数としてもとめる必要がある。そのために、重力レンズ効果や、大規模構造の密度ゆらぎに現れるバリオン振動を測定するというアイデアが出されている。バリオン振動について説明しよう。宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎが $z=1100$ の時代の音波モードの振動であることから、光子と結びついて振動していたバリオン(当時は陽子・電子流体)にも当然その振動が見つかるはずである。振動の波長は、音速で決定されるものであり、温度揺らぎの方に現れる振動の波長と関係がつけられる。つまり絶対的な大きさを予想できるのである。一方、観測では $z \sim 1$ のあたりの銀河の分布を見ることが可能であり、そこで振動を見つけることができれば、絶対的な大きさと見かけの大きさから「角径距離」を決定することができる。これによってダークエネルギー成分がその時期にどれだけ存在しているか知ることができるのである。実際に、SDSS チームが最近、初めてこの振動を発見した、と発表した(Eisenstein et al. astro-ph/0501171)。今後はこのバリオン振動や重力レンズ効果によって、 w や w の時間進化まで明らかにされていくかもしれない。そのためには、広視野で SDSS よりも格段に深いサーベイが必要となる。

ダークマターについては、直接捉える試みについては野尻氏の報告にゆずるとするが、天文学的には、光ではなく質量の分布を直接測定することにより、その存在量を決定できる。そのためには、重力レンズ効果や銀河団分布の測定などが有用である。また近年注目されてきているのが、銀河中心などの質量が集中している場所からの TeV ガンマ線放射である。ダークマターの正体が超対称性理論が予想する素粒子であるとすれば、密度が高い場所では互いに衝突し、ガンマ線を出すと予想されるのである。チェレンコフ望遠鏡の活躍が期待される。

ダークエイジとは $z=1100$ の時期から、銀河が見え始めている $z=6.6$ の間、未だ観測的には直接見ることでできない時期を指す。しかしこの間のどこかで最初の日体形成、そして星形成が起き、現在の構造へとつながっているのである。そこでダークエイジ、とりわけそこでの初期日体形成を明らかにすることは宇宙論の次の重要なテーマとなる。方法としては最初期の日体からの光を直接捉えることができれば最も直接的にダークエイジを調べることができる。大きく赤方偏移していることから、赤外やサブミリといった波長での観測が今後重要となる。また、ガンマ線バーストも大変期待できる現象である。再遠方の銀河よりも高赤方偏移のガンマ線バーストもやがて発見されるかもしれない。より間接的にはなるが、銀河間ガスの状態を調べる方法もある。宇宙マイクロ波背景放射が通過する際に、イオン化した領域で散乱を受ければ、温度揺らぎを生成したり、偏光が生じたりする。これを測定すれば、いつどのように銀河間ガスがイオン化していったのか明らかにできるのである。一方、中性水素の出す 21cm 線を背景放射の brightness temperature に見つける、という新しい方法が近年提唱され、その理論研究が急速に進んでいる。ごくわずかではあるが空間の揺らぎとして見つけることが可能である。赤方偏移ごとに詳細にその時間進化

がわかる可能性があることから、今後の観測の進展が期待される。

ダークエネルギー、ダークマター、ダークエイジ、この3つの問題を明らかにするために、世界ではさまざまな観測計画が進行中であり、また計画されている。詳細については、この後につけた私の発表のファイルをごらんいただきたい。30 mクラスの大望遠鏡、8 mクラスの望遠鏡を用いた超広視野サーベイ計画、スペースでの光、赤外、電波（マイクロ波背景放射）観測など目白おしである。電波については ALMA、そして 21cm 線を目指すより波長の長い領域でのサーベイである LOFAR などがもうすぐ実際の観測をスタートさせる。今後少なくとも10年から20年は宇宙論観測から目が離せない。