

銀河形成論周辺：最近の動向

須 藤 靖*

1. まえおき

1988年1月3日から9日まで、New Mexico州、TaosのSagebrush InnにおいてLos Alamos Galaxy Formation Workshopが行なわれた。このworkshopにはアメリカにおけるこの分野の主たる人々がほぼせいぞろいし、今後の動向をさぐる上で重要なものであった。日本からの参加者はなかったため、この分野周辺に関心をお持ちの方々のためにこの場をかりてこの会議の内容を紹介させて頂きたいと思う。ただ一つ一つの発表について少しずつ説明を加えていくというスタイルでは退屈でもありあまり有益とも思われないので、全体として今何が問題になっているのか、という観点から述べさせて頂こうと思う。このため必然的に記述が一部主観のかなり混入したものになるかもしれない点をお断りしておく。またなるべくinformalな部分を取り上げようとしたため私の力量不足に基づく誤解があるかもしれないがそれらについてはすべて責任は私にあることを明記しておく。

2. Workshopの概要

当初35人までにおさめる予定の参加者は、結局50人弱にまで増えてしまった。それでも参加者は原則として全員1人20分のpresentationを割り当てられた。他にはLos Alamos Center for nonlinear studiesのnonlinear dynamicsの専門家2人によって各々1時間ずつchaos, nonlinear phenomenonについてのreview talkがあり、最後には2時間以上わたる、銀河形成論を中心としたdiscussion sessionが行なわれた。会議は毎日8:30~11:45のmorning session, 5:00~7:00のevening sessionからなり、その間はinformal discussionという名のskiing sessionである。(この“informal discussion”が好評のあまり、2日目以降のevening sessionは5:30からに変更となった。)会議の細分にしがたって各人の発表の内容を分類してみると次の通りになる。

(i) Formation of Galaxies and LSS (Large Scale Structure)

CDM (cold dark matter) モデルに基づく N 体計算 [Dekel, White], merger [Barnes, Quinn, Zurek], dissipative effect [Ryden, Fall, Carlberg], IGM (intergalactic medium) [Bajtklik, Hogan, Shapiro],

Star Formation [Silk, Wyse], 他 [Peebles, Charlton, Meiksin, Villumsen, Ostriker]

(ii) Cosmic Strings

Superconducting cosmic string & explosion [Thompson, Ostriker], large-streaming velocity [Melott, Shellard], network evolution [Benett & Bouchet], [Turok, Hindmarsh]

(iii) Very Large Scales, Streaming and CMB (cosmic microwave background)

Large-scale flow 観測 [Burstein, Strauss & Davis], large-scale clustering 観測 [Burns & Gregory], large-streaming velocity モデル [Bertschinger, Juszkiewicz, Górski], CMB anisotropy [Partridge, Suto, Schaefer, Stebbins]

(iv) Dark Matter and Cosmology

Cosmological constant [Mottola], monopoles, strings [Haws, Mitchell], dark matter detection [Raby & West]

このように列挙しても専門家以外の方にはびんとこないであろうし、興味もわかないことであろう。以下、主なトピックにしぼって説明を加えよう。

3. 今、何が問題になっているか

(i) Large-Scale Streaming Velocity

これは最近議論的となっているテーマでありすでに御存知の方も多いと思うが、まず簡単に現在までの歴史を説明しておこう。1976年、Rubin et al. は $z \sim 0.02$ までの96コのSc銀河を用いてHubble flowに約1割程度の非等方性があることを見出し、これはLocal Groupのpeculiar velocityに起因するものであると結論した。その後Smoot et al. によってCMBのdipole momentの測定からCMBに対するLocal Groupの速度が得られたが、その方向はRubin達の得たものとはほぼ逆向きであった。このことはRubin達の結果はむしろreferenceに使った銀河がCMBに対して一様に運動していると解釈しなおすべきであることを示唆する。ところがHart & Davies (1982) の84コのSbc銀河を用いた解析がLocal Groupの速度として、CMBから得られたものと一致したことから、いわゆるRubin-Ford効果は彼女達の用いた銀河サンプルに問題があると考えられてきた。

ところが、2、3年前よりいくつかのグループ、特に

* カリフォルニア大学バークレー天文学教室 Yasushi Suto:

“七人の侍”というニックネームをつけて呼ばれる Burstein と 6 人の共同研究者の精力的な解析によりこの Rubin-Ford 効果が再確認されている。Burstein 達は 400 コの楕円銀河を用いて、60 Mpc 程度のスケールで Hubble flow の 1 割～600 km/s ほどのコヒーレントな速度場の存在を結論している。彼らはこの速度場の原因として遠方に巨大な質量をもった構造の存在を仮定し、Great Attractor と呼んだ。実際七人の侍の 1 人である Dressler は Great Attractor を発見したと最近報告した (preprint)。一方 Strauss & Davis は IRAS 銀河の redshift survey の結果より、それらの密度分布だけから推定される速度場を計算し、その結果が七人の侍のものとはほぼ一致するという preliminary な発表を今回行った。つまり彼らの結果は必ずしも Great Attractor がこの速度場の原因ではないということの意味するものと考えられる。

