

# Observational Cosmology towards the 21st century

Yasushi Suto

Department of Physics and Research Center for the Early Universe,  
University of Tokyo, Tokyo 113-0033

We have witnessed a rapid and significant progress in the observational cosmology for the last decade. It is true that any field in science should experience rise and fall, and cosmology would not be an exception. Will cosmology continue to enjoy progress for another century, or have to admit a graceful end? In this article, I would like to present my personal view on the status and prospects of the observational cosmology towards the 21st century.

## 21世紀に向けた観測的宇宙論

須藤 靖

<東京大学理学部物理学教室・初期宇宙研究センター

〒113-0033 東京都文京区 本郷 7-3-1 >

e-mail: suto@phys.s.u-tokyo.ac.jp

ここ10年間観測的宇宙論の進展はめざましい。しかし、あらゆる学問分野において栄枯盛衰の歴史が繰り返されるのは必然である。観測的宇宙論はまだまだ発展が望めるのか、あるいはもはや先細りになってしまうのか。具体的な学問成果ではなく、むしろ研究の方向性という立場から、21世紀に向けて（特に理論屋にとって）の観測的宇宙論の現状と課題を主観的に概観してみたい。

## 1 1980年代：宇宙の大構造とN体数値シミュレーション

1980年前後は宇宙論の転機とでもいうべき時期であった。理論面では、素粒子論と相対論的宇宙論の蜜月の象徴とでも言うべき最大の成果、インフレーション理論が提案された。観測的にも、数10 Mpc以上のスケールにわたる宇宙の大構造の存在が認識された。これらはいずれも現在の宇宙論研究のスタイルに大きな影響を与えている。つまり、理論的に予言された初期条件から出発して、現在の観測事実との比較を通じてモデルを検証・構築していく、という方法論である。別に当たり前ではないか、と思われるかもしれない。しかし、宇宙物理において初期条件が（その正当性・モデル依存性はさておいても）理論的に予言でき、しかもその帰結がある意味では普遍的な統計指標として具体的に与えられているような分野はまれであろう。むしろこのことは、宇宙論、特に宇宙の大構造の研究というのは、極度の捨象という行為の上に行われているだけのことであり得る。

しかしながら、この方法論は特に物理屋にとっては居心地が良い。宇宙物理においては、これこれの天体はしかじかの初期条件・初期パラメータをもっていないとてはならない、という結論が最終的な研究成果となってしまう場合が多い。もちろん大事である。しかし、単なるパラフレーズではないかという言い方もできる。特に、第一原理から初期条件・境界条件を与えた上で理論モデルの帰結を検証する、という方法論に慣れている（実はそのような論理ではなくても、そういう方法論に基づいているものと思っ込んでいるだけの場合もしばしばあるが）物理屋にとっては、それでは何を説明したのか分からず不満が残ってしまう。

もちろん、宇宙の構造進化を、銀河さらには星の形成の基礎物理過程にまで溯って説明しようなどと考えようものならたちまち同じ困難に遭遇する。しかし、そこはすっぱり割り切って銀河の2点相関関数の振る舞いを説明することだけを当面の目標とすれば、物事はすっきりする。統計的にはwell-definedな初期条件から出発して、相対論的な線形摂動論を用いてボルツマン方程式を解いて密度ゆらぎの進化を求める。次にそれ自身を初期条件としてスーパーコンピュータで膨張宇宙における非線型重力系の時間発展を追う。一本道である。しかもこの過程で、宇宙の暗黒物質や宇宙定数というモデルパラメータに対する制限も得ることができる。コンピュータの能力向上にあわせて進んだシミュレーションが実行できるようになると、過去の結果を凌駕するような新しい結果が次々出てくる（ように錯覚する）。表1はこのあたりの事情をまとめたものであるが、表面的な進歩は別にして、本当にブレイクスルーと呼ぶべきは、1975年の三好・木原<sup>1)</sup>と1985年のDavis et al.<sup>4)</sup>の仕事（だけ？）であろう。前者は、宇宙の構造進化を数値計算でシミュレートするという方法論を初めて示した極めて先駆的な仕事（にもかかわらず、外国はおろか国内ですらほとんど知られていないのはきわめて残念なことである）と位置付けられる。後者は、上で述べた、インフレーション理論の予言する初期条件から出発し、現実的な(?)暗黒物質の密度ゆらぎのスペクトルを用いて現在の宇宙の大構造の統計的性質を説明するという試みをやったのけた。彼らはさらにそれにとどまらず、（その正当性は別としても）当時提唱されたばかりのバイアスという重要な概念まで考慮しており、宇宙論的N体数値シミュレーションに限れば、それ以後の仕事は本質的には彼らの方法論を踏襲して（技術的な面から）数値計算の信頼性を向上させてきたに過ぎないといってもよい。しかしながら、このような不断の努力によって重力的側面から見た宇宙の構造の進化に関してはかなり理解が進んできたこともまた事実である。

## 2 1990年代：天体とは何か

1965年のペンジラス・ウィルソンのCMB（宇宙マイクロ波背景放射）の発見、そして1992年のCOBEによるCMB温度ゆらぎの発見は、現代宇宙論において最も重要な観測的ブ

表 1: 宇宙論的 N 体数値シミュレーションの“進化” (ただし、Particle – Mesh 法と呼ばれる空間分解能の低い手法に基づく計算結果は除外している)

著者	発表年	粒子数	初期条件
三好・木原 <sup>1)</sup>	1975	400	ランダム + $\alpha$ ( $\Omega_0 = 1$ )
Efstathiou <sup>2)</sup>	1979	1,000	ランダム ( $\Omega_0 = 1, 0.1$ )
Aarseth, Gott, Turner <sup>3)</sup>	1979	980 ~ 4000	冪則ゆらぎ ( $\times 17$ モデル) ( $\Omega_0 = 0.1 \sim 1$ )
Davis, et al. <sup>4)</sup>	1985	32,768	CDM ( $\Omega_0 = 1, 0.2$ , with/without $\Lambda$ )
杉之原, et al. <sup>5)</sup>	1991	262,144	冪則ゆらぎ ( $\times 8$ モデル)
須藤, 杉之原 <sup>6)</sup>	1992	2,097,152	CDM
Jing <sup>7)</sup>	1998	16,777,216	CDM ( $\times 47$ モデル)
Couchman <sup>8)</sup>	1998	1,000,000,000	CDM

