

# Introduction to Cosmology 2nd Edition

C1SB2064 辻 勇吹樹

2023年10月12日

## From 2.2 The Universe is Isotropic and Homogeneous[2]

コペルニクスの原理

宇宙には特別な点が存在しない。

### この世界がいかに平凡で単調で劇的か

私たちは住んでいるこの場所が「平坦」でないことを知っている。それは地球がほぼ球形であるからだ。そして、地球は宙に浮いていて空に輝く星を中心に回転していることを知っている。そして、その輝く星もある中心をもって回転していて、目に見える星の多くはこの場所でも、輝く星でもないところを中心にしたりしなかったりして運動していることを知っている。そして、この場所は広い目で見れば特別な場所でなく、どちらを見ても同じような景色が広がりしばらく行った先にも同じようなものがあることを知っている。

これらの「知識」は多くは今の私達が直接調べて見つけたものではない。教科書や解説書に載ってあったから、すなわち過去の偉人たちが調べて分かったからそうなのだと理解している部分が多い。もしかすると一部の人は、船が海を出て徐々に小さくなってやがて見えなくなる様子からこの場所が「平坦」でないことを導くかもしれない。また天動説と地動説両方の理論を吟味してケプラーの3つの経験則をより簡単に説明できる地動説に可能性を見出すこともあるかもしれない。しかしそれでも、私達の住んでいるこの場所が特別でないことを証明することはできない(地動説から考えを巡らせれば思いつきそうなことではあるがここでは証明を重視している)。確かに宇宙の中心ではないかもしれないが、中心たる太陽の恩恵を最も適した位置で受けとり緑や生命の豊かな星であることは間

違いはない。今のところ他の星の知的生命体の証拠も何一つとして見つかっていない。それでは、この場所が特別な場所ではないことはどうやって示されたのであろうか。

実際、厳密に証明されてはいない。光の届く範囲でしか議論ができないため、とりあえず見たところ成り立っているというわけだ。特に「この宇宙は等方的で均質である」とする考えは宇宙原理と呼ばれ、原理であるから理由を尋ねても無駄なのである。ここではこの原理が示されるに至る過程を見ていくことにする。

### 特別でないことを、見つける歴史 [3]

天動説と地動説の争いはここでの趣旨ではないので簡潔にする。しかし、地動説が提唱されるまで 1500 年もの年月が流れており、地動説の提唱者も厳しい人生を送ることになったことには目を向けなければならない。15,16 世紀ごろコペルニクスは天動説よりもはるかに簡単に、そして美しく記述できる地動説の検討をした。その後ブラーエやケプラーらによってデータが集められ「ケプラーの法則」が導かれた。17 世紀にニュートンによってこの法則が万有引力の法則から導かれることを示すと、「地球は太陽を中心に周っている」という考えが受け入れられることとなった。またニュートンはこの万有引力から考えを延ばして宇宙には無数の星が無数の宇宙に散らばっていることを考えていた。この場所が特別でないという考えは 17 世紀から少なくとも始まっていた。

18 世紀に星が群れをなす考えがカントによって想像され、太陽系外の星の群れの距離や形のデータが蓄積されていった。20 世紀に入るまで群れの大きさを決めることができず、さらに星の多く存在する領域(銀河面)では等方的に星が分布していたため地球(などの太陽系)が星の群れ(銀河)の中心であるという考えは残っていた。

1908 年にセファイド変光星の周期光度関係が見つられるとセファイドの星の距離を特定しようとする試みが盛んになる。距離を特定できれば周期光度関係から絶対光度を求め、そこから全てのセファイドの距離を推定することができるためである。そしてシャプレーはハローにある変光星の距離を求め、さらに等方的に星が見えていたのは星間塵が原因であったことも突き止めた。星間塵が星の光を吸収するためほぼ同じ距離でしか見渡すことができなかつたのである(ハローには塵が少なかったため距離を決めることができた)。地球は銀河の中心でもなかつたのである。

1921 年ハッブルは、銀河をスペクトル観測することで多くの銀河が自分たちから距離に比例する速度で遠ざかっていることを発見した。地球は宇宙、少なくとも銀河以上の構造の中心なのだという考えに至ることはもう無いだろう。ただし前にも述べたようにそ

の構造全体を見渡すことはできていない。ここで宇宙原理が鍵になる。「この宇宙は等方 (isotropic) で一様 (homogenous) である」とするこの仮定は、一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式の解 (Friedmann equations) を与えている。この解によれば、宇宙は一様に膨張している、すなわち地球以外のどの星から見ても銀河は遠ざかっているように見える。ハッブルの発見はこの膨張を観測したと解釈することができるのである。また宇宙原理を採用した時点で地球が宇宙の中心でないことを認めてしまっているように見える。もはや中心であろうとなかろうと見える景色が変わることはないが、少なくとも特別な点であるという考えはこのとき完全に捨て去ったと言えるだろう。

そして、宇宙の一様膨張を逆算することで宇宙が 1 点から始まったとするビッグバン宇宙論がもたらされる。これは 1946 年ガモフによって提案され、1965 年宇宙背景放射の観測によって直接の証拠が得られることとなった。

(1999 年 Dekel らは宇宙膨張を除いた銀河の速度 (peculiar velocity) を観測して質量密度場を推定する POTENT 法を構築している [1]。そして 1988 年 IRAS 衛星で観測した赤方偏移から密度を推定するものと比較している (図 1) が、どちらで近傍銀河をモデル化したものを見ても確かに特別な点はなく、銀河がほぼ等方的に分布していることが確かめられる。)

