

コスモスな日々 (第5話)

谷口 義明

〈愛媛大学大学院理工学研究科 物理学教室 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5〉

e-mail: tani@sgr.phys.sci.chime-u.ac.jp

33. 2004年, 別の2月 その壱

宇宙大規模構造の謎を解き明かすコスモス・プロジェクト. このプロジェクト初のすばる望遠鏡の観測が終わったのが2004年2月である. 本当に怒濤の観測だった. 1月の6晩. 2月の4晩. 10戦7勝1敗. そして2引き分け. 7晩の快晴. 1晩の雪によるダウン. 2引き分けは, 例の「踊る大望遠鏡事件」によるロスである(第4話). この2晩も, 天気はよかったので, ずいぶんと好天に恵まれたことになる.

それにしても多くの方々には助けられた. まずは, ハワイ観測所のすべてのの方々である. そしてサポート・サイエンティスト, 望遠鏡とスプリーム・カムのオペレータの方々には感謝しても仕切れないぐらいのご支援を受けた. また, コスモス・チームの方々のエールがなければ, とてもこの2回の観測ランを凌ぐことができなかつたかもしれない.

コスモスは確かにプロジェクトである. 研究にはいろいろなやり方がある. 一人でやる個人研究, 少数でやる共同研究, そして大人数でなければ対応できないプロジェクト研究である. それぞれ特質があり, どれがよいかということを議論することにはあまり意味がない. しかし, プロジェクト的にやらなければ対応できない研究があることは事実である. そして, プロジェクトはさらに外部の多くの方々のサポートがなければできない. そんな当たり前のことをいまさらながら実感した. やってみて思うことだが, たいへん幸せな観測だった.

だが, まだ休むわけにはいかない. 膨大なデータ解析が待っていたからだ. データ解析は1月の観測と同時に, 安食君, 佐々木君, 角谷さんの3名が始めていたことは第4話で述べた. 1月分のデータの解析は1月の内に終わった. なぜそんなに急いでいたかといえば, 第4話で述べたように, 2月の中旬にHSTのサイクル14の観測提案の締め切りが迫っていたからである. この提案に, スプリーム・カムの観測成果を何とか盛り込むことができれば, より強い観測提案になる. そういう目論見がチーム内にあった.

しかし, 驚くべきことがあった. 私たちの解析した結果は早くもサイエンスに結びつきつつあったからである. 第4話では, “観測の2月”の話をした. この第5話では早くも芽生えたサイエンスの息吹について紹介したい. そこには“観測の2月”とは違う, “別の2月”もあった.

34. 2004年, 別の2月 その弐

1月の観測を終えた私たちには, 何の休息もなかった. データ解析の結果をまとめ, コスモス・チームのメンバーに, その成果を少しずつ報告し始めていた. その結果, コスモス・プロジェクトは確実に動き出した. まるで, すばる望遠鏡が仕掛けたかのごとく.

コスモス・フィールドは広い. スプリーム・カム9視野分の天域である. そこには, ざっと120万個の天体が見つかった. とりあえずやるべきことは一つ. それらのカタログを作ることである. これだけでもたいへんである. 私たちは必死になった.

私たちのチームにはポスドクの塩谷泰広君がいる。彼は銀河の測光赤方偏移*1 (photo-z: photometric redshift の略) の推定を虎視眈々と準備していた。私たちのチームは、以前からスプリーム・カムの多色測光データを取り扱っていたので、photo-z 推定のニーズがあったからである。器用な塩谷君は、独自にチューンした photo-z 推定ソフトをコスモスの観測の前に完成させていた。

塩谷君はコスモス・フィールドで見つかったすべての天体の photo-z を調べた。コスモスの目的は宇宙進化サーベイであり、宇宙の大規模構造がどのように成長してきたかを調べることが一つの大きな目標である。これを調べるには、どうしても銀河の位置と距離を特定する必要がある。位置は見かけの方向で特定できる*2。しかし、銀河の距離を推定するのはやっかいである。精確な赤方偏移がスペクトル観測で測定できるのであれば、話は早い。しかし、それは望むべくもない。この時点で頼りにできるのは、やはり photo-z なのである。