レイクスルーである。前者はビッグバン宇宙論、後者は重力不安定による構造形成、というパラダイムを確立したという意味でその重要性はいくら強調してもし過ぎることはないであろう。特に、COBE の温度ゆらぎマップの存在は、温度ゆらぎの上限値から宇宙論モデルパラメータをあらかじめ制限した上で、宇宙の大構造分布からもっとも良い一致を示す組み合わせを選ぶ、というスタイルから、パラメータは CMB 温度ゆらぎから決定し大構造分布は主として天体 (特に銀河) のバイアスを理解するために用いる、という最近主流となっているスタイルへの移行を促した。銀河は暗黒物質のつくる重力ポテンシャルの忠実なトレーサーであるとは考えられないが、その間の関係 (つまり星形成および銀河形成) を第一原理から説明することはほとんど不可能であるため、観測を仲介とした現象論的な記述を当面の目標に設定しているわけである。

こちらあたりが、宇宙論をやっと天文学らしくさせる部分ではある反面、前章で述べたような考えからすれば、物理屋にとっては少し居心地が悪くなり始めるところでもある。事実、バイアスの話などをこちらから持ち出して話をややこしくする愚をおかしさえしなければ、宇宙論的 N 体数値シミュレーションはむしろ物理学者にはかなり受けがよい部類の話である。一方、天文学者に対しては、いかにプリミティブなレベルであろうと流体であるとか輻射過程であるとか、もう少しいかにも天体形成に関わるようなプロセスまで考慮していますよ、というふりをしておかないとあまり安心して話を聞いてもらえない。SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics) や mesh 法 hydro の数値シミュレーションが今後重要であることは自明であるにしても、表 1 の N 体数値シミュレーションにおける 1985 年の Davis et al. の位置づけに対応する仕事はいまだ存在しない (強いて言えば 1992 年頃の Cen and Ostriker の一連の仕事であろうが、、、)。

数値シミュレーションはともかくとして、ここ 1、2 年急速に議論が活発になっているのがバイアスの“理論” (と呼べるようなものかは疑わしいが) である。この概念は 1984 年の Kaiser<sup>9)</sup> の先駆的な仕事に始まって、1986 年の Bardeen et al.<sup>10)</sup> による density peak に基づく定式化の集大成によって第一段階の完成を見た。その後細かい発展はあったにせよ、最近まで本質的な進歩はなかったというべきであろう。N 体数値シミュレーションにおけるバイアスの問題は誰でも認識していた自明なしかし本質的な問題点であった。物理学においては、まずは (仮に現実的でなくとも) 単純な近似を採用して振る舞いを理解することは常道なのであり、天文学においても厳密に言えば存在するはずのない球対称モデルの枠内で、物理的本質が説明できる場合がほとんどである。最近バイアスが活発に議論されているのはその重要性にやっと気付いたからではない。CMB データと広域銀河サーベイデータの 2 つに代表されるように、宇宙論パラメー

タとバイアスが独立に決定できる見通しがたったためである。つまり、機が熟してきたから真面目に考え始めただけのことである。仮に20年前に考え始めたとしてもさほど何か進展があったとは思いがたい。逆にいえば今後大いに進展が期待できるテーマであろう。

### 3 2000年代：広深多

標準的宇宙構造形成理論は、(少なくとも)銀河スケール以上の天体は、ダークマターのつくる密度ゆらぎが直接的な種となっているという大前提のもとに構成されている。ダークマターの存在を前提とすること自身かなり大胆な仮定であるというべきだが、この理論から導かれる様々な予言と矛盾するような観測事実は知られていない。むしろ、いくつかの宇宙論パラメータをそれらの観測的な不定性の範囲内でうまく選ぶことによって、100Mpc スケールでの銀河分布が示す宇宙の大構造、銀河団の統計分布、宇宙マイクロ波背景放射観測衛星 COBE の発見した温度ゆらぎの振幅とスペクトル等の重要な観測事実はすべて同時に説明できるモデルが複数存在する。このことは理論の前提を含む枠組自身の正しさを強く示唆するものではあるが、具体的なモデルのどれが最終的に正しいものなのかを区別することは困難な状況にある。

昨今の不況を反映して、旅行は安近短の傾向にあるという。一方、最近いろいろな場所で機会があるたびに言っていることであるが、上記の目的のために必要とされている新たな宇宙論的観測は広・深・多、という特色の少なくとも一つを前面に出さなければ生き残っていけない状況になりつつある。つまり、

- A) 広く：宇宙論研究において、バイアスを受けていないデータを得るためには、観測領域の体積を可能な限り広げることが本質的である。統計精度の向上はこの自明な方法でしか望めない。
- B) 深く：観測領域の体積を増やすために、天球の2次元的なサーベイ面を広げるのではなく、奥行きを伸ばす、つまりより深く・より深くまで見ることも考えられる。実は宇宙論的観測において、この2つは同値ではない。光速度が有限であるために、より遠い領域は我々から見てより過去である。したがって、より深く観測したことによって得られるデータは、宇宙の空間方向の軸ではなく、進化という時間軸に沿った独立な情報をも含むことになる。
- C) 多波長で：宇宙の観測的情報源は極めて多波長にわたるといって特色も最大限活用すべきである。宇宙膨張を証明した可視光域における銀河観測、ホットビッグバン理論を決定的にし初期ゆらぎの存在を立証した電波領域における宇宙背景放射の観測、日本の ASCA 衛星に代表される X 線領域での銀河団観測などはそれぞれが他の波長域に対して相補的な貴重なデータ源である。さらに将来はニュートリノや重力波という電磁波以外の窓も大きく発展することが期待できる。

