

WMAP とプリンストンでの 4 年間を ふりかえって (2)

—ああ、怒涛のデータ解析—

小松 英一郎

〈Department of Astronomy, The University of Texas at Austin〉

e-mail: komatsu@astro.as.utexas.edu

先月までのあらすじ

MAP 計画に関わりたい一心でアメリカはニュージャージー州、プリンストンに行ったは良いが、英語はしゃべれないわ将来は見えないわで激しく凹む日々を過ごす。周囲の助けを借りつつ何とか MAP チームに参入することに成功するも、その後も多くの試練が待ち受けていたのであった……というわけで、先月号¹⁾では MAP チームに参入した経緯をかいつまんでお話ししましたが、ここでは MAP の初年度のデータ解析がどんなふうに進んでいったか、私の目から見た舞台裏をお話します。先月号と同じく、記事の性質上どうしても独善的になってしまう点もあるかと思いますが、笑って流していただければ幸いです。

1. 夢にまで見たパワースペクトル

MAP チームによりやく参入が許され、念願のデータへのアクセスを許された時から始めようと思います。先月号でも触れましたが、なんせそれまで MAP チームに入ることを目標にしてきたので、MAP の実データを触る以前からデータ解析の経験は積んでいました。(COBE のデータ

や MAP のシミュレーションデータなど。) また、須藤さん(東京大学)が主導で野辺山で行っていたスニヤエフ-ゼルドヴィッチ効果の観測とデータ解析の経験²⁾も非常に役立ち、データさえ与えられれば簡単な解析ならちゃちゃっとできる状況にあったので、David Spergel からデータのある場所などを教えてもらった後、まず自分のオフィスに行き、ドアを閉め³⁾、データのある NASA のワークステーションにアクセスして、パワースペクトルを測ってみました。IDL で軽く $l(l+1)C_l/(2\pi)$ をプロットしてやると、そこには明らかなピークが $l \sim 200$ に、すごく大雑把な解析ですから、ピークの正確な位置とか高さとかを議論できる代物ではなかったのですが、それでも、うっとりとして見とれてしまいました。

宇宙背景放射 (CMB) のゆらぎのマップは、ただ見せられても、ホットスポットやコールドスポットがランダムに分布しているだけで、ただのノイズだと言われても驚かないような代物です。その一方で、ビッグバン宇宙モデルとゆらぎの線形理論は、「いやいや、このマップには宇宙が晴れ上がったときに光子がもっていた音波が見えるのだ」、と予言し、インフレーション理論はその上に

¹⁾ 冗談のようですが、冗談ではありません。秘密保守が固く言い渡されていたので、ドアを開け放してデータ解析など、もってのほかでした。もう一つ神経を使ったのはプリントアウトです。データをプリントアウトする際には、人が少ない夜を狙ってプリントし、ダッシュでプリンターの部屋に行く、というようなことをやっていました。今から思えば、さすがにちょっとオーバーですけど……。

「パワースペクトルを測れ。1~200にピークをもつ音波のスペクトルが得られるはずだ。何しろ宇宙は平坦だから。」と予言します。学部生のときに飽きるほど見た、うねうねとした音波のパワースペクトル。これを自分で測ってみたかったから、この手を使ってこの目で確かめたかったから、はるばるプリンストンまで来て、さんざん苦労してきたのです。それがやっと目の前に。

本当はもっと感動して涙の一つでも流せば良いのですが、実際はビックリしたという方が正しくて、何しろ、何も難しいことはしないで本当に簡単な解析をただけなのです。やったことと言えば、銀河面の寄与を除くため高銀緯（20度以上と-20度以下）のデータだけを用い、それを球面調和展開して係数 a_{lm} を求め、パワースペクトルを $C_l = \sum_m |a_{lm}|^2 / (2l+1)$ のように求めただけです。慣れてる人ならものの10分くらいでできてしまう作業です。（本当はもっとちゃんとやらないといけません。）以前にBOOMERanG, MAXIMA, ARCHEOPSといったバルーン観測がピークを検出してはいましたが、その解析には複雑な魔法が施されているため、マップを渡されてこのようにちゃちゃっとパワースペクトルを測定してもキレイなピークは出ないでしょう。（これらの観測チームがデータを誰でも使えるように公表しない理由の一つです。）こうやって自分でちょっとやっただけでピークがあるべき位置にあるというので、何と申しますか、ふと“線形摂動理論ってすげえ”と思いました。東北大の二間瀬さんのスパルタゼミで宇宙論のゆらぎの線形摂動理論をガリガリ計算し、ピークの位置なんかも計