さてこの観測が事実であるとすれば、宇宙の大規模構造形成理論に与える意味は実に大きい。我々が従来考えていたスケールよりも一まわり大きいスケールでの構造の存在が必要となるからである。例えば今のところ最も成功しているとされる CDM (cold dark matter) モデルでは大きなスケールの構造をつくることは難しく、LSSV の存在はこのモデルにとって致命傷である。例えば Juszkiewicz は、Dressler の発見したとする Great Attractor のような構造が CDM モデルで出現する頻度は、Hubble volume に 10^{-8} コ程度しかないと発表した。

しかしながら、観測の状況は、速度場の大きさ、コヒーレントスケール、Great Attractor の存在、それらの解釈といずれも流動的であると言うべきである。このスケールは線形理論の適用範囲内であり宇宙の構造形成の初期条件の痕跡をそのままとどめている可能性もあり、研究の余地は多い。Burstein は今回の発表の最後で自らの bitnet address を公表し、希望者には彼らのデータを直接 bitnet mail で送ってくれる旨をつけ加えた。全く独立なグループによるデータ解析を歓迎するとのことである。いかに自分達の解析に自信を持っているかということの表われであろう。(実際彼は 20 分の割当てだけでは到底説明できないとして、4 日目の夕食後 9:30 より informal session として自分達の結果をえんえんと発表した。私はスキー疲れにより 30 分ほどできりあげたが、3 割程度の人が 12:00 近くまで参加していたとのこと。肉食人種の体力を見せつけられた。) 日本でも興味のある方はトライしてみたいかがであろうか? またこの例からもおわかりのように今後コンピュータメールの研究においてはたす役割はますます重要になるのは明白である。日本における天文研究機関間のコンピュータ網の整備、国際網 (bitnet, DECnet, CSnet 等) との接続は急務

である。

(ii) N 体数値実験

上記の LSSV を除いては、おおむね CDM モデルは観測をうまく説明できるとされている。これは主として DEFW (Davis, Efstathiou, Frenk, White) の 4 人組の精力的な N 体計算の結果によっている。例えば彼らの論文のグラフをみると、CfA redshift survey で得られている void-filament 構造が CDM モデルでみごとに再現されていることがわかる。ところが CDM モデルのゆらぎのスペクトラムにはもともとこのような長波長側に特定のスケールは含まれておらず、この構造の形成される物理的理由は明確でない。このことは誰でも持つ疑問であるが、最近 Peebles はこの点に関する彼の疑問・意見を、 N 体計算の研究者 20 名弱らに公開質問状の形式で提出した。この Peebles 書簡では、初期条件の設定 (特に Zel'dovich 近似の正当性)、離散化にともなう効果等が論じられているが正否は定かではない。今回も White が Peebles の疑問に答えるべく様々なテストを行ないつつあること、及びその一部の結果を発表した (少なくとも離散化にともなうものではないことは示し得たとの旨である)。幸か不幸かスーパーコンピュータ等の普及度にもかかわらず、宇宙論的 N 体計算にとり組んでいる研究者は日本には見あたらないが、今後 N 体計算が理論を検証する時代になることは間違いなく、この方法の正当性・限界についての基礎からの問いかけは今まさに必要とされている。むろんさらに大切な問題は、void-filament 構造等、宇宙のトポロジーを定量的に示す指標を見出すことにある。現在用いられる銀河間二体相関関数ではこのような構造を正しく反映できないのである。

(iii) Cosmic String

宇宙初期の相転移の結果として存在する可能性が指摘されている cosmic string は、そのアイデアのおもしろさ、様々の予言ゆえにある種の研究者 (なぜか Fermi Lab. に集中している) を魅きつけている。今回も string + CDM による N 体計算、LSSV の計算、network の形成、CMB への影響、さらには superconducting cosmic string を explosive シナリオの種にしようとする話まで数多くの発表がなされた。いまや cosmic string は銀河の種のみならず論文の種といったところ。

ただ個人的な意見としては、天文の方々がこのような exotic model にこれからとり組むことはおすすめしかねる。すでに相当の宇宙物理的応用がなされており (大半は本当に正しい結果であるかは疑いのであるが)、これ以上細かくやってもという気がするからである。確かに $\delta T/T$ 、重力波、重力レンズ等おもしろいほどの予言能力を有しているモデルではあるが、あくまで演習問題と考えておくべきであり、そういう意識の下であればけっこ