である。表2に、現在進行中の大型観測計画をまとめておいた。確かにいずれも広深多の条件を満たしている。日米共同の SDSS(Sloan Digital Sky Survey) プロジェクトや英豪共同の 2dF(2 degree Field) サーベイは A) の典型的なものであるし、現在活躍中のハッブル宇宙望遠鏡(HST)やハワイのケック望遠鏡、さらには間もなく完成予定の我が国のすばる望遠鏡は主として B) を指向したものと考えることができる。また計画が進行しているアメリカの MAP 衛星(Microwave Anisotropy Probe)やヨーロッパの PLANCK 衛星は、いわば A) から C) を同時に備えたもので、電波・サブミリ波領域において CMB の全天マップを作成するとともに、銀河団サーベイを行うことを目的としている。

表 2: 現在進行中の大型サーベイプロジェクト

プロジェクト	波長帯	観測領域	観測対象
MAP <sup>(a)</sup>	電波 (5bands)	全天	CMB anisotropies
PLANCK <sup>(b)</sup>	電波 + サブミリ波 (9bands)	全天	CMB anisotropies、銀河団、AGN
SDSS <sup>(c)</sup>	可視 5bands (+分光)	$\pi$ ステラジアン	銀河 100 万個、クエーサー 10 万個
2dF <sup>(d)</sup>	(分光)	$75^\circ \times 15^\circ, 75^\circ \times 7.5^\circ$	銀河 25 万個、クエーサー 3 万個

<sup>(a)</sup> <http://map.gsfc.nasa.gov/>

<sup>(b)</sup> <http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Planck/>

<sup>(c)</sup> <http://www.sdss.org/>

<sup>(d)</sup> <http://www.ast.cam.ac.uk/AAO/2df/>

## 4 理論屋的観測的宇宙論の課題

観測的宇宙論を展開する際の最も典型的な基礎データベースは、銀河の赤方偏移カタログである。図 1a の、CfA カタログ (6112 個: 文献 11) は、1980 年代の結果の集大成ともいえよう。扇状の図は、中心が我々の位置で、銀河を示す各点と中心との距離が、それぞれの銀河までの距離に対応する“地図”である。いうまでもないが、遠方で銀河の個数密度が小さく見えるのは、見かけの明るさがある大きさ以上の銀河を選んでいることによる見かけ上の効果である。これに対して、現存の銀河の 3 次元地図で最大のものは、南米チリにあるラスカンパナス天文台の 2.5m 望遠鏡 (視野 2.1 度) を用いて 1988 年 11 月から 1994 年 10 月にかけて観測されたラスカンパナス赤方偏移サーベイ (LCRS) である。LCRS は、北天、南天それぞれに 3 つずつ  $1.5^\circ \times 80^\circ$  の領域の上下に 3 つずつある帯状の領域が天球上の射影) を選び、その中の銀河総計 26418 個の赤方偏移を観測した。図 1b に、我々から 6000km/sec 内の距離に位置する北天 11263 個、南天 12434 個の LCRS 銀河の分布を示す<sup>12)</sup>。さらに 1998 年 5 月 27 日にファーストライトを得た SDSS や、すでにサーベイに入っている 2dF (図 2; 文献 13) を考えれば、銀河の赤方偏移カタログはまさに成熟の域に達しつつある。のみならず、数年後に完成すると思われるクエーサーの 3 次元地図の途中結果 (図 3; 文献 14) を見れば、まさに宇宙の果てまで見通せる時代がすぐそこまできていることが実感される。このような状況のもとで、理論屋の扱うべき問題も当然、質的に変化せざるを得ない。図 4 はこれらの効果を私なりに象徴的にまとめたものである<sup>1)</sup>。このような観点から、極めて簡単ではあるが、現状のまとめと今後の展望を概観してみたい。

### 4.1 すでに (少なくとも相対的には) 理論的理解が進んでいる事項

**ダークマター密度ゆらぎの重力的進化** 第一章で述べたように、密度ゆらぎの重力的進化は明確に問題設定が可能なテーマである。このために、線形理論は言うまでもなく、非線形領域でも数値実験によってさまざまなことが解明されてきた。2 点相関関数やパワースペクトルの重力的進化については、数パーセント以下の精度を誇る現象論的な fitting function すら提案されている<sup>15)–17)</sup>。

**大構造のトポロジー** 宇宙の大構造の初期条件としては、ゆらぎのスペクトルだけではなく、分布の確率密度関数も本質的である。通常は、ほとんどの場合 random-Gaussian 仮説が採

<sup>1)</sup> この類の図をあまり愉快に思われない方もいらっしゃるかもしれないが、1997 年 9 月号の表紙のような例もあることだしあらかじめご容赦をお願いする。

用されているが、これも本来仮定するのではなく検証されるべきものである。この目的のためにジナス統計と呼ばれる指標が提案されており<sup>18)</sup>、東京大学の松原氏による摂動論による重要な貢献もある<sup>19),20)</sup>。

**特異速度による赤方偏移歪み** 銀河の3次元分布といわれているものは、後退速度をハッブルの法則を用いて奥行き距離に換算したものであり、厳密に言えば、特異速度の補正が必要である。宇宙の大構造の決定という観点からは、ノイズ源となる効果であるが、この事実を巧みに逆用して宇宙論パラメータの検証ができることを示したのはやはり Kaiser である<sup>21)</sup>。これは、いまや宇宙論テストの大きな柱の一つとまでなっており、すぐれたレビューも存在する<sup>22)</sup>。

**宇宙論パラメータ** CMBの温度ゆらぎスペクトルを用いて、宇宙論パラメータを決定するという方法論は完全に確立しており、将来の観測データからどの精度で決定できるかを含めて膨大な研究がなされている。この問題に関しては日本のグループも多くの理論的な貢献を行ってきたが、なかでも京都大学の杉山氏による一連の系統的な計算は国際的にも認められている<sup>23)</sup>。精密決定という観点からはこのCMBによる方法論に勝るものはないと思われるが、最大の問題は得られる結果が完全にモデル依存していることである。これに対して、高赤方偏移の超新星や Sunyaev-Zel'dovich 効果を用いた銀河団の距離から宇宙論パラメータを推定する方法は、モデルに依存しない一般的な結果を与える。しかしその反面、当然であるが誤差も大きく、サンプルの数を格段に増やさなくてはあまり意味のある結果にはならない<sup>24)</sup>。特に、 $z \lesssim 1$ の超新星の距離から推定された宇宙論パラメータは、少なくとも現時点では統計的信頼度が極めて低いことを認識しておくべきである<sup>2)</sup>。

