

## 宇宙マッハ数テストにまつわる雑文

須藤 靖\*

## 1. 前置き

光栄にも第2回日本天文学会若手奨励賞を頂いたため、天文月報編集部より、主たる授賞対象となった仕事<sup>1)</sup>について、解説記事を書くように依頼を受けた。実はこの内容については、すでに文章を書いていることもあり<sup>2),3)</sup>、一度はお断りしたのであるが、これは授賞者の必修科目であるとのこと。したがって、学問的な内容ではなく、その研究の背景ともいべきものについて書くということで、編集部の方には了解して頂いた。申し訳ないが、個人的な話も多く興味を持って頂けない方もいらっしゃるかもしれない。軽く読み流してもらえば幸いである。

## 2. 研究の発端と概要

この研究“The Mach Number of the Cosmic Flow: A Critical Test for Current Theories”は、プリンストン大学の Jeremiah P. Ostriker 教授との共同の仕事である。彼は、天文学関係の方ならおそらくご存知のことと思うので、いまさら紹介の必要もなからう。私は、以前からいくつかの会議で彼を見かけたことはあったが、個人的に話しかけるほどの勇氣は持ち合わせていなかった。彼と議論する機会を得たのは、1988年1月の Taos での銀河形成に関するワークショップの際である。当時、私はカリフォルニア大学バークレー校天文学教室の博士研究員、ひらたくいえばポスドクであった。彼はこの会議で私の発表した内容<sup>4)</sup>については少し興味をもってくれたようで、いろいろと議論したことを覚えている(ところでこの会議の様子は、文献5と6に詳しい)。ついでに、“何故、日本人はほとんどアメリカにポスドクとしてこないのか”、“では何故おまえは来たのか”、“どうして、例えばプリンストンでなく、バークレーに決めたのか”等、彼一流の旺盛な好奇心からの、矢継ぎ早の質問も受けたものである。その後、1988年4月に東大山上会館で行われた山田コンファレンス“Big Bang, Active Galactic Nuclei and Supernovae”の際、彼から夏に1週間ほどプリンストンに来ないかと言われ、喜んでOKした。

1986年にいわゆる“七人の侍”に]よる楢円銀河の peculiar velocity field の観測結果が公表され、宇宙の大

規模流の存在が注目されるようになった。これは、事実であれば、宇宙の構造形成の理論を強く制約するものである。例えば、標準的とされる冷たい暗黒物質によるモデルでは、そのような大きな速度場は説明できない。無論、観測的にはこの大規模流の存在が完全に確立したとは言いがたいが、理論屋はこれを種にしていろいろな可能性を考察した。一方、Ostriker 氏達は観測データそのものを解析し直してみたところ、速度場から共通の大規模流を引き去った後の速度分散が非常に小さくなることを見いだした<sup>7)</sup>。このことは、仮に我々のマイクロ波放射に対する速度の推定が誤っている、とすれば大規模流は単なる見かけ上のものになってしまうことを意味する。ところが、ドップラー効果にもとづくマイクロ波放射の双極子成分の観測<sup>8)</sup>にはそういった誤りの余地はなさそうである。とすれば、逆に大規模流の存在のみならず、それ以外の速度分散が小さい、すなわち我々の宇宙の速度場が“冷たい”ことを宇宙論的なテストに使えないであろうか、と彼は考えたらしい。そこで宇宙の大規模流について、いくらか仕事をしていた私に話を持ちかけてきたようだった。

私は、その年の4月から茨城大学の助手に就任したばかりであったが、夏には3ヶ月間バークレーに滞在しており、プリンストンにはサンフランシスコから夜行飛行機で到着した。ほとんど、睡眠もとれないままプリンストンに朝早く着いたのだが、いきなり Ostriker 氏との議論が始まった。さすがに、昼食もとり午後3時頃になると猛烈な睡魔に勝てず、後の議論は翌日ということにしろもらい、天文台のアパートでひたすら眠ったことを記憶している。次の日は、彼とあだこらだと、いろんなことを思いつき放題議論したが、その夜、一人で落ちて着いて考えてみると、線形理論の範囲内では、欲しい式は実に簡単に表すことができることに気がついた。翌日それを説明しながら、余りにも簡単な結果にささか不安気な私に対して、彼は喜んでくれた上、“複雑なことはいくらかでも間違え余地がある。もともと簡単な結果なら、間違いがあればすぐに気がついてはいるはずである。多くの場合、正しいことはひどく簡単なものだ”といった意味の訓辞まで下さった。まさかいまさら奨励賞を返せとはいわれないただろうから、どんなに簡単であったか種明かき(?)しても良いであろう。