算していたときのことが思い出され、また、パワースペクトルの形を最初に計算した人たちは、計算はしたもののこんなもの実際に測れっかないと思っていた、という話も思い出されました*2。

しかし、あまりうっとりもしてられません。私の担当の仕事はパワースペクトルの測定ではなく、ゆらぎがガウシアン統計に従うかどうかを調べることです。インフレーション理論では、CMBのゆらぎは宇宙初期のインフレーション期に量子ゆらぎとして生成されたとし、その統計的性質を詳細に予言します。ゆらぎが生成されると、インフレーション、つまり指数関数的な宇宙膨張によってゆらぎの波長は当時の地平線を超え、ゆらぎは量子性を失って古典的なゆらぎとなります。このゆらぎはガウシアン統計に従うべきである、というのがインフレーション理論の標準的な予言なので、CMBのゆらぎの分布がガウシアンかどうか、というのはインフレーション理論の検証となります。もしガウシアンであれば、ゆらぎはパワースペクトル（2点相関関数のフーリエ変換のようなもの）だけでその統計的性質がすべて記述できますが、もしガウシアンからずれていれば、3点相関以上の高次相関の情報も必要となります。逆に言えば、もしゼロでない3点相関が見つければ、ゆらぎはガウシアンでないということになり、標準的なインフレーション理論を棄却できます*3。私に与えられた最初の仕事は、MAPデータからバイスペクトル（3点相関関数のフーリエ変換のようなもの）を測定して、インフレーション理論を検証することでした。バイスペクトルを測定しないといけないのですから、パワースペク

*2 私が直接話を聞くことができたのは、Dick Bond (CITA), Rashid Sunyaev (MPA), Marc Kamionkowski (Caltech) です。また、直接聞いたわけではありませんが、Alan Guth (MIT) は、インフレーションで生成される原始ゆらぎを計算したとき、それが検出されることなどありえず、ましてやスペクトルが測定されるなど夢にも思っていなかったそうです。

*3 ただし、どんなインフレーション理論でも完全なガウシアンゆらぎを予言するわけではなく、小さなガウシアンからのずれをもつが、MAPの精度では測定できない程度。なので、MAPがガウシアンからのずれを検出すれば、インフレーション理論を棄却、あるいは大きく修正することになる。この辺の詳細に興味のある方は、例えば Physics Reports のレビュー論文³⁾をご覧ください。

トルは私にとっては通過点です*4。

パワースペクトルの測定は、主にプリンストンの David Spergel と Licia Verde, ゴダードの Gary Hinshaw と Robert Hill によって行われました⁴⁾。このように、車で3時間程度の距離とは言え、離れた二つの場所で独立した解析を行うのは、コードのバグであるとか、解析手法の違いによるエラーを最小にするために重要でした。

2. 興奮と紆余曲折

2.1 非ガウシアン?!

MAPに参加するまでの準備プロジェクトとしてパワースペクトルを測定する方法論は確立していた⁵⁾ので、早速MAPに適用してみると、案の定MAPデータはめちゃくちゃ非ガウシアンです。しかしまあ、これは驚くにはあたりません。だいたい、データが完璧にガウシアンなんて方が異常です。たとえインフレーションが正しく、CMBそのものがガウシアンであったとしても(それだって自明ではないですが)、その他にガウシアンでないものはいくらでもあります。単にMAPのノイズが非ガウシアンなのかもしれません。そこでテストとして、CMBをガウシアンとし、それにMAPのノイズと既知の系統的エラーを加えたMAPのシミュレーションデータにおいて同じ解析を試してみたのですが、ガウシアンからのずれは見られませんでした。あ、あれ? じゃあ、このとっても非ガウシアンな成分は何ですか?