**重力的ハローの質量関数** 銀河・銀河団の質量の大部分がダークマターによって占められているという事実(標準的な仮説?)にたてば、そのようなダークマターの自己重力系の分布関数(特に質量関数)を知ることが実際の天体との関係を理解するための第一段階となる。その基礎となるのが Press - Schechter 理論であり、これを用いた宇宙論研究は極めて多い。銀河団の個数密度から宇宙論的パラメータを推定する研究は数多くなされているが、この理論を抜きにしては語れない<sup>25)</sup>。さらに最近では、この理論に基づいて重力ハローの空間的なバイアスモデルまで提唱されている<sup>7),26)</sup>。

## 4.2 今後解明されるべき理論的課題

**光円錐効果** 「遠くの宇宙を見ることはその過去を見ることである」とは、すでに陳腐な表現にまでなっている。にもかかわらず、光速度の有限性に起因するこの効果が宇宙論的観測に及ぼす影響について、明確な問題意識のもとにかつ具体的に論じたのは、知りうる限り我々のグループだけでであろう<sup>27)-29)</sup>。図3を見れば、この効果を正しく考慮すること無くしては、特にクェーサーの大規模サンプルから宇宙論的情報を抜き出すことが困難であることが一目瞭然である。ここには、天体自身の進化や通常のアストロノミカルなノイズに加えて、宇宙の幾何学に関係した一般相対論の効果、宇宙論的なスケールでの非一様性に起因する重力

<sup>2)</sup> 方法論としての単純さと興味深さは確かに注目に値する。しかし、例えば、IAU 京都総会の時の Perlmutter 氏の講演では、 $\Omega_0 = 0.88^{+0.69}_{-0.60}$  ( $\lambda = 0$  の場合) という結果から Einstein - de Sitter 宇宙  $\Omega_0 = 1$  を強く主張していたにもかかわらず<sup>34)</sup>、わずか半年後に発表された論文では  $\Omega_0 = 0.2 \pm 0.4$  という結果を発表して<sup>35)</sup>、低密度宇宙である、いわば正反対の結論を展開している。そもそも統計誤差の大きさから考えても、あまり結論を強調すべきではない上に、今回の重大な結論の変更は本質的にはわずかに一個の新しい超新星データによってもたらされたものであることからわかるように、真剣に受け止めるにはあまりにも時機尚早である。ただし、統計の問題をクリアしさえすれば、将来の重要な宇宙論的情報源であることは確実である。

レンズ効果、などなど理論的にはあまり調べられていない興味深い効果がたくさん潜んでいる。遠宇宙のデータが蓄積されるにともないこの効果の重要性（宇宙論的なシグナルでもありノイズでもある）は増す一方であり、今後の研究が大いに期待されるところである。

宇宙論的赤方偏移歪み 遠方にある天体の空間分布を観測すると、宇宙に存在する物質の非一様性がレンズとして働く。これは重力レンズ現象として周知の事実であるが、実は非一様性がなくてもある種の効果が働く。つまり宇宙の幾何学（空間曲率や宇宙定数の値）に依存して、観測される天体の空間的分布パターンが見かけ上歪んでしまうことが起こる。この事自身は、一般相対論的宇宙論の自然な帰結として予想されることであるが、はじめて明確に指摘したのは Alcock & Paczyński (1979) である<sup>30)</sup>。我々は、この現象が遠方クエーサー・銀河の相関関数に及ぼす影響を定式化し、宇宙論的赤方偏移歪みと名づけた<sup>31)</sup>。この効果は宇宙論パラメータの決定やバイアスパラメータの決定に利用することもできるという側面を持ち、将来の観測データへの応用を念頭においてさまざまな理論的研究が始められている<sup>28)</sup>。

現象論的銀河形成モデルとバイアス 銀河・銀河団の進化モデルはもちろん古くから研究がなされてきたわけであるが、それらはどちらかといえばいろいろなパーツを寄せ集めてきた現象論的な色彩が強い。これに対して、宇宙論的な初期条件に基づく合体進化を考慮にいれた銀河・銀河団の進化モデルの構築は、準解析的手法と呼ばれ、ここ数年脚光を浴びている。現在この分野をリードしているのはイギリス、およびドイツのマックスプランク研究所を中心とするいくつかのグループであるが<sup>32),33)</sup>、現在はまだまだ定量的な予言を行なうというよりは、方法論の完成と可能性を追求していると理解すべき段階である。しかしながら、今後は、従来の1ゾーンモデルにとって代わるべきものであることは間違いない。この方法と流体力学的シミュレーションを同時に解くことが銀河形成モデルとバイアスの研究において当面の目標であり、ここ数年でかなり現実化しそうな状況にある。

宇宙論的輻射輸送 ダークマターと天体との間をさらに突き詰めていけば、当然、基礎物理過程としては輻射輸送の問題にぶつかる。宇宙の再イオン化の時期やその物理機構の研究は典型的な例である。宇宙論的な文脈のなかで、輻射輸送まで取り入れた流体力学的な数値計算は最終的なゴールと言うべきであろう。5～10年スケールで考えたとき、理論家の目指すべき極めて重要な課題であり、筑波大学の梅村氏等のグループによる精力的な研究は注目に値する。

## 5 10年たつと、、

天文学においては、現在はもちろん、これから10年から20年程度は新たな観測的発見の洪水がある意味では約束されている感がある。COBE（近赤外線・電波）、IRAS（赤外線）、HST（可視、紫外、赤外）、ROSAT（X線）、ASCA（X線）、GRO（線）などに代表される観測衛星が広い波長域で、続々といずれ劣らぬ第一級の成果をあげてきたことは、天文学を良い意味でビッグサイエンスとして確立させた。さらに、宇宙論に関係した計画だけでも、SDSS、MAP、PLANCK、などは、ある意味では成果が保証されているといってもよかろう。このような風潮を受けて、宇宙論においては理論家と観測家の境界が非常に曖昧になっている。専門化・職人化がすすむ一方の科学の分野において、このような傾向はおそらくかなり例外的なものであり、宇宙論の学問としての発展形態がいかに健全であるかを如実に示していることは誇って良かろう。しかし、問題はその後である。

ビッグサイエンスが成立する条件は、つまるところ、必要な投資とそれから得られる利潤（科

表 3: *Expanding* the expanding universe.