解くべき問題は、次のようなものである。銀河の空間的な個数密度のゆらぎのパワースペクトル  $P(k)$  が与え

\* 京大基礎物理学研 Yasushi Suto: An Essay on the Cosmic Mach Number Test

られているとする。この宇宙の中に仮想的に半径  $r$  の球をとり、その中に存在するすべての銀河の速度場を観測したとする。この時、この球の質量中心の速度の期待値  $v(r)$ 、及び、その重心系からみた個々の銀河の速度分散の期待値  $\sigma(r)$  はいくらであるか？

実は前半については、すでに次の結果が知られていた<sup>9)</sup>。

$$v(r)^2 = \frac{\Omega^{1.2} H^2}{2\pi^2} \int_0^\infty P(k) W(k, r) dk. \quad (1)$$

ここで  $W(k, r)$  はゆらぎのパワースペクトルから、高周波成分を取り除くローパスフィルターの役割をする。普通は、簡単に  $W(k, r) = \exp(-k^2 r^2)$  と近似して良い。 $\Omega$  と  $H$  は、宇宙の密度定数、およびハッブル定数である。誰でも思いつくことではあるが、私は次のように考えた。球の半径  $r$  を無限小にして、その中に銀河が一個だけしか入らないようにする。この時の平均的全速度分散、 $V$  は、上記の  $v(r)$  と  $\sigma(r)$  との2つの寄与からなるが、両者が無相関であれば、

$$V^2 = v(r)^2 + \sigma(r)^2 \quad (2)$$

が成り立つはずである。 $V$  は  $v(r=0)$  に他ならないから、式(1)と(2)より線形理論の範囲で、

$$\sigma(r)^2 = \frac{\Omega^{1.2} H^2}{2\pi^2} \int_0^\infty P(k) [1 - W(k, r)] dk \quad (3)$$

を得る。物理的にいうと、速度分散は  $r$  よりも短波長の密度ゆらぎによって生成される事を反映して、ハイパスフィルターとして  $1 - W(k, r)$  が入っているわけである。実に単純であることがおわかり頂けたであろう。

ところで、宇宙論のシナリオ— $\Omega$ ,  $H$ , 暗黒物質の種類、宇宙初期の原始密度ゆらぎのスペクトル—を決めると、線形理論の範囲内では  $P(k) = A f(k)$  と書いたときの関数形、 $f(k)$  は定まる。しかしその振幅  $A$  はこのままでは決まらない。従来の宇宙論的テストでは  $A$  を何らかの方法、通常は銀河2体相関関数、を用いて規格化する。しかし、 $P(k)$  は本来、暗黒物質の空間分布のゆらぎのスペクトルなのであり、それが光っている銀河の分布とどう関係しているかは銀河形成のモデルに強く依存する。これが観測から得られた  $v(r)$  と、式(1)の理論値を比較する上での本質的な困難であった。そこで我々は、 $v(r)$  あるいは  $\sigma(r)$  そのものではなく、その比をとることを考えた。こうすれば、分子分母に共通の  $\Omega$ ,  $H$ ,  $A$  はすべて打ち消してしまい、基本的に  $f(k)$  さえわかればすべて計算できる。実際には  $f(k)$  の関数型は  $\Omega$ ,  $H$ , 暗黒物質の種類に依存しているため、こうして得られた  $v(r)/\sigma(r)$  を観測と比較することによって、そのシナリオの正否が調べられるはずである。