いろいろ試した結果、原因はMAPのデータにあってシミュレーションにはなかったもの—銀河面からの放射—によるものであることがわかりました。MAPのデータ解析では、銀河面からの放射を極力除くため、銀河面をマスクして高銀緯のデータのみを用います。しかし、銀河面からの放射というのは高銀緯に行ってもゼロにはならず、CMBの測定にとってコンタミネーションとなり

ます。これら銀河面の放射を除くため、MAPでは銀河面放射を三つのカテゴリー: (1) 銀河磁場によるシンクロトロン、(2) 電離領域からの制動放射、(3) 星間ダストによる放射に分け、それぞれの成分のMAPデータへの寄与を見積もってデータから引き去ります⁶⁾。もうちょっと詳しく言うと、(1) に対しては低周波 408 MHz のサーベイ観測 (Haslam) で得られたシンクロトロン放射のマップ、(2) に対しては H α のサーベイ観測 (WHAM) から得られた制動放射のマップ、そして (3) に対しては赤外 (IRAS と COBE/DIRBE) とサブミリ (COBE/FIRAS) のサーベイ観測から得られたダスト放射のマップを用意します。これらのマップをMAPの高周波3バンド (41, 60, 94 GHz) のデータに同時フィットし、ベストフィットな銀河面放射モデルを作成します。この銀河モデルをMAPデータから差し引くことで、銀河面放射の寄与を抑えるわけです。で、銀河面放射を差し引いたマップ上でパワースペクトルを測定すると、見事にエラーバーの範囲内でゼロとなり、めでたくCMBのゆらぎはガウシアン統計に従い、インフレーション理論の予言と一致している、という結果が得られました⁷⁾。

ところで、このガウシアンからのずれが銀河面放射で説明できず、そのまま残っていたらどうなっていたでしょう。おそらく、ずれの起源を突き止め、それが説明できるまでデータをリリースせず解析を続けていたと思います。何しろ、ガウシアンからのずれは、インフレーション理論を棄却するという非常に重要な意味をもつ一方、前述のように銀河面からの放射や、装置その他の不安定性による系統的エラーでも簡単に生成されます。したがって、そのずれが宇宙論的な起源であると結論するまでには、ありとあらゆる系統的エラーのチェックが必要となっただしょう。たとえもし宇宙論起源だとしても、その起源を突き止め

*4 かっていいこと言ってますが、パワースペクトルの方が花形です。ガウシアンからのずれが見つければ一躍パワースペクトルが花形ですが、まあ、そうは問屋がおろしません。

るまでは試行錯誤していたでしょう。もし宇宙論的な非ガウシアン性が見つかったという結論になれば間違いなく MAP のトップニュースとなったでしょうが、幸か不幸かそのような事態にはならず、ガウシアンで一件落着となりました*5。

2.2 有限宇宙?!

ガウシアン性のテストをする際、私は従来の“CMB がガウシアンと無矛盾である”と言うだけの定性的なテストを一步進め、“どの程度の非ガウシアン性なら許されるか”という定量的なテストを行いました。そのため、CMB のマップを、その種となる重力ポテンシャルから出発し、輻射輸送を解くことによってシミュレーションするという新しい手法を開発しました⁷⁾。通常は重力ポテンシャルのことは気にせず、CMB の温度分布のみを直接シミュレートしますが、これは CMB がガウシアンするときのみ有効な方法です。簡単に言えば、温度ゆらぎのパワースペクトル C_l を与えて、ガウシアン分布から乱数を振って a_{lm} を生成し、生成された a_{lm} を球面調和変換すればシミュレーションマップが得られる、というわけです。しかしこの方法では、ガウシアンでない CMB のマップを生成することができません。インフレーション理論は、CMB そのものよりも、その種となる重力ポテンシャルの統計的な性質を予言するため、重力ポテンシャルから出発して輻射輸送を解いて CMB のマップを得る、という第一原理的な手法が要求されます。この方法の開発には半年かかってしまいましたが、MAP のデータ解析に間に合って満足のいくシミュレーションコードが完成しました。

間もなくして、このコードがさまざまな用途に応用できることがわかりました。なかでも、“有限宇宙における CMB のシミュレーション”が、最も興味深い応用例でした。前述の、“分散が C_l のガウシアン分布から乱数を振って a_{lm} を生成し、