次数	研究項目
0-th order	FRW universe cosmological parameters; $\Omega_0, \lambda_0, h$
1st order	linear perturbation theory of density fluctuations large-scale structure and CMB; $\sigma_8, T_{CMB}, \Omega_b, \beta$
2nd order	nonlinear gravitational evolution with spherical nonlinear model, N-body simulations ... formation and evolution of halos; $\xi(r, z), n(M, z)$
3rd order	evolution of baryons with hydrodynamical simulations including radiative processes formation and evolution of clusters; $\xi_{cl}(r, z), L(M, z), T(M, z), n(L, z), n(T, z)$
4th order	evolution (or <i>a priori</i> addition) of stellar components, radiation transfer, ... formation and evolution of galaxies, stars, planets, ...
...	
M-th order	origin of life; origin of species, biological evolution
...	
N-th order	understanding the human; evolution of intelligence, culture, civilization, social system, ...
...	
$\infty$	end of the universe

学的成果)とのバランスである。もっと現実的に言い換えれば、ある科学上の謎を解明するためにどの程度の資金投入まで国民に許してもらえるかである。一般的には、科学は進歩すればするほどそのゴールは難解となり(当事者はこれをより根源的な問題に迫ったと評するはずであるが)もはや専門外の人々の理解を越えてしまう。むろん考えようによっては、確かにテーマは無限に続き収束するとは思えない。宇宙論など、膨張宇宙の研究テーマを展開すればまだ極めて低次数の項のレベルに留まっているとさえ言える(表3)。一方、その謎解きを観測的・実験的に行なうために必要であると推定される予算はふくれあがるだけである。したがって、一般の人にとって投資に対して得られる“利潤率”は単調減少の一途のように見える。そのような状況に加えて、高齢化・少子化にともなう国民負担率の増加を考えれば、ビッグサイエンスがやがて頭打ちにならざるを得ないことは自明であり、米国のSSC計画の中止はその意味でも象徴的である。もちろん実際に重要なのは頭打ちとなるタイムスケールである。今の状況から考えて天文学において10~20年先は確実に保証されていると楽観できるが(つまり、私の停年ぐらいまでは安泰なので実際はどうでもいいのだが!)、100年先はどうなっているか。個人的にはかなり疑問である。

このような議論は、果たして科学(あるいは学問・文化)はどこまで進歩することが可能であるか、というもう少し高尚な問いかけにもつながる。おそらく人類の脳という本質的な限界ではなく、環境という外的な要因によって決まってしまうであろうというのが(あまり夢のない)私の意見である。そのような危機を乗り越えないまでも、少しでも科学の進歩の寿命を伸ばすために必要なのはやはり“多様性”であろう。自己反省も含めて言えば、やはりすべては栄枯盛衰なのであり、現在多くの研究者がむらがっているような分野は逆に10年、20年後どうなるかわからない。一人一人の研究者の立場から言えば、今誰も注目していないテーマに突き進むことはかなりリスクを伴うが、分野の全体の“種の保存”という見地からは、自然淘汰をクリアするためには、研究の方向ベクトルの多様性は本質的である。一方、インターネットに代表されるような情報化社会においては、ともすれば価値観が一元化される方向に働きやすいため、かなり意識的に気をつけていなくては多様性を保つことは困難であろう。

このような例に当てはまるかどうかはわからないが、かつてのロシアの科学はその経済状況に



かかわらず極めてオリジナルなものであったことも教訓的である。宇宙物理の理論においても、西側で注目を浴びた新しいアイデアや理論もよく調べてみれば、20年前にロシアの誰かがすでにやっていたという例は数多くある。ただし、これは必ずしもロシアの研究レベルが平均的に高かったことを意味するものではなく、なぜこのようなことをやるのか首をかしげるようなものもまた多かったという印象も事実である。流行に敏感な日本人とは全く異なる文化が底にあり、それが良くも悪しくもロシアの多様性を支えていたのかも知れない。いずれにせよ、ベルリンの壁の崩壊以降、ロシアもすでに情報化社会に汚染されている感があり（そもそも優秀な人材がほとんど外に流出してしまった）、ひょっとすると宇宙物理の“種の絶滅”を救ってくれたかもしれないロシアの研究の“多様性”も失われている。

ビッグサイエンスの宿命から考えても、宇宙物理には観測的なフィードバックとは関係なく、純粋に理論をガイダンスとして進まざるを得ない時期がいずれやって来ることは必然であろう。学問は進歩する段階においては、ある程度自然に発展するものであるが、いったん成熟した分野になってしまうと、学問的観点だけではなく、経済的および社会的さらには政治的な要素も色濃くなる。つまり、どのようにして学問分野を閉じてしまうかは極めて困難な課題である。多くの政府関連機関のように、設立当時の使命・役割を果たし終えても、自然消滅することは起こり得ない。つまり、ソフトランディングは至難の業である。その場合、宇宙物理が

パターン I ほとんどすべての重要な問題に答を見つけて栄誉ある終焉を迎える、

パターン II 数学のように、徐々にではあるが着実に理論的進歩を遂げることで少しずつ歴史的な難問を解決しながら半永久的に発展を続ける、

パターン III 重要な問題を多く残していながら、観測的にも理論的にも新たなブレークスルーを見出すことができず、もはや普通の問題意識とは遊離した重箱の隅をつつくような研究に終始するオタク集団としてほそぼそと生きながらえていく、