この比は、線形理論で得られた  $f(k)$  を用いて、簡単な数値積分をすれば求められるが、短いプリンストン滞

在中ではそこまではできなかった。そこで私は、すでに出版されている論文のいくつかから  $v(r)$  の値を表にして、それに基づいて  $v(r)/\sigma(r)$  を推定してみた。その結果、理論値と観測値<sup>7)</sup> は、冷たい暗黒物質のモデルの場合、なんと5倍以上の違いであることがわかった。我々がこの結果に大いに気を良くしたのは、言うまでもない。しかし同時に、次に何をやるべきであるかは承知していた；考え得る批判からこの結果を擁護し、正当化しなくてははいけない。予想される論点は、(i) 観測が視線方向の速度しか無いことによる効果、(ii) 銀河が暗黒物質の質量分布を忠実に反映していない可能性、(iii) 統計的な有意度、(iv) 非線形性の効果、(v) 銀河が離散的であることによるサンプリング効果、(vi) 観測データそのものの再検討、等である。これらを今後の課題として、私は日本に帰ってきた。

Ostriker 氏は、その秋から4ヶ月間イタリアのフィレンツェ天文台に滞在していたので、その後の共同研究は FAX と e-mail を用いて行われることになった。実際、この2つの武器がなければ日本とイタリアの間での共同研究など進み得なかったであろう。便利な世の中である。しかしながら、茨城大学では当時ワークステーションを導入したばかりであり、まだ計算機環境は良くなかった(現在では、石塚俊久教授らのご尽力で LAN が整備され、またマッキントッシュも導入されており、随分と研究環境が良くなっているようである)。そのため、私はほとんど毎週末、高エネルギー物理学研究所に車で出かけて行き、計算をしてはグラフを書きにくるといった具合であった。最終的には、上記の6つの問題点等がある程度検討し、私が1989年の2月より1ヶ月間、再びプリンストンに滞在し、様々の修正を重ねた上で論文を完成させた(最終稿では、式(1)~(3)に比べると、いくらか補正を加えた複雑な形<sup>1)</sup> になってはいるが、本質は以上で尽きている)。ちなみに論文投稿の際、Ostriker 氏は Editor に宛てた手形のなかで、次のように書いている。

The paper is likely to be the most controversial one that I have submitted to you since the one with Peebles and Yahil in 1974 (in which we proposed dark matter halos around galaxies), because it examines critically a very popular set of theories for the origin of large-scale structure. Because of that, we have attempted to write it with great restraint, but I suspect that it will nevertheless outrage some referees. —(以下略)—

この仕事の要点はそのアイデアにあり、Ostriker 氏の役割が本質的であるのは言うまでもない。私は、良い時期に彼と仕事する機会を得、自分なりの貢献が出来たことを幸運であると思っている。ところで、 $\sigma(r)$  が乱雑な

熱運動に対応することからこれを音速とみなし、 $v(r)/\sigma(r)$ を“宇宙マッハ数”と名づけたのも彼である。その後のいろいろな研究( $N$ 体数値実験による非線形性の効果・統計精度の問題<sup>11)</sup>宇宙マイクロ波輻射の等方性との関係<sup>12)</sup>)を経て、今では(vi)の問題(これは理論屋の立場では責任を回避できると思うが)を除くと全ての批判をクリアすることがわかった。結論としては、かなり慎重に保守的な見方をしたとしても、いわゆるインフレーション理論に基づく宇宙の構造形成論の重大な困難を指摘したものであると考えている(詳しくは文献1~3, 11~13を参照されたい)。最終的には、より精密な速度場の観測が、これらの結果をより信頼できるものにしてくれることを期待している。

### 3. プリンストン大学宇宙物理学教室

以前、パークレーの天文教室のことを書いたことがあったが<sup>13)</sup>、それと比較の意味で少しプリンストンのことも書いておこう。ただ私は、プリンストン大学宇宙物理学教室には今まで計3回で合わせて3ヶ月足らずの短期滞在であったため、以下の記述に正確さを欠いているところがあることをお許し願いたい。Ostriker氏以外にも、この教室には例えば、宇宙論関係で言えばJ. Gunn, E. Turner, N. Bahcallと言ったお歴々が顔を連ねている。大ざっぱに数えたところスタッフ10人、大学院生とポスドグが合わせて15人といったところであろうか。中国、韓国からの大学院生の割合が比較的多いようだ。

