

宇宙のトポロジーを決定するための天体分布を用いた新手法

藤井宏和 (東京大学)

現代宇宙論はアインシュタインの一般相対論を基礎にしており、近年の精密観測の結果として平坦な Λ -CDM 宇宙が広く支持されている (e.g., $\Omega_{\text{tot}} = 1.0050^{+0.0060}_{-0.0061}$, Hinshaw et al. 2009)。しかし、一般相対論は微分方程式で記述される局所的な理論であり、局所幾何 (曲率) は等しいが大域幾何 (トポロジー) は異なる 2 つの空間を区別しない。例えば、平坦な Λ -CDM 宇宙のモデルとして有限な 3 次元トーラスを考えることも可能である。

宇宙が厳密に平坦であるものとする、宇宙モデルの数学的な候補として 18 種類の空間が存在する (Nowacki 1934, 図 1 参照)。これらのうち、我々はこの空間に住んでいるのかを観測的に制限することは宇宙論に残された大きな課題である。図 1 からわかるように、非自明なトポロジーを持つ宇宙では空間がコンパクト化されており、したがって、物理的には同一の領域を異なる方向から同時に観測することが可能になる。

最近では、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測データを用いる手法が最も一般的である。最終散乱面 (LSS) までの距離 ($\approx 14\text{Gpc}$) が宇宙のサイズよりも小さいと、LSS と宇宙との交線は同一の温度揺らぎを持つ 1 組の円周となる。そのような円周の組を見つける試みが WMAP 衛星のデータリリース以降盛んに行われてきた (Cornish et al. 2004; Key et al. 2007; Roukema et al. 2008; Aurich 2008; Bielewicz & Banday 2011)。しかし、ノイズの見積もりなどの違いから共通の見解は得られていない。さらに別の問題として、計算時間の制約から、図 1 に示された 17 種類のうち先行研究によって制限されているのはわずか 3 種類 (3-torus, chimney space, slab space) であることが挙げられる (Mota et al. 2010)。残りの 14 種類は“大域的に”非一様であり、観測者の位置によって境界条件の見え方が変わるため網羅的なチェックには膨大な計算時間を要するのである。

我々は今回、このような大域的に非一様な宇宙に対しても一般的に適用でき、かつ短時間で全ての場合を網羅できる手法を開発した (Fujii & Yoshii 2011a, Fujii 2011)。これは CMB ではなく、銀河やクエーサーなどの天体の 3 次元分布を用いるものである。以下ではその概略を示す。例として、 180° の回転によってねじれた境界条件:

$$\gamma: (X, Y, Z) \mapsto (-X, -Y, Z + L) \quad (1)$$

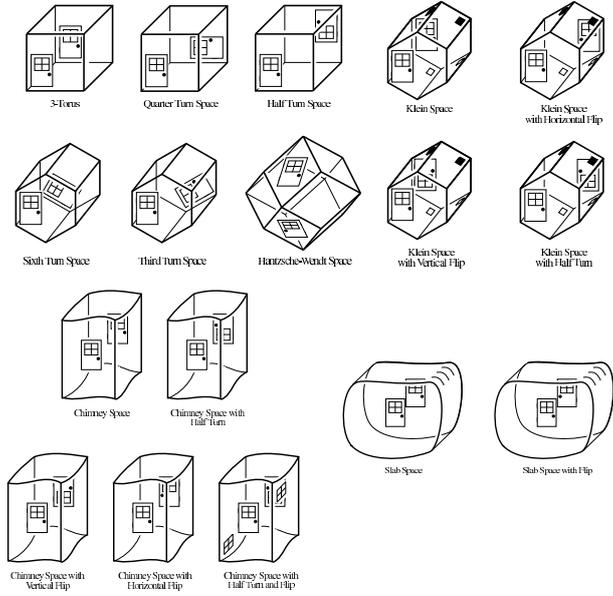


図 1: 17 種類の 3 次元平坦空間のイラスト (無限に広がるユークリッド空間は描かれていない)。空間はコンパクト化されており、その境界条件の入れ方がドアや窓の向きによって表現されている。Jeffrey Weeks 氏の好意による。