のいずれに落ち着くかを推測することは興味深いことであるが、私の能力を大幅に越えているからここで筆をおくことにする。

## 文献

- 1) Miyoshi, K., Kihara, T., 1975, PASJ 27, 333
- 2) Efstathiou, G., 1979, MNRAS 187, 117
- 3) Aarseth, S.J., Gott, J.R., Turner, E.L., 1979, ApJ 228, 664
- 4) Davis, M., Efstathiou, G., Frenk, C.S., White, S.D.M., 1985, ApJ 292, 371
- 5) Suginothara, T., Suto, Y., Bouchet, F.R., Hernquist, L., 1991, ApJS 75, 631
- 6) Suto, Y., Suginothara, T., 1991, ApJ 370, L15
- 7) Jing, Y.P., 1998, ApJ 503, L9
- 8) Couchman, H.P.M., 1998, in the Proceedings of "Numerical Astrophysics 1998", edited by S.M. Miyama et al., in press
- 9) Kaiser, N., 1984, ApJ 284, L9
- 10) Bardeen, J.M., Bond, J.R., Kaiser, N., Szalay, A.S., 1986, ApJ 304, 15
- 11) Geller, M.J., Huchra, J.P., 1989, Science 246, 897
- 12) Shectman, S.A., et al., 1996, ApJ 470, 172
- 13) Colless, M., 1998, Phil.Trans.R.Soc.Lond.A., in press (astro-ph/9804079)
- 14) Croom, S. M., Shanks, T., Boyle, B.J., Smith, R.J., Miller, L., Loring, N.S., 1998, in the Proceedings of "Evolution of Large Scale Structure: From Recombination to Garching", edited by Banday, A., in press (astro-ph/9810127)
- 15) Hamilton, A.J.S., Kumar, P., Lu, E., Matthews, A., 1991, ApJ 374, L1
- 16) Peacock, J.A., Dodds, S.J., 1994, MNRAS 267, 1020
- 17) Peacock, J.A., Dodds, S.J., 1996, MNRAS 280, L19
- 18) Gott, J.R., Weinberg, D.H., Melott, A.L., 1987, ApJ 319, 1
- 19) Matsubara, T., 1994, ApJ 434, L43
- 20) Matsubara, T., Suto, Y., 1996a, ApJ 463, 409
- 21) Kaiser, N. 1987, MNRAS 227, 1
- 22) Hamilton, A.J.S., 1998, in the Proceedings of "The Evolving Universe" ed. D. Hamilton, Kluwer Academic, pp.185-275
- 23) Hu, W., Sugiyama, N., Silk, J.I., 1997, Nature 386, 37
- 24) Kobayashi, S., Sasaki, S., Suto, Y., 1996, PASJ 48, L107
- 25) Kitayama, T., Sasaki, S., Suto, Y., 1998, PASJ 50, 1
- 26) Mo, H.J., White, S.D.M., 1996, MNRAS 282, 347
- 27) Matsubara, T., Suto, Y., Szapudi, I., 1997, ApJ 491, L1
- 28) Nakamura, T.T., Matsubara, T., Suto, Y., 1998, ApJ 494, 13
- 29) Yamamoto, K., Suto, Y., 1998, ApJ, submitted
- 30) Alcock, C., Paczyński, B., 1979, Nature 281, 358
- 31) Matsubara, T., Suto, Y., 1996b, ApJ 470, L1
- 32) Kauffmann, G., White, S.D.M., Guiderdoni, B., 1993, MNRAS 264, 201
- 33) Cole, S., et al., 1994, MNRAS 271, 781
- 34) Perlmutter, S., et al., 1997, ApJ 483, 565
- 35) Perlmutter, S., et al., 1998, Nature 391, 51