測光データはまだ最終結果ではない。しかも、1月の観測を終えた時点で使えるデータは3バンドだけ。それでも、やらないよりはましである。塩谷君はコスモス・フィールドで見つかった120万個もの銀河の photo-z を推定した。精度はまだ高くないだろう。しかし、この情報はどう考えても重要である。いろいろな研究の可能性をチェックするガイドラインを提供してくれるからだ。そこで、私たちはスプリーム・カムの観測で検出された天体のカタログに、測光データだけでなく、photo-z のデータも付け加えることにした。

2月の観測に行く前に、私たちはこれらのデー

タをコスモス・チームの皆に公開した。くどいようだが、今一度言っておく。この段階では、1月の観測で取得した B, r', z' の3バンドのデータに基づくものだ。つまり、いかにも暫定的なカタログであった。公開してもしょうがないかとも思った。しかし、何事も“better than nothing”。こう割り切ることにした。そして、2月中旬。私たちのチームはまたスプリーム・カムの観測に出かけた(第4話)。

35. 2004年、別の2月 その参

私たちがコスモス・チームのメンバーにリリースしたカタログは大きな反響を呼んだ。2平方度合成画像も各バンドで作成し、公開したからだ。このイメージが強烈な印象をメンバーに与えた。何しろ、コスモス・フィールドがどんな様子に見えるのか、まだ誰も知らなかったのである。パロマー天文台のデジタルド・スカイ・サーベイ画像で垣間見えるのは20等級の天体までである。そこには、とても宇宙進化サーベイを想像できるような世界は見えていない。しかし、終に見えたのである。

「ファンタスティック!!!」

また、このメールが私の元に舞い込み始めた。たいへんありがたい話だ。

これには、実は秘密があった。私たちはWEBにすばる望遠鏡のスプリーム・カムとHSTのACSのイメージとの比較も載せていた(図1)。コスモス・フィールドの中心の2分角×2分角のイメージの比較だが、見てすぐ気づくことがある。すばる望遠鏡によるイメージのほうが、たくさんの天体が写っていて、さらに淡い構造がよく見え

*1 天体の赤方偏移は、通常はスペクトル観測を行い、静止波長の知られているスペクトル線(輝線でも吸収線でもよい)がどの波長で観測されるか(観測波長)を調べることで決められる(分光赤方偏移)。一方、測光赤方偏移は静止波長帯と観測波長帯におけるスペクトルエネルギー分布の違いを目安に決める赤方偏移である。赤方偏移の測定精度は分光赤方偏移のほうがよい。

*2 これは当然だろうと思われるに違いない。しかし、実はそう簡単ではない。天体の精確な位置を決める(アストロメトリ: astrometry)のは思ったより難しい。コスモスの場合はHSTの高分解イメージがあるので、位置の測定は正直なところたいへんだった。

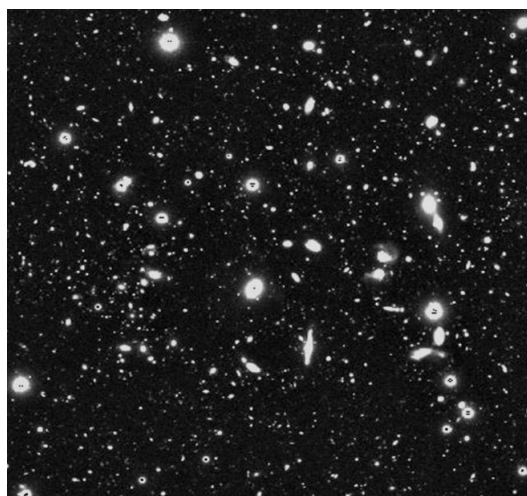


図1 コスモス・フィールドの中心の2分角×2分角のイメージ。(上) HST の ACS によって得られた g' と I_{814} のカラーイメージ。(下) すばる望遠鏡のスプリーム・カムで得られた i' バンドのイメージ。すばる望遠鏡によるイメージの方が、たくさんの天体が写っていて、さらに淡い構造がよく見えている。

ている。やはり集光力の差が出ているのである。

しかし、この比較はあまりフェアではない。もし、0.1 秒角の差を問うのであれば、やはり HST には敵わないのだ。ただし、分角スケールで比較すれば、すばるの良さがでてくる。HST では詳細な形態の情報を得る。そしてすばる望遠鏡で