それを球面調和変換してマップを得る”という方法は、暗に宇宙の大きさが無限であることを仮定しています。しかし、私の第一原理から出発する方法は、重力ポテンシャルを置いてやって実際にその中に光を飛ばして CMB を計算しているので、有限な宇宙のシミュレーションは、実際に有限な宇宙の中に光を飛ばせば良いわけです。そうやってシミュレーションしたマップには、“Circles-in-the-sky”と呼ばれる面白い特徴があります。宇宙が有限であっても、その大きさが現在観測可能な宇宙の大きさ（地平線）よりも大きければ、観測的には有限宇宙も無限宇宙も区別できません。しかし、もし宇宙の大きさが現在観測可能な宇宙よりも小さいと、CMB のマップ上に“全く同じパターンをもった円”が現れます（詳しくは、井上太郎氏の解説記事⁸⁾を参照してください）。例えば、銀河の北極を中心としてある半径の円をとり、その円周上のゆらぎのパターンを記録します。次に、銀河の南極を中心として同じ半径の円をとり、その円周上のゆらぎのパターンを記録します。これら南北のパターンをさまざまな半径で比べてやると、ある半径で両者が正確にマッチするところが現れます！宇宙の大きさが小さければ小さいほどマッチ半径は大きくなり、逆に宇宙が大きければマッチ半径は小さくなり、宇宙の大きさが観測可能な宇宙の大きさを超えるくらいになるとマッチ半径は無限小で、測定できなくなります。実際の観測ではビームサイズ以下の情報は得られませんし、円を定義するには円周上でいくつかの測定が必要なので、ビームサイズと S/N によって検出できる宇宙のサイズが決まります。こういった微妙な問題を解決し、実際に“Circles-in-the-sky”をデータに適用するには、やはりまずシミュレーションに適用してマッチングの確率（マッチする円の半径を R としたら、検出できる確率はいくらか）を定量化する必要があります。

*5 せっかくガウシアンからのずれを測っているのに私的には何か見つけたかったのですが、そんなに世の中甘くないですから！残念！

り、私のシミュレーションが威力を発揮したわけなのですが。

ある朝、いつものように David Spergel のオフィスに議論に行きました。MAP の解析をしているときは彼もオフィスのドアを閉めているので、ノックして入ります。ただ、その日は何だか、いつもと様子が違います。何やらわくわく興奮気味です。聞くと、MAP のデータ上にマッチする円をいくつも見つけた、と言うではありませんか。びっくり仰天です。最初は信じられませんでした。話を一通り聞いてどうやらこれは本当らしいとわかり、その日はずっと何も手につきませんでした。宇宙が有限で、その大きさは現在のホライズンより小さい。これは、現在の宇宙観を根底から覆す衝撃的大ニュースです。さらに、宇宙が有限であれば、ベストフィットの Λ CDM モデルが予想するのに比べ、観測された四重極 ($l=2$) ゆらぎが非常に小さいのも自然に説明できます!⁸⁾……で、数日後、真実が明らかになりました。なんと、David はテスト用に使っていた有限宇宙のシミュレーションを実データだと思って解析していたのです。そりゃ、マッチする円が見つかるのは当たり前です。まあ、これで、マッチする円を探す彼のコードが非常に良く作動していることが証明されたわけです。改めて MAP のデータに適用してみると、マッチする円は一つも見つかりませんでした(残念!)。これから、宇宙のサイズは直径 24 Gpc 以上という制限が得られました⁹⁾。

ここに挙げた例は私たちが解析の途中で出くわした紆余曲折と喜怒哀楽の物語のほんの一部^{*6}ですが、何のかんの言って MAP のデータはスタンダードな Λ CDM 宇宙モデルで非常に良く記述でき、そういう意味では宇宙は孝行息子というか、大きな驚きもなく淡々とデータ解析が進んでいきました。もし Λ CDM に真っ向から矛盾する大き

な驚きがあれば、その分データリリースは遅れていたでしょう。

3. 偏光：感動，驚き，新たな試練

MAP の初年度のハイライトの一つは、CMB の偏光の検出です。CMB が偏光していることは理論的にも自然に予言されていますし (CMB は非等方なので、その四重極モーメントがトムソン散乱されることで偏光が生じる)、検出されてもおかしくはないのですが、そこには“感動”と“驚き”がありました。偏光の解析を主に担っていたのは、プリンストンの David Spergel とゴダードの Al Kogut です。温度ゆらぎのパワースペクトルのケース同様、ここでもプリンストンとゴダードで独立に解析が行われました。

MAP の初年度のデータ解析では、温度と偏光の相互相関スペクトルを測定しました。前述のように偏光は CMB の非等方性から生成されるため、温度ゆらぎと偏光は独立ではなく、強く相関しています。偏光は、四重極ゆらぎをもつ CMB が自由電子に散乱されれば必ず生じるので、宇宙の歴史の中で自由電子が大量にある時期を考えると、偏光は基本的に 2 カ所で生成されることがわかります。