うであるが…… (このモデルをいじっている人のほとんどが同時に正統的な宇宙論(?)を行なっていることは忘れてはならない)。

(iv) 星形成-銀河形成-gas dynamics

今回の workshop の題名もそうであるが、普通、銀河形成論と呼びならわされているものの多くは、線形理論におけるゆらぎの成長であるとか、 N 体計算のように非線形であっても重力だけしか考慮していない dissipationless な部分をさしているに過ぎないようである。何をもってして銀河の誕生とするかは難しい問題であるにしてもとにかくこれだけでは銀河形成論などと言うにはおそまつである。本当の“形成”を論じるには種々の物理過程による散逸効果を取り入れることは不可欠であり、その方向の発表も割合めだったように思う。またそのためにはどうしても星形成の問題も独立ではなくなってくるわけで現在のところ未解決のことだらけという感である。今回の workshop での共通認識は今のところ gas dynamics を考慮しての計算はいずれも primitive であるが、この方向はぜひとも今後進めて行かねばならない、ということである。長期的にはやはり信頼できる 3 次元流体力学計算コードの開発ということであろう。いわゆる Smoothed Particle Hydrodynamic 法は世界各地で開発が盛んになってきているが、日本ではすでに実績のあるグループもあり大いに期待したい分野である。このコードの宇宙物理学における応用のひろさ等から考えても若い大学院生の方々にも今後大いに取り組んでいただきたいテーマであると考えられる。現在の日本における大型計算機の利用のしやすさはアメリカとは比べものにならず、これだけでも (原理的には) 有利な立場にいるのであるから……。

4. Discussion

少人数 workshop の最大の利点は、お互いに知り合う機会が多いこと、出版される論文では決しておめにかかることのないような私見を見聞できるという点であろう。参加者も発表そのものよりもそれを通じての議論・交流を最も大切にする。私は連日 Silk の車に便乗させてもらい片道 30 分程かかるスキー場に通ったが、その内で Silk と Peebles は、会議の discussion の場においていかにして議論をよびおこすような方向にもっていくかということはずっと話し合っていたのが特に印象的であった。指導者がやはりそれなりの努力をはらってその分野をひっぱって行こうとしている態度がうかがわれた。

今回の会議では特に長時間の discussion session がもうけられており、その discussion のよび水としてなかなか興味ある presentation がなされた。そのなかで私がお

もしろいと感じたものを紹介してみる。ただし、これらは discussion をすることを念頭においているため、発言者の本当の意図を書きつくすことは困難であることをお断りしておく。

まず最も好評であったのが別表に示す Peebles の確率表である。これは上で述べたように Silk との車中の議論をもとにして作成されたものである。これは例えば密度ゆらぎの起源が本当に断熱的である確率は 10%、等曲率である確率が 1% というふうを読む。確率の和が 100% でないのは我々が今のところ全く考えていないようなものが現実の宇宙であるということで、残りは未知に対する確率である。上段の基礎確率を用いると、個々のシナリオに対する確率は積の法則から求めることができる。例えば今まで何回も登場した CDM モデルは adiabatic+scale-invariant spectrum+Gaussian と $\Omega(\text{exotic dark matter}) \sim 0.9$ に基づいているのでトータルでは 0.01% の実現確率となる。この確率表には研究者によって様々な意見があると思うが、この分野の大家の価値観を知ることができるという意見で実に興味深いものと思う。(文末の付記参照)

いろいろな複雑なモデルをでっち上げる前に、そもそもそのモデルの実現確率はどの程度のものであるかをあらかじめ考えておくことは有益であろう。0.0001% のモデルを作ってすべての現象を説明すると主張するのは、10% のモデルの限界を明確にするのとではどちらが重要か? 私にとっては明白なこの問いに対する答も、結局は各研究者の価値観によって決まることかもしれない。

Silk は観測から得られる $\Omega_{\text{luminous}} \sim 0.01$, $\Omega_{\text{dynamic}} \sim 0.1$ と元素合成から得られる $0.03 \leq \Omega_{\text{baryon}} \leq 0.1$ とを考え合わせると、少なくとも dark matter の一部として dark baryon が存在する必要がある点を強調した。その候補として白色矮星、中性子星ブラックホール、木星(型天体)等をあげたが、小質量の白色矮星が可能性が高いことを指摘した。従来 dark baryon の存在は様々な状況証拠から否定されてきたが、標準元素合成モデルからの Ω_{baryon} に対する制限がクォーク・ハドロン相転移等の影響で大きく変わる可能性の論じられている今、再考に値する問題である。