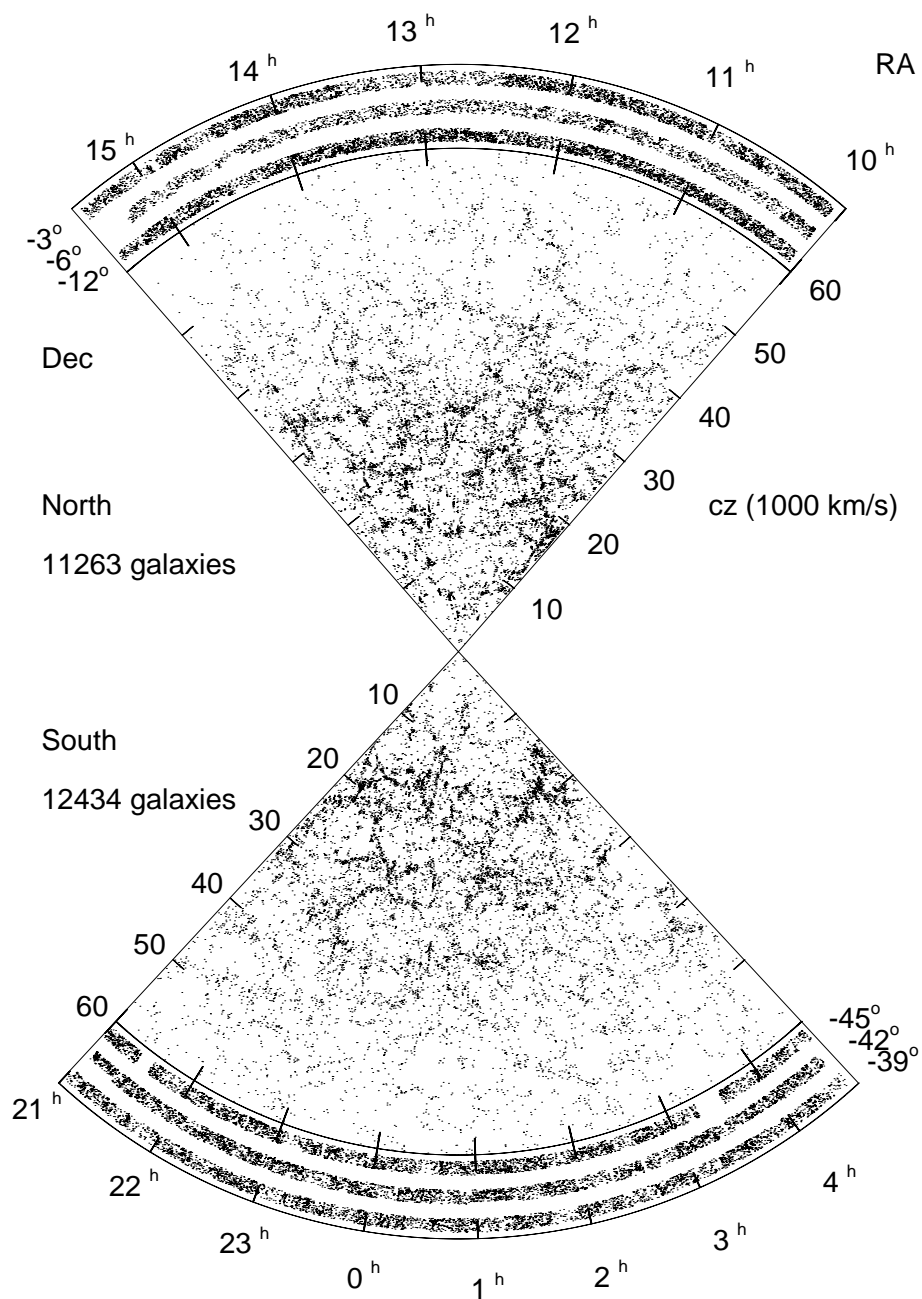


図 1: 銀河サーベイの進化 : (a) CfA サーベイ (文献 1 1), (b) Las Campanas Redshift Survey (文献 1 2).

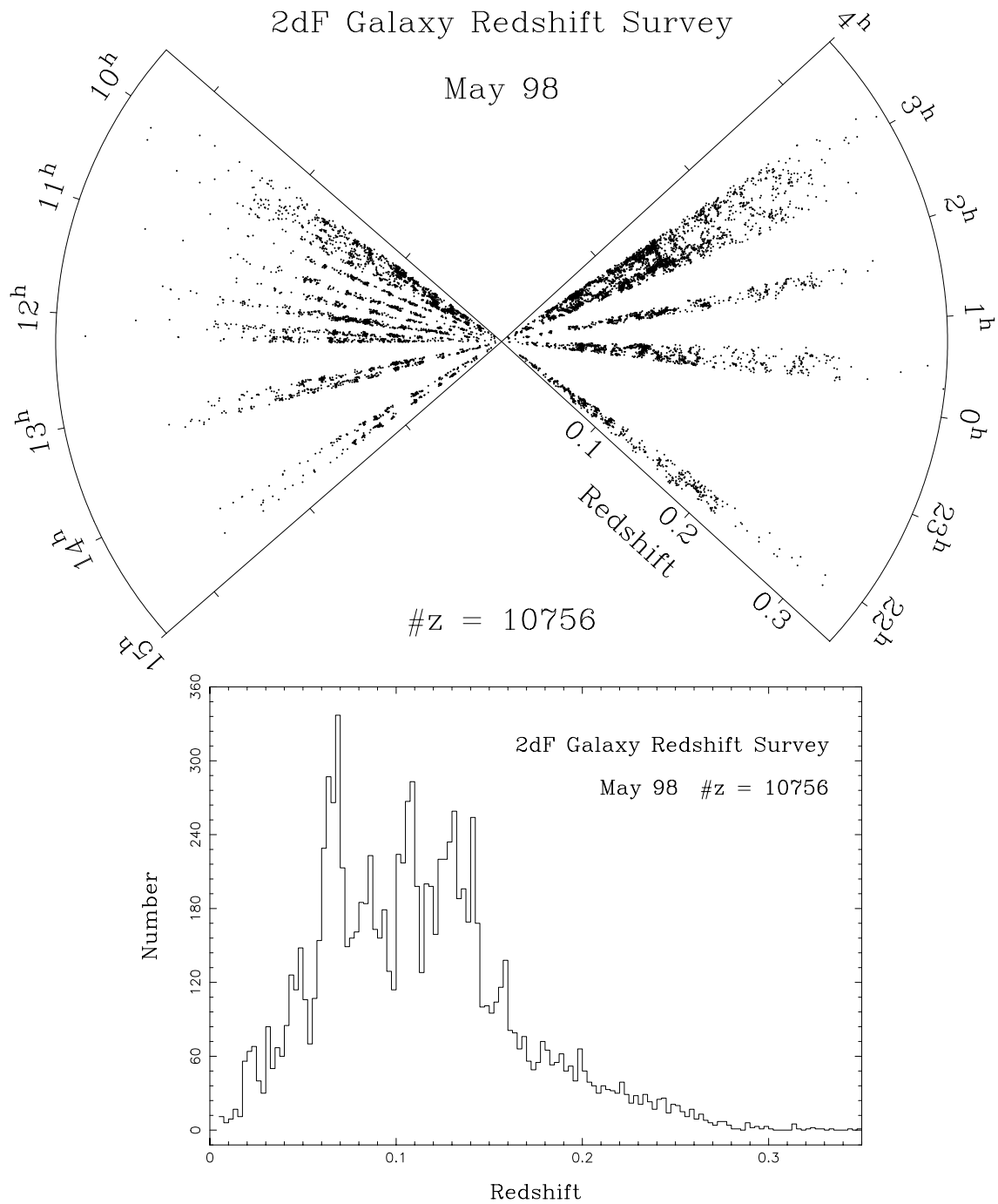


図 2: 2dF (Two degree Field) 銀河サーベイの現状 (文献 1 3 ): (a) cone diagram, (b) redshift distribution.

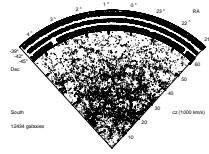


Fig. 1. The distribution of galaxies for all three stars in the 3rd galaxy red.