- (1) 最終散乱面(あるいは晴れ上がりの面): 宇宙が晴れ上がる直前に CMB が電子に散乱され、偏光する。
- (2) 宇宙の再電離の時期: 第一世代の星やクエーサーの形成に伴って宇宙が電離され、生じた自由電子に背景放射が散乱されて偏光する。

これら二つの寄与は、観測される角度スケールによって分けられ、(1) は遠方 ($z \sim 1,089$) で生成されるため角度スケールにして 3 度以下程度 (小角度スケール) に現れますが、(2) は比較的近傍 ($z < 20$) なので、角度スケールにして 10 度以上

*6 喜怒哀楽って、まさにこんな感じですよ: (ある日)「すげえ! 大発見しちゃった! 有名人!」(数日後)「違った……ショボン。」一応断っておきますが、僕だけじゃないです。

(大角度スケール)に現れます。

まず (1) についてです。予言されている偏光の強度は温度ゆらぎの 10 分の 1 程度ですが、偏光のノイズレベルは温度の $\sqrt{2}$ 倍大きいので、偏光の S/N は温度に比べて非常に低いです。そのため、パワースペクトルのデータをそのまま見ても検出されたかどうかはわからず、ある l の区間で平均化 (ビニング) することになります。そこで適当にビニングしてやると、温度-偏光のパワースペクトルにはきれいに負・正と振動する相関が見てとれ、さらに、MAP で得られた温度ゆらぎのデータから予想される理論曲線とピットリフィットしました¹⁰⁾。以前の天文月報の記事¹¹⁾にも書きましたが、この偏光のスペクトルを最初に見たときには、本気で感動しました。そもそも 10 万分の 1 程度の大きさしかない温度ゆらぎだけでなく、そのさらに 10 分の 1 の大きさの偏光までも測定してしまった MAP はすごいです。加えて、温度と偏光のデータを同時に説明してしまう線形摂動理論の威力を再び見せつけられ、物理学の深さを改めて実感しました。インフレーション理論とか、線形摂動論とか、当たり前のようにつきも使っているわけですが、このように有無を言わせぬ形でその正しさを体感すると、ぞくぞくします。宇宙物理、真面目にやっていて本当に良かった。CMB のしくみを理解していなかったら、多分そんなに感動できなかつたらろうと思います。

次に (2) についてです。SDSS で新たに発見された遠方クエーサーのガン-ピーターソンテストから、宇宙は遅くとも $z \sim 6$ までは再び完全電離 (再電離) したことはよく知られています。そこで、仮に宇宙が $z \sim 6$ で瞬時に再電離したとすると、トムソン散乱の光学的厚さ τ は $\tau \sim 0.06$ くらいと見積もれます。一方、初年度の観測で達成できるノイズレベルを考えると、MAP が再電離に

よる偏光を検出するには τ は少なくとも 0.1 以上なくてはならなかったもので、まあ大角度での偏光は検出できないだろうと考えていました。しかし、David も Al も、角度 10 度以上に偏光が 4σ 程度で受かっているのを認めました。 τ にすると 0.17 ± 0.04 です¹²⁾。さあたいへん。この値を額面どおり受け取ると、宇宙の再電離は $z \sim 20$ くらいで起こったことになります。この検出をどこまでプッシュするか、チーム内でも議論がありました。所詮は S/N で 4 程度。自信をもって“検出”というにはグレーゾーンですし、10 度以上の大角度では銀河面放射の寄与が無視できないかもしれません。これに関して Al と David がいくつかのテストをし、銀河面の寄与だけでは受かったシグナルを説明できないと示せたことで、“検出”の主張に踏み切ることとなりました。

さて、この天文月報の記事が出版されるのは 2005 年 3 月号ということなので、これを読んでいらっしゃる方々は WMAP の 2 年目のデータリリースの結果をすでにご存知なことと思えます*7。ちなみに、執筆している今日は 2004 年 11 月 28 日です。2 年目のデータリリースがいつになるのか現時点ではまだわかりませんが、1 年目に比べて大幅に遅いことから、WMAP の初年度の結果、特に偏光の結果に何か重大な間違いがあったんじゃないか、とよく聞かれます*8。ここで最初に一つ言いたいのは、“2 年目のリリースが遅れている”のではなく、“1 年目のデータリリースが常識を超える驚異的なペースで行われた”，ということです。さらに、1 年目と 2 年目のデータリリースの決定的な違いは、1 年目が温度ゆらぎのデータと温度-偏光の“相互相関”だけをリリースしたのに対し、2 年目の今回はそれらに加えて偏光のマップと偏光-偏光の“自己相関”パワースペクトルもリリースします。つまり、リリースするデータの量が 3 倍 (温度に加え、直線偏光の二つ

*7 もし、万が一まだ 2 年目のデータが出てなかったとしたら、切腹ものです。

*8 ほんと、やめて下さいね。

のモードである Q と U) になるわけで、単純に考えて時間がかかるわけです!!