Quinn は merger の現状を総括。merger が重要な天体現象の一つであることの認識は定着したものの、その物理的理解は stellar dynamics の範囲内にとどまっていること、今後は gas dynamics の理解が焦点であること等を強調した。(3. (iv) 参照)

White は CDM モデルの critical problems として、LSSV, CMB, cluster-cluster correlation function ξ_{cc} 等をあげたが、実はこれらは別に CDM に限った問題では

ない。CDM モデルは十分研究されており、その問題点が明確になっているだけのことである。それよりも彼は触れなかったが、Peebles 書簡で指摘された filament 構造の真偽の方が重要な気がする。(恐らく彼は N 体計算の結果には十分自信をもっているためあえてとり上げなかったのかもしれない)

Bertshinger は explosive モデルの pros and cons ということで従来のモデルの持っていた問題を superconducting cosmic string モデルが解決するかもしれないという話をした。ポイドの内にバリオンが存在しているか? $\Delta T/T$ は? などが重要なテストである。

Turok は cosmic string モデルを否定できるか? という話をしたが、その答は No. 唯一つのパラメータである線密度 μ をずっと小さくしたモデルは決して否定されないからである。むろんこの場合宇宙論的にも役に立たないモデルになってしまうわけであるが、彼は $G\mu \sim 10^{-6}$ (G は重力定数) とした標準モデルが ξ_{cc} , $\delta T/T$, ミリ秒パルサータイミングデータからの重力波上限等に対して非常に predictive であることを強調した。ただ前日の彼のレビューでは、超弦モデルにもとづく cosmic string では $G\mu \sim 10^{-9}$ となるそうで、この場合いろいろな問題が生じてくるのではないかという気がする。宇宙物理的応用以前に素粒子物理的立場からの検討がより重要なのではないだろうか。

5. あとがき

日本にいとまに外国の会議等に出かける場合にはどうしても IAU シンポジウム等の大きな会議になりがちである。こちらではそのような大会議は一つのイベントと考えており、あまり期待してはいないようである。特にアメリカ以外の国で行なわれる場合は観光目的といった感が強く(これは我々日本人も同じかもしれない) そのかわり今回のような小人数の workshop は重要視しており、discussion、共同研究等のきっかけとなっている。英語のハンディのため大会議では彼らに圧倒されて、あまり知り合いにもなれないことが多いが(私の経験)、このような小人数、特に 3 食をともし、スキーマまでかけるというスタイルではいともたやすく知り合いになってしまう。日本人には特に有益なものであろう。私自身、前回の IAU Symp. No. 130 会議に比べて 20 倍ほどの収穫があったと感じている。

残念なことに、日本からこのような小さな workshop

に参加する場合には旅費や日程(準備期間が短いのが普通であるから)の問題等がある、容易ではないかもしれない。しかし、定期的なものとしてはアスペン、モリオンドなどがこれに近いスタイルであると聞いている。また IAU 会議の前後に、分野に限った workshop が開かれることも多いので、それらに参加することは比較的に楽かもしれない。

またこのような workshop には日本から若い人が参加されることを望みたいが、旅費のサポート等の日本のシステムはどうもそれには適していないようである。ただアメリカなら往復 10 万円強で行ける時代でもあるし、アルバイトでお金をためた大学院生の方には自腹をきいても参加する価値はあると思う(大会議ではなく workshop の類に限る)。

日本における銀河形成論周辺の研究者は人数が少ない割にはいい仕事をしていると言えると思うのだが、層の薄さというのはどうしようもない事実で、本質的でさえありうる。この小文が新しく研究をはじめられんとする大学院生の方々に対して、この分野の興味を少しでもひきおこす上でお役に立てば、というのが私の(小さな)願いです。

(付記)

ここで紹介する表 "A cosmic book" は、P. J. E. Peebles and J. Silk によって Nature に掲載された本会議報告 "A COSMIC BOOK" の中でさらに細かく議論されている。下は会議で発表されたオリジナルな表のままである。その出版に先だって天文月報に紹介することを許して頂いた Joe Silk に厚く感謝の意を表する次第である。

A Cosmic Book

adiabatic $\delta\rho/\rho$	0.1
adiabatic $\delta\rho/\rho$ + scale-inv. spectrum + Gaussian	0.01
isocurvature $\delta\rho/\rho$	0.01
Ω (exotic dark matter) ~ 0.9	0.01
Ω (total) ~ 0.1	0.1
cosmic strings	0.01
primordial magnetic field	0.01
canonical CDM	10^{-4}
massive cosmic strings	10^{-4}
superconducting magnetized cosmic strings	10^{-6}
baryon isocurvature	10^{-8}