火曜日の午後に教室のコロキウム、水曜日に昼食会が行われている。それ以外に、毎週火曜日のお昼にInstitute for Advanced Studyの食堂の一室で、プリンストンの、物理教室、宇宙物理学教室、Institute for Advanced Studyのメンバー(通常、ポスドグ以上)及び滞在者が一同に会する。Tuesday Lunchとよばれる集まりがある。部屋の前列の席には、J. Bahcall氏をはじめJ. Gunn, E. Turner, J. P. Ostrikerといった偉い人々が鎮座しており、私のような下っ端は出口に近い末席を占めている。しかしなぜか、Peebles先生は、後ろの席がお好きなようである。ここでは、J. Bahcall氏の司会のもとで最近の宇宙物理学関係の話題が紹介されたり、出席者の誰かが研究結果をしゃべったりする。暗黙の了解として、黒板の類は使ってはいけないというきびしい掟があり、それを知らずに黒板で説明しようとして歩き出した短期滞滞在者が、大声でたしなめられるということもあったそうである。この場では、昼食をとりながらという体裁であるにもかかわらず、かなりきびしい批判的な議論ができることも多く、そのうえ、宇宙関係の一流どころの前で話をするわけであるからかなり緊張する。我々

の結果もこのTuesday Lunchで発表したのであるが、この際はOstriker氏がおもに説明してくれた(彼も私の英語ではこの場を切り抜けられないと思ったのかも知れない)。その場ですぐ、いろいろな質問や意見が噴出し、私がおもにそれに答えて防戦する役にまわったが、それが終わったときにはかなり精神的に疲れてしまったのを記憶する。これだけの数の一流の研究者達を毎週集められると言う状況は、日本ではもちろん他の場所でも不可能に近く、プリンストンならではの感がある。

私の3度のプリンストン滞在は、1988年8月、1989年2月、1990年2月と、いずれも気候的にはほぼ最悪に近い時期であった。パークレーと比べて完全に劣っているのは、この気候の悪さと、“田舎度”である。例えば、キャンパスから歩ける距離のレストランの数でみれば、10倍の開きがあると言っても誇張ではないと思われる。実際私にとっては、パークレー生活のおかげで忘れていた、きびしい暑さや寒さ、と飢餓感をまざまざと思い出させてくれる苦しい日々であった(?)。学生などは、“学問をしたければプリンストンに來い。それ以外には何も無いところであるから”、といった諦め混じりの冗談を言っている。無論、バスで1時間半程度かけるとニューヨークに行けるわけで、それほどひどいとはいえないのかもしれない。

宇宙物理学教室では、基本的に学生一人に一部屋が与えられており、かなり恵まれている。計算機は従来はVAXの上でUNIXを使用していたが、1990年3月からSUNに機種変更した。スタッフは自分の部屋にワークステーションを持っていることが多い。学生の部屋以外は、すべての部屋に端末が備えられている。この教室では、(Ostriker氏の意向もあり)今後、数値シミュレーションを重視していこうとする方針があるようで、教室でCONVEXというミニスーパーコンピュータを所有しており、かなりの計算はこの機械上でなされている。天候のせいであろうか。大学院生が大学にでてくる時間はパークレーに比べると、二時間遅く、朝10時頃のようなものである。Ostriker氏は朝8時か遅くとも9時にはできてきているが、chairmanとしての仕事が忙しく、部屋の電話は鳴りっぱなしに近い。したがって、昼間は議論してもせいぜい20分か30分のこまぎれであることが多い。そのせいであろう、彼は夕方6時頃、いったん家に帰った後、夜8時頃また大学に現れ11時、時には12時頃まで研究する、というのが常であるようだ。土曜、日曜にも午後にはできてきていることが多い。そのため、彼とじっくり議論できるのは夜に限られる。驚いたことに、学生も夜9時、10時に議論するアポイントメントをとっているらしく、その時間に私が彼のオフィスで議論していると学生が顔を出して、“10分ぐらいしたらまた

来るように”，などと言われたりしていた。とにかく彼は、バイタリティーの塊のような人物であり、物理の議論をすることを心から楽しんでいるようだ。私は、彼の物理に対する豊かな視点に多くを学んだとともに、その研究スタイルにも、大いに感服させられたものである。良きにつけ悪きにつけ、彼の個性がこの教室に強い影響を与えていることは、紛れもない事実であろう。