測光をする。この合わせ業が、まさに離れ業になる。それを、コスモス・チームのメンバーに知らせたかったのである。

この比較はチーム・メンバーにかなりインパクトを与えたようだ。

「おい、これはいけるぞ！」

そういう雰囲気が出てきたのである。

第2話で紹介したが、銀河研究のトップを走っている研究者は次のように言う。

「可視光でも近赤外線でも、銀河の形態を調べないのであれば、HST のデータを使うのが王道である。地上の天文台でのデータをその目的のために使ってはいけない」

実際、2003 年、ニューヨークでのチーム会議の感じでは、スプリーム・カムのデータに大きな期待を寄せている人がそれほどたくさんいるようには思えなかった。ただ一人、ニックを除いて。

しかし、事態は大きく変わった。こうなると、コスモス・チームのメンバーの意気込みは凄い。何か面白いアイデアはないか？ そういうギラギラした熱意を皆がもっているように思えた。もちろん、基本は宇宙大規模構造の進化である。しかし、その意味するところは深い。テーマはおそらく無限にある。

皆、必死にカタログを使って考え始めたようだった。私たちの2月の観測と同時に、コスモス・チーム全体では、HST とチャンドラ X 線天文台の観測提案に少しでもアピーリングな結果を出すための戦いが進行していたのである。2004 年、“別の2月”が確かにここにあったのだ。

コスモス。それは本当に凄いプロジェクト・チームだと思った。

36. 2004 年、別の2月 その肆

そして、私たちの解析したデータに関する問い合わせメールがたくさん舞い込むようになった。まず、届いたメールはエヴァ・シネラー (Eva Schinnerer) さんからだった。彼女はコスモスの

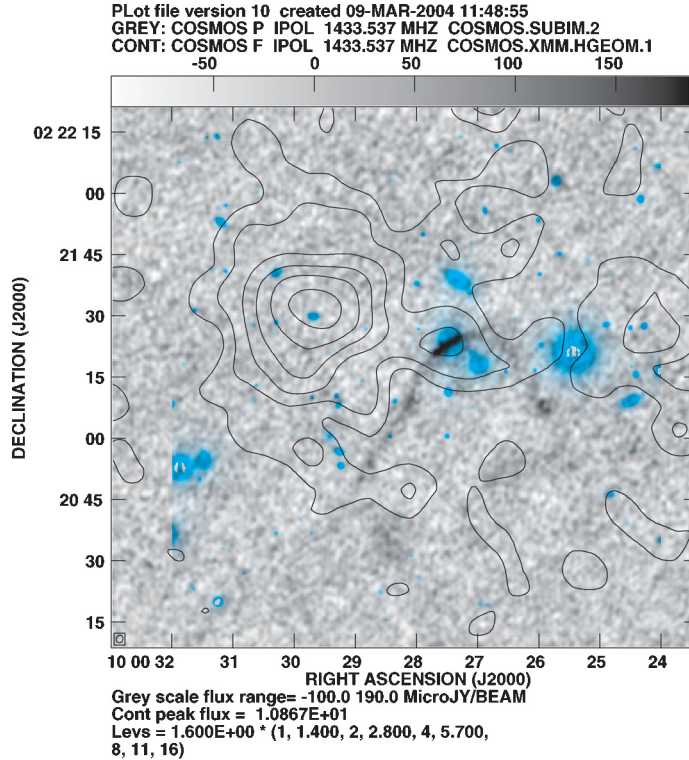


図2 VLA で発見されたダブル・テイル電波銀河. 波長 20 cm のイメージでは (グレイスケール), たなびいた2本の電波テイルが見える. 青く写っているものが銀河 (スプリーム・カムの ν' バンドのイメージ), コントアは XMM によるソフト X 線強度マップ.

電波観測を請け負っている. VLA^{*3} でコスモス・フィールドの電波連続光 (波長 20 cm) マップを作る. それが彼女の役割だ. 彼女は 2003 年に,すでにパイロット・サーベイを終え, 200 個以上の電波源を検出していた. 彼女らはこれらの光学同定を, 一日千秋の思いで待っていたのである. 彼女からの問い合わせは二つあった.

- [1] すべての電波源の光学同定をしてもらえないか.
- [2] ダブル・テイル電波源^{*4}が 1 個あるが, それが何かを調べたい.

いきなり, ハードな仕事が舞い込んできた.