……すいません、言いわけをした後に本音を言います。私は2年目から偏光のデータ解析を中心になってやっているのですが、解析の難しさに本当に苦しめられています。この節の最初の方で少し触れたように、偏光の強度は温度ゆらぎの10分の1程度でノイズは $\sqrt{2}$ 倍です。さらに、初年度は相互相関だけで良かったのが、今回は自己相関もリリースします。一般的に言って、相互相関に比べ自己相関は系統的エラーに非常に敏感なため、解析がとても難しいのです。師走も迫ろうという現在でも、毎日正体不明の系統的エラーと闘っています。そして、周囲からのプレッシャーを反映するかのよう電話会議が週3回もあり、毎回解析の進展状況を報告しないとイケません*9。我々の本気度を示す出来事がつい数日前にありました。あろうことか、アメリカで最も重要な休日の一つであるはずの感謝祭 (Thanksgiving; 今年11月25日) の前日と翌日 (普通は休み!) にも電話会議を敢行するという、初年度のリリースのときにもなかった暴挙 (言い過ぎ) が行われました。早く解析終わらせて解放されたいです。この記事が出版される頃には、自分でも笑ってこの記事を見れるといいな、と切に願っています。

4. 花形、宇宙論パラメーターの決定

2002年の秋ごろには最終マップが完成し、プリンストンチームとゴダードチームの得たパワースペクトルが一致したので、MAPプロジェクトはその最重要課題 (マップの作成とパワースペクトルの測定) をクリアしました。また、当初は半年分のデータを公表することにしていたのが、1年分のデータ解析が予想より早く順調に終わったのを受けて、1年分のデータを公表することに決めました。ここからは、主に宇宙論パラメーターの

決定に焦点が移ります。この、花形とも言えるパラメーターの測定で活躍したのは、プリンストンの Licia Verde と、当時大学院生だった Hiranya Peiris です。彼らは、当時ようやく宇宙論の分野に導入され始めた“マルコフチェイン・モンテカルロ法”というパラメーター決定の手法を David Spergel の指導のもと MAP データに最適化し、初年度のデータリリースまでにパラメーター測定をやり遂げました^{10, 13)}。私も、その頃には gaussian 性の仕事をあらかた終えていて、Licia と Hiranya の補佐をする形でパラメーター測定に関わっていました。これはたいへん楽しい作業でした。Licia と Hiranya の弾き出すマルコフチェインのデータを受け取り、それからさまざまな宇宙論パラメーターのベストフィット値とエラーバーを計算していたのですが、密度パラメーターやハッブル定数の決定は当然の仕事としても、宇宙の年齢や晴れ上がりの時期、バリオン-光子比の計算とかは、もうほとんど趣味でした。

MAP を境に「精密宇宙論」の時代に入った、とよく言われます。宇宙論パラメーターの決定精度が10%を大きく切り、数%の精度で物が言えるようになったためですが、これを印象づける出来事がありました。宇宙論パラメーターの計算は数値的にやるわけですが、宇宙年齢の決定精度ときたら 137 ± 2 億年、誤差はわずか1.5%です。一方、単位の変換で秒を年に焼き直す際、皆様はどの程度の精度でこれを行いますか? 1年=3千万秒を使うケースが多いのではないのでしょうか。もう少し精度を上げれば1年=3,200万秒で、私は自分のコードではよくこれを使っていました。しかし、3,200万秒というのはより正確な値 (3,156万秒) に比べて1.4%大きすぎます。普通はこんなのは問題になりませんが、MAPの宇宙年齢決定精度に比べると無視できないため、さらに精度を増やす必要がありました。同様に、 $\pi=3.1$ なん

*9 おかげで、まだ30になったばかりなのに白髪が増える一方です。(涙)