#### 4. 終わりに

いまや外国に旅行することは、相対的にさほど高くつくものではない時代になった。私は、大学院生諸君には小さなワークショップならば自費を出してでも参加することを勧めているが、海外での大会議に参加することには、決して賛成しない（むろん観光が第一目的の場合はこの限りではない）。結局、ただ単に参加したというレベルで終わってしまう可能性が高いからである。私の場合がいい例になるのかどうかはわからないが、個人的には Taos でのワークショップに出席できたことが好運であったと思っている。大会議ではとても近寄って話すことなどできない人であっても、少人数で3食をとともにする形式では割合気楽に知り合いになれるからである（さらに言えば日本人はほかに誰もいない状況が望ましい）。この意味では、宇宙論を例にとると、Aspen や Moriond で定期的に行われているワークショップ等が、コストパフォーマンスが高いものと思われる。幸か不幸か、宇宙物理学は、国際的な学問分野であり、外国での研究状況がある程度頭に入れておくことは必要であろう（行き過ぎると、単に外国の流行を追っているだけのオリジナリティを欠いた研究になる危険性があることは、言うまでもないが）。

もないが）。

最後に、私のようなものが今回、名誉ある賞を頂けたのは、多くのすばらしい先輩や共同研究者の方々のおかげにはかならない。高エネルギー研究所の理論部の方々には、この研究のための場所を提供してもらい、また計算機の利用を認めて頂いた。ここであらためて、公私にわたり今でもお世話になり続けている大学院時代の恩師の佐藤勝彦先生、パークレー滞在時にお世話になった Joseph Silk 氏、本研究の共同研究者である Jeremiah P. Ostriker 氏に心からの感謝の意を表させて頂いて、結びとしたい。

#### 文 献

- 1) J. P. Ostriker and Y. Suto: *Astrophys. J.* **348** (1990) 378.
- 2) 須藤 靖: *パリティ* **5** (1991) 10月号, p. 32.
- 3) 須藤 靖: *日本物理学会誌* **46** (1991) 印刷中.
- 4) Y. Suto, K. Górski, R. Juszkiewicz, and J. Silk: *Nature* **332** (1988) 328.
- 5) 須藤 靖: *日本天文学会誌* **81** (1988) 161.
- 6) P. J. E. Peebles and J. Silk: *Nature* **335** (1988) 601.
- 7) E. J. Groth, R. Juszkiewicz and J. P. Ostriker: *Astrophys. J.* **346** (1989) 558.
- 8) 例えば, P. Lubin, T. Vilella, G. Epstein and G. Smoot: *Astrophys. J. (Letters)* **298** (1985)L1 を参照のこと.
- 9) M. Clutton-Brock and P. J. E. Peebles: *Astron. J.* **86** (1981) 115.
- 10) Y. Suto: in *Proceedings of the Third Nishinomiya-Yukawa Memorial Symposium*, Edited by H. Sato and H. Kodama (Springer-Verlag, Berlin, 1990), p. 63.
- 11) Y. Suto and M. Fujita: *Astrophys. J.* **360** (1990) 7.
- 12) Y. Suto, N. Gouda and N. Sugiyama: *Astrophys. J. Suppl.* **74** (1990) in press.
- 13) 須藤 靖: *日本天文学会誌* **80** (1987) 201.

#### お 知 ら せ

##### 琉球大学教官公募

1. 職名及び人員 助手 1名
2. 専門分野 物性実験.  
光物性(量子エレクトロニクスを含む)  
又は磁性の分野の方が望ましい。
3. 職務の内容 学生実験、演習を担当する。低温センサーの運営に協力する。
4. 応募資格 地方大学の置かれている状況をよく理解できる方。  
博士の学位を取得しているか又はこれに準ずる方。  
30歳前後の方が望ましい。
5. 着任時期 平成3年4月1日を予定。

##### 6. 提出書類

- (1) 履歴書
- (2) 推薦書
- (3) 研究業績リスト及びその別刷り又はコピー
- (4) 教育及び研究に対する抱負 (1200字以内)
- (5) 健康診断書

##### 7. 公募締切期日

(1) 平成3年2月15日(金) (必着)

(2) 封筒に「公募書類在中」と明記して、簡易書留便で送付して下さい。

##### 8. 応募書類の提出先及び連絡・問い合わせ先

〒903-01 沖縄県西原町千原1番地

琉球大学理学部物理学科

主任 嘉手納用和

☎ 09889-5-2221

内線 2632 (研究室) 2634 (物理学科事務室)