## 特別でないことからもたらされるもの

宇宙が等方的で一様とはどういうことだろうか。等方的とは、特別な方向が無いということである。確かに銀河があるところと無いところで方向を決めることはできるかもしれないが、それはあくまで視界の範囲でしかなく指を指した方向にはその方向によらずある一定の間隔・一定の確率で銀河が存在するのである。一様とは特別な場所がないということである。確かに宇宙スケールで見ても泡構造と評されるように密度の濃いところと薄いところがあるが、それらはパターン化されている。宇宙のある一点だけが濃いのではなくある一定の間隔で濃いところと薄いところが次々と現れている。これでは濃いところを特別とは見なせないだろう。等方的はある場所にいる観察者によって与えられる subjective な性質であり一様は対象の全てを見渡すことで与えられる objective な性質である。一方を持っていても他方を持たないこともできる。等方的だが一様でないのは別の任意の場所にいる観察者を与えたときに同じ光景が得られないときにあたる (例、球 (殻))。一様だが等方的でないのはある特定の方向にパターン化されている場合にあたる (例、縞模様)。

これらの性質を仮定することで地球をはじめとする全ての星や銀河はすべて平凡でその分布は単調なものとなる。この仮定は正しい証明をなされているわけではないが上で見た

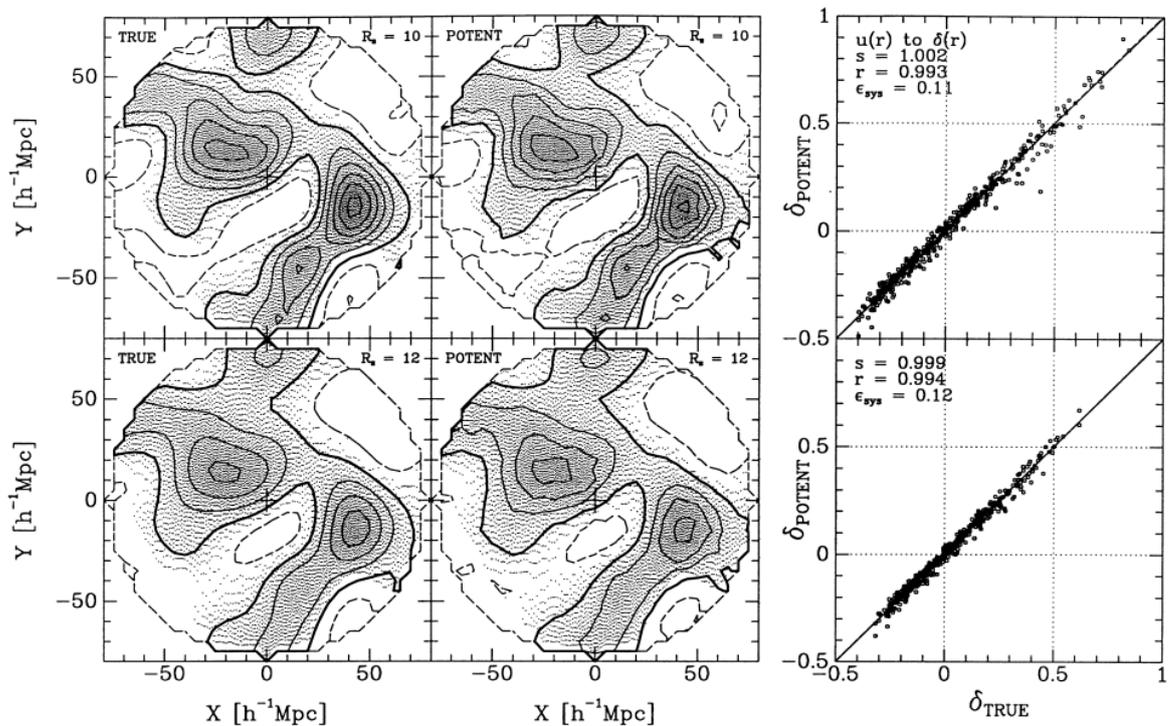


図1 赤方偏移と peculiar velocity のそれぞれから推定した、近傍銀河の質量密度分布の比較。濃い部分は上からかみのけ座銀河団、うみへび座・ケンタウルス座超銀河団 (左)、ペルセウス座・うお座超銀河団 (右) である。[1]

ように歴史に振り返れば納得できる帰納的推定である。太陽系の中心ではなく、銀河系の中心でもなかった地球は宇宙の中心でなく、他の星もすべて中心ではありえない。そしてその仮定からハッブルの観測事実を解釈すればビッグバン宇宙論が開かれるのである。その直接的証拠も得られている。したがって正しくはこの宇宙は等方的で一様である「はず」である、特別の1点はある「はず」でないというのがふさわしいように思われる。そして、その考えが今の宇宙論の土台となっていることは頭の片隅に残しておくべきだろう。

## 参考文献

- [1] A. Dekel, A. Eldar, T. Kolatt, A. Yahil, J. A. Willick, S. M. Faber, S. Courteau, and D. Burstein. POTENT reconstruction from mark III velocities. *The Astrophysical Journal*, 522(1):1–38, sep 1999.
- [2] Barbara Ryden. *Introduction to Cosmology*. Cambridge University Press, 2 edition, 2016.
- [3] 定矩 岡村, 了 池内, 宣男 海部, 勝彦 佐藤, and 裕子 高橋. 人類の住む宇宙. Number 1 in シリーズ現代の天文学. 日本評論社, 第 2 版 edition, 2017.