てしてしまった日には（多分普通はしませんが）、 π^2 や π^4 なんてのが頻繁に出てくる宇宙論の計算では累積エラーがバカになりません。「精密宇宙論って、思ってもなかったとこで気を使うもんやなあ」と、コードを書きつつ実感しました。

宇宙論パラメーターは最後の最後に行われたこともあって、後半はデータリリースのタイムリミットとの闘いとなってしまいました。論文を書くこととパラメーター決定はほぼ同時進行で、私は生活が夜型だったので、いつのまにか、他のメンバーが昼に論文を書いたのを夕方頃に受け取って、夜中パラメーター測定+論文の改訂作業、そして朝方他のメンバーに送る、という24時間体制になっていました。しかしリミットが近づくとともに、私もみんなと同じ時間に大学に行かないといけなくなり、午前6時ごろに寝たというのに、午前9時ごろにDavidから「英一郎～！起きろお～！」という、何とも暖かいモーニングコールが入ることもあり*10。もちろん、私だけではなく、データリリース直前はメンバー全員が睡眠不足で、まさに「修羅場」という言葉がピッタリな状況でした。今から振り返ればすべて良い思い出ですが、よく乗り切ったなあと自分でも思います。特に、今回の奨励賞受賞のきっかけとなったインフレーション理論への制限の論文¹⁴⁾は、始動が遅かったのもあってデータリリースぎりぎりまで書きあがらず、徹夜に徹夜を重ね、リミット直前に何とか書きあげた、思い出深い論文です。

5. おわりに

本稿を通じて“WMAP”ではなく“MAP”を多

用してきました。これは、私が計画に関わるようになってからほとんどの時間を“MAP”計画として関わっていたためで、回顧録としては“MAP”とした方がしっくりすると思ったためです。ご存知の方もいらっしゃると思いますが、ここでWの由来について少し触れておこうと思います^{11), 15, 16)}。WMAPのWはWilkinsonの頭文字です。David Wilkinson教授は、PenziasとWilsonに次いで世界で2番目にCMBを測定し、そのスペクトルが黒体と一致することを最初に見出した方として知られています。COBE計画で重要な貢献をされ、COBEが打ち上がってすぐにMAP計画を考えつかれたそうです。MAPのミーティングや物理教室のパーティーなどで何度かお会いする機会に恵まれましたが、何しろ私の中では伝説と化している方の前ですから完全に萎縮してしまい、ロクに話もできませんでした。Wilkinson教授はMAPが打ち上がる前あたりから体調を崩され、とても心配されていましたが、MAP打ち上げには現地（フロリダ）まで赴き、元気に記者のインタビューに答えていらっしゃいました。ミーティングでも、嬉しそうに取れたてホヤホヤのマップやパワースペクトルを見つめていらっしゃいました。しばらく元気にされていたのに、悲しい突然の訃報を聞いたのは2002年9月5日のことです。Wilkinson教授の功績を讃えて頭文字のWを加えてWMAPとしたのは、そういった経緯があったためです。

2003年2月11日、ワシントンD.C.にあるNASAヘッドクォーターにて、WMAPの初年度のデータリリースの記者会見が行われました。Davidが「NHKが来るかもよ！」と言うのでビ

*10 ところでDavidは子どもを学校に送っていく都合上極端に朝方な人なので、私からのメールをリアルタイムで午前6時に受け取っており、その時間に私が寝ることも知っています。なのに午前9時に電話ですか……。余談ですが、SunyaevはZel'dovichから毎朝のように電話をもらっていた、と懐かしそうに話してくれたことがあります。SunyaevはZel'dovichの学生だった頃午前4時くらいに寝てたそうですが、毎朝7時くらいに電話がかかってきたとか……。で、Zel'dovichもSunyaevの就寝時間を知っていたらしく、まあ3時間くらい寝れば十分だろう、という感じで電話をかけていたそうです。あな恐ろしや。

シッとスーツで決めていったのに何もなかったのはご愛嬌として*11, 会見は **Chuck Bennett** と **David Spergel** の代表2名にコメンテーターとして **John Bahcall (IAS)** を加えた, たいへん面白いものでした. 日本でも, **NASA** テレビでご覧になられた方も多いと聞いています. 会見が終わり, 安心しきった私は, かねてからの懸念どおり翌日から高熱を出してしまいました. 14日には42度まで熱が上がり, プリンストンの救急病院にお世話になるというオチがついたところで, 私の **WMAP** の初年度が幕を閉じました.