[1] については村山君が対応してくれた. 彼はあっという間に, 200 個もの電波源の同定を行い, 各バンドでのイメージを並べた WEB を立ち上げてくれた. 当然のことながら, ほとんどの電波源の場所には銀河があった. しかし, 銀河の姿は多種多彩だった. 片っ端から分光観測をしなければ本当の正体はわからないだろう. しかし, その多種多彩さはやはり, 研究意欲をわきたてるのに十分だった.

[2] の問い合わせには, 塩谷君が興味を示して

*3 VLA=Very Large Array. アメリカ合衆国ニューメキシコ州にある電波干渉計. アメリカ国立電波天文台が運用している.

*4 活動銀河核の中で, 電波の強いクェーサーや電波銀河は, 中心核から双極電波ジェットを出している. 通常は, 相反する2方向にすうっと伸びていくが, なかには同じ方向にたなびくジェットをもつものがある. それらはダブル・テイル電波源と呼ばれる.

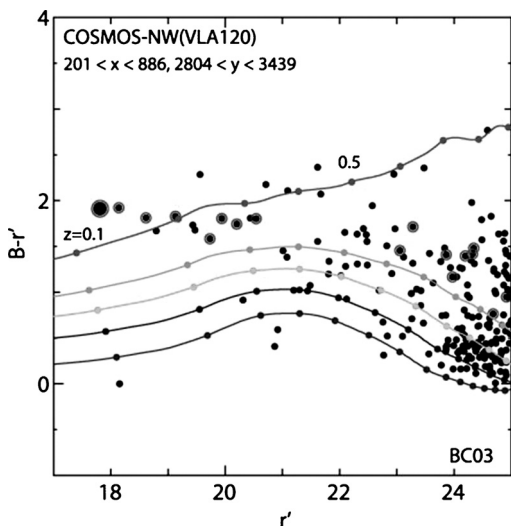


図3 図1に写っている銀河の色 ($B-r'$)-等級 (r') 図. 黒い点が図1の中にある銀河. 二重丸印で囲まれているものが $photo-z$ が0.2の銀河で, 明るいほど色が赤くなる系列に乗っている. 曲線は, 上から E, Sa, Sb, Sc, Irr の銀河の SED (スペクトルエネルギー分布) を赤方偏移させたときに期待される軌跡. 赤方偏移 0.1 ごとにマークを入れてある.

くれた。彼は、ダブル・テイル電波源の電波画像とスプリーム・カムの r' バンドの画像を重ね合わせ、光学対応天体が楕円銀河らしいことを突き止めた。その銀河の周りを見てみると、どうも銀河の個数密度が高くなっているように見える(図2)。

「銀河団のようだね」

「そうですね。3バンドの測光データしかありませんが、周辺の銀河も含めて銀河の測光的な性質を調べてみます」

塩谷君はその晩のうちに、いろいろと調べ、一つの結論に達した。翌日、彼はいくつかの図を見せながら私に言った(図3)。

「多分、赤方偏移 0.2 あたりにある銀河団だと思います。このダブル・テイルを出している銀河は、その銀河団の中では明るい銀河のように見えますね」

なるほど、理にかなっている。ダブル・テイル

はその楕円銀河の活動銀河中心核から出ている電波ジェットであり、それが銀河団ガスと相互作用してたなびいている。どうも、それが一番良いアイデアだった。

早速、エヴァに私たちのアイデアを資料とともに送った。翌日、エヴァから返事がきた。

「たぶん、そうだね」

もう一言添えてあった。

「それにしても、あっという間にわかったわね」

確かにそうだ。可視光の深い撮像データがあると世界が変わる。

しかし“あっというま”についていえば、村山君と塩谷君の力である。彼らにそっと感謝した。

37. 2004年、別の2月 その伍

次にやってきた問い合わせは、コスモスの X 線観測を担当している人たちからだった。彼らは XMM ニュートンという X 線天文台を使って、この時点までに、コスモス・フィールドの約 1/3 の天域の観測をソフト X 線とハード X 線で終えていた。その結果 300 個以上の X 線源を検出していたので、やはりそれらの光学対応天体が何かを調べたかったのである。またもや、村山君がマッハのスピードで対応天体をチェックし、電波源のときと同様に情報をウェブに載せた。