The 2dF QSO Redshift Survey - South

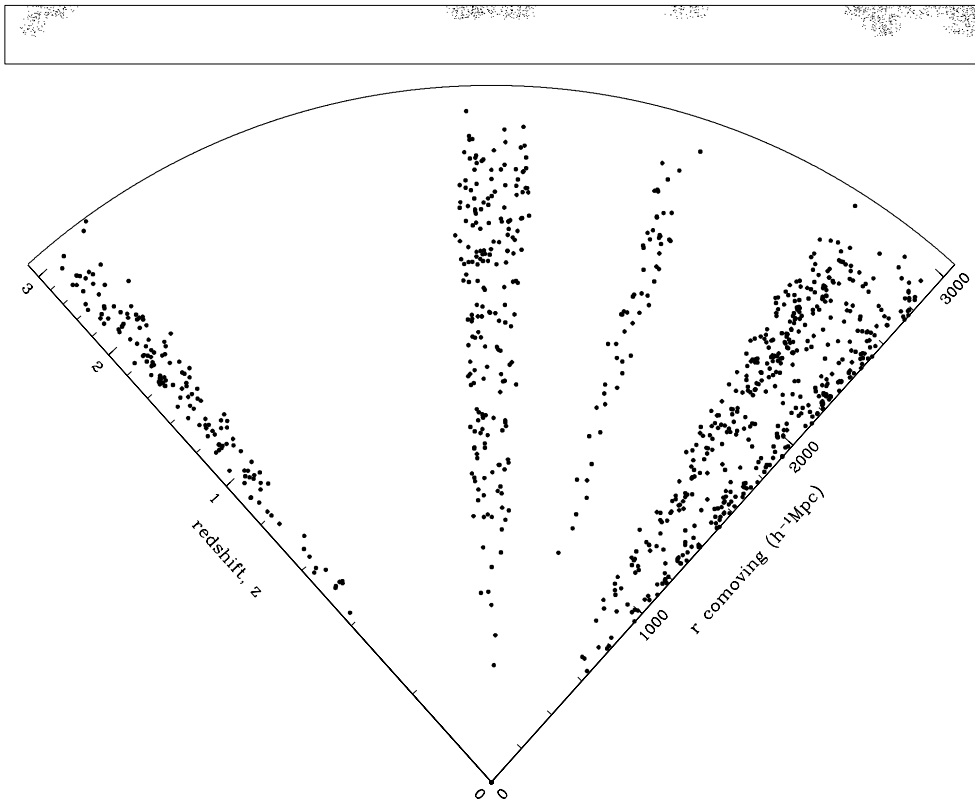


図 3: 遠宇宙サーベイ : (a) Las Campanas Redshift Survey (文献 1 2), (b) 2dF Quasar Survey (文献 1 4).

# Cosmological Light-cone Effect

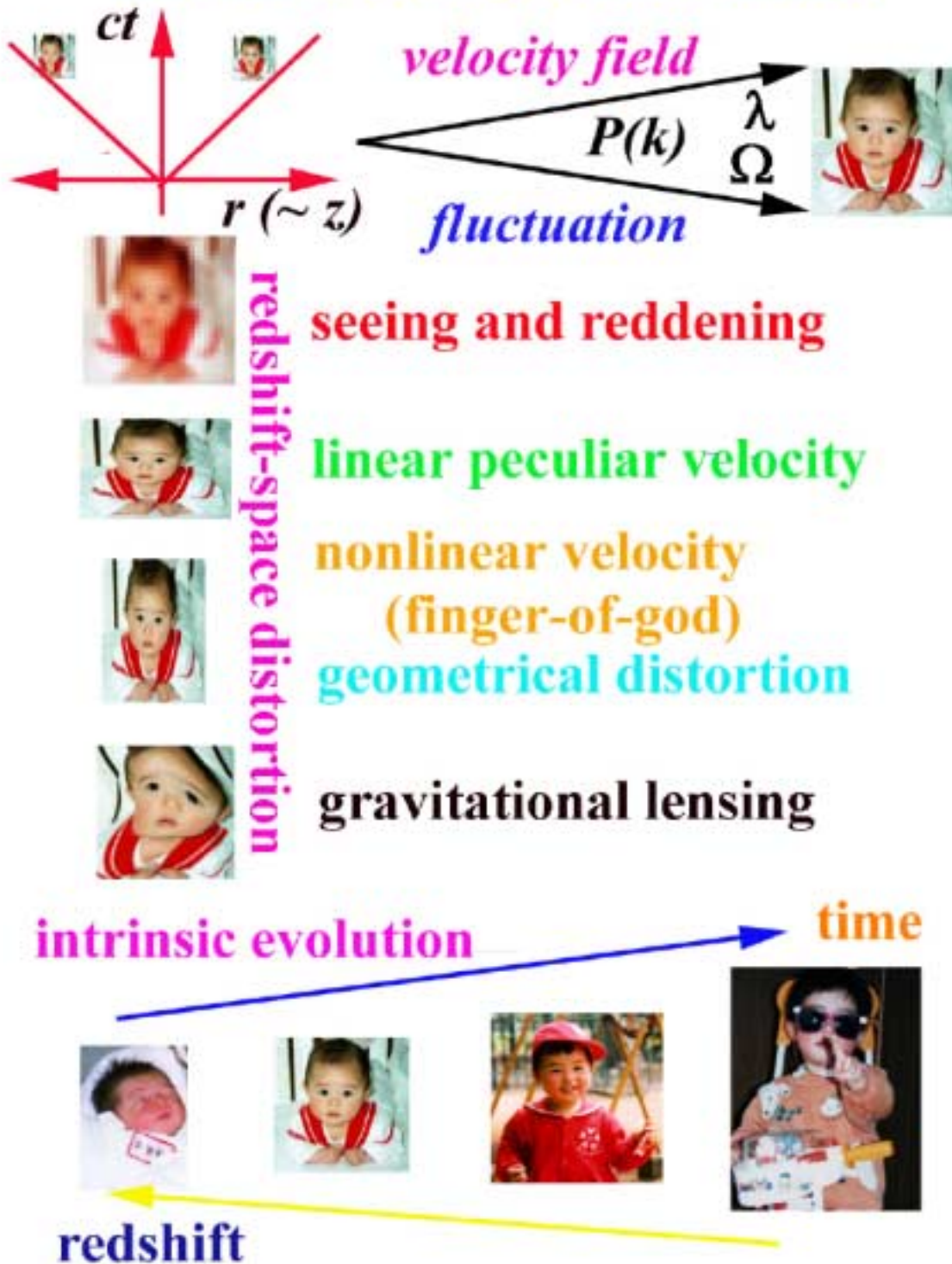


図 4: 宇宙論的観測にとまなう困難。