苦労も多かったですが, 得たものの方が何倍も何十倍も大きかった **WMAP** とプリンストン生活. 今はテキサス州オースティンに場所を移しましたが, この原稿を書くことを通じて当時のことを鮮明に思い出しました. これから2年目, 3年目, そして最終的には8年目のデータリリースに向けて, また決意を新たにすることができたような気がします.

謝 辞

今回の日本天文学会研究奨励賞は, **WMAP** のチームメンバーは言うに及ばず, プリンストンでお世話になった多くの方々のおかげがあったからこそ, 受賞させていただくことができたものです. まず初めに, 先月号でも触れましたが, 二間瀬敏史教授, 杉山 直教授, 須藤 靖助教授の寛大なご協力がなければ, そもそもプリンストンに行くことは不可能でしたし, さらに研究者としてさまざまなことをご教授いただき, とても感謝しています. 日本学術振興会のサポートがなければ, 金銭的に渡米は困難でした. **David Spergel** 教授には, 私を受け入れてくださったことはもちろん, ぎりぎりまで他のチームメンバーを説得して私たちを **MAP** チームに入れてくれ, 大きなチャンスを与えてくれたことに感謝の言葉もありません.

プリンストンに行って間もなくで英語がままならない私を助けて下さった当時大学院生の長峯健太郎さん (**CfA**) と奥様の理子さんや, 2001年から2年間プリンストンに滞在され, 良き飲み友だちかつ相談相手であった戸谷友則助教授 (京都大学) のおかげで, 楽しい時間が過ごせました. 2002年から2年間プリンストンから車で1時間半ほどのペンシルバニア大学でポスドクをされていた高田昌宏助手 (東北大学) と奥様の理恵さんは, 東北大学の時代から頼りになる先輩夫妻としてとてもお世話になりました. 2002年からプリンストンでポスドクをされている住 貴宏さんと奥様の裕美さんとは, ほぼ同年なこともあって公私ともに多くの時間を過ごし, プリンストンでの楽しい思い出をたくさん作ることができました. 私の妻とともに, たいへん感謝しています. 私と私の妻の英語の先生であり, 良き友人, 良き祖母でもある **Lila Lustburg** さんには, いくら感謝しても足りません. 彼女の存在がなければ, アメリカ生活でいつくじけてもおかしくなかったでしょう. 全員の名前は挙げられませんが, 多くの友人に支えられたおかげでプリンストンでの4年間, 充実した時を過ごすことができました. 本当にありがとうございました. 最後に, 日本に帰るといいながら結局アメリカで就職してしまった親不孝な息子を支えてくれる両親, 友だちに説明できない意味不明な仕事をしている兄を慕ってくれる妹たちと, 不満も言わず私の人生を明るく照らしてくれる妻に, 最大の感謝の気持ちを送ります.

参 考 文 献

- 1) 小松英一郎, 2005, 天文月報 98, 107
- 2) 伊藤直紀, 須藤 靖, 北山 哲, 2004, 日本物理学会誌 59, 349
- 3) Bartolo N., Komatsu E., Matarrese S., Riotto A., 2004, Physics Reports 402, 103

*11 悔しくないですから.

- 4) Hinshaw G., et al., 2003, ApJS 148, 135
- 5) 小松英一郎, 2001, 博士論文 (東北大学), astro-ph/0206039
- 6) Bennett C. L., et al., 2003, ApJS 148, 97
- 7) Komatsu E., et al., 2003, ApJS 148, 119
- 8) 井上太郎, 2001, 天文月報 94, 518
- 9) Cornish N. J., Spergel D. N., Starkman G. D., Komatsu E., 2004, Phys. Rev. Lett. 92, 201302
- 10) Spergel D. N., et al., 2003, ApJS, 148, 175
- 11) 小松英一郎, 2003. 天文月報 96, 482
- 12) Kogut A., et al., 2003, ApJS 148, 161
- 13) Verde L., et al., 2003, ApJS 148, 195
- 14) Peiris H. V., et al., 2003, ApJS 148, 213
- 15) Lemonick M. D., 2003, "Echo of the Big Bang," Princeton Univ. Press
- 16) 小松英一郎, 2004. "宇宙を見る新しい目", 第1章: 宇宙マイクロ波背景輻射で見る宇宙, 日本物理学会