が与えられている場合を考える。このような境界条件によって物理的に同一な天体の像が複数見えているとする。そのような天体の 1 組を見つけようとすれば L をフリーパラメータとして扱う必要があるが、2 天体の組を探すことによりそれを回避することができる (Fujii & Yoshii 2011a)。具体的には、2 天体 \vec{X}_1, \vec{X}_2 を考え、 γ によるその“虚像”を \vec{X}'_1, \vec{X}'_2 とおくと次式が成り立つ。

$$X'_2 - X'_1 = -(X_2 - X_1), \quad (2)$$

$$Y'_2 - Y'_1 = -(Y_2 - Y_1), \quad (3)$$

$$Z'_2 - Z'_1 = Z_2 - Z_1. \quad (4)$$

ここで注意しなければならないのは、上のような表記ができるのは特別な座標系 (X, Y, Z) を用いたときのみであることである。これは宇宙の特別な方向 (ここでは 180° 回転の回転軸) に関しており、我々が前もって知ることの出来ない量である。一般に我々が用いる座標系 (x, y, z) における γ の表現は次式で与えられる。

$$\gamma = U \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} U^{-1} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ L_1 & 0 & 0 & 0 \\ L_2 & 0 & 0 & 0 \\ L_3 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

ここで U は座標系のとりかたの自由度を表すユニタリ行列である。したがって関係式 (2),(3),(4) は変更を受け、座標系 (x, y, z) をフリーパラメータとしてサーチをかける必要がある。これには長時間の計算を要し、CMB の手法と同様の困難が存在したが、次のようなテクニックにより回避することが可能である (Fujii 2011)。再び 2 天体 x_1, x_2 とその虚像 x'_1, x'_2 を考えると、それらの 3 次元空間分布には回転軸に対する情報が含まれている: 回転軸はベクトル $(x_2 - x_1) + (x'_2 - x'_1)$ に平行である (図 2)。

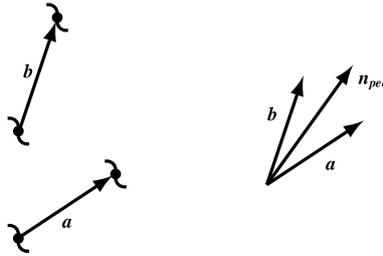


図 2: ある天体の 4 組を考え、単位ベクトル $\vec{n}_{pec} \propto \vec{a} + \vec{b}$ を計算する。これらが境界条件による 2 組の虚像であった場合、 \vec{n}_{pec} は回転軸に一致する。

したがって、カタログに含まれる全ての 4 天体の組に対して $\vec{n}_{pec} \propto \vec{a} + \vec{b}$ を計算しプロットしていけば、ある特定の方向に優位な超過が見られるはずである。このテクニックにより、座標系と無関係に全てのトポロジーを網羅的に制限することができる。図 3 にシミュレーションの結果を載せる。左図は“正しい”座標系 (X, Y, Z) を用いた場合、右図はそれとは 30° だけずれた z 軸を用いた場合である。いずれの場合も、回転軸に対応する部分にスパイクが見られた。

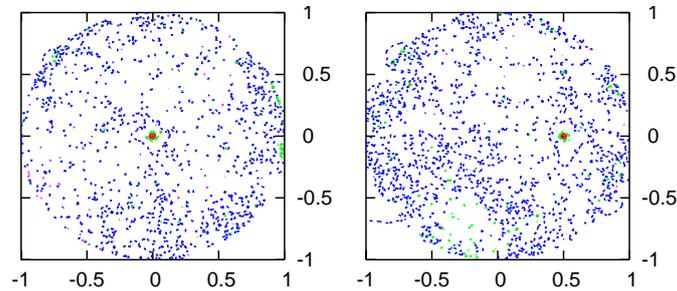


図 3: クエーサーのトイカタログに対する計算結果。座標系のとりかたによらず、非自明なトポロジーの兆候を探ることができた。

我々の手法は天体の 3 次元分布を用いるものであるが、2dF サーベイ、SDSS などをはじめとする既存の分光データ、また来るべき大規模分光サーベイなどを用いれば、宇宙の大域トポロジーに対する網羅的な制限を初めて得るこ

とができるはずである。また、近年の測光観測技術の進歩を鑑みれば、必ずしも分光によるサーベイが必要でない可能性もある。いずれにしても、実際のデータに適用するためにはより現実的で詳細なシミュレーションが必須であって、今後実際に取り組んでいく予定である。