X 線グループからはもう一つ面白い問い合わせがきた。それは銀河団に関するものだった。

さきほど、塩谷君がコスモス・フィールドの天体の $photo-z$ を調べたといった。彼は銀河の空間分布が赤方偏移によって、どのように変わるかをざっと調べていた。その際、赤方偏移が $z = 0.7$ のあたりで大きな銀河団構造があることを発見していた。これはすでにコスモス・チームのメンバーに連絡してあったのだが、イタリアのジジ・グッゾ (Luigi Guzzo) 氏がこの構造に興味をもった。彼は XMM のデータを調べてみると、まさにそのあたりにソフト X 線で空間的に広がった構造が

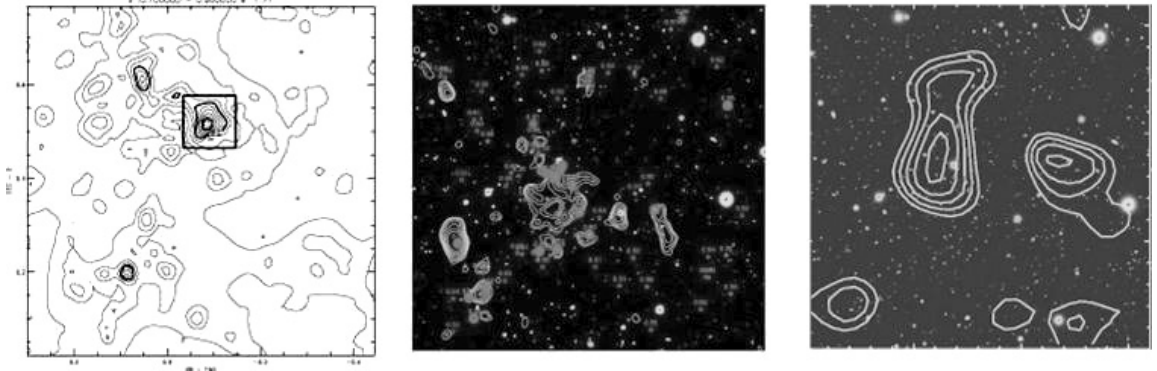


図4 $z=0.7$ にある銀河団構造。(左) コスモス・フィールドの北西領域(0.7度四方)で赤方偏移が 0.7 ± 0.1 にあると推定される銀河の個数密度をコンタで表している。中央上にボックスで囲った部分に銀河の個数密度が高い領域がある(6.7分四方)。(中央) 左図のボックス領域の画像(スプリーム・カムの*r'*バンドイメージ)にXMMによるソフトX線のコンタが描かれている。銀河の個数密度が高い場所はソフトX線でも検出されていることがわかる。(右) 中央と同じ天域の画像(スプリーム・カムの*i'*バンドイメージ)にウイーク・レンズ解析で検出された質量超過の部分がコンタで示されている。中央のX線のコンタとやや場所が異なるが、やはり質量の集中している領域が存在することがわかる。

あることに気づいたのである。そこには、かなり大規模な銀河団がありそうということになった。

その頃、スプリーム・カムの観測メンバーである宮崎 聡氏(国立天文台・ハワイ観測所)は、ウイーク・レンズによるコスモス・フィールドの質量マップを調べていた。じつは、1月のスプリーム・カムの観測の際に、コスモス天域の中心領域を*i'*バンドで撮像した。HSTのACSの*I*₈₁₄のデータも独立に解析して、ウイーク・レンズによるコスモス・フィールドの質量マップを比較するためである。宮崎氏の解析結果を見ると、 $z=0.7$ のあたりにある銀河団構造の方向に質量の超過傾向が検出されたのである。

こうして、photo- z 、ソフトX線、ウイーク・レンズという3種類の方法で $z=0.7$ の大規模構造の兆候が見つかった(図4)。これがコスモスの面

白さなのだと思った。これは私の正直な感想だ。いろいろな波長帯で、いろいろな手法で2平方度の天域を調べ尽くす。コスモス・プロジェクトのエッセンスはこれである。その片鱗が早くも見え始めたのである。痛快だった。

それに拍車をかけるメールが、またイタリアから届いた。今度はグッゾ氏ではない。アンドレア・コマストリ(Andrea Comastri)氏からだ。驚くべき内容のメールだった。

「ヨシ、例の銀河団構造にある銀河を数十個、VLTのFORSで分光した。ほとんどの銀河の赤方偏移は $z=0.7$ だ。平均値は $z=0.72$ 。間違いなし。大規模な銀河団だ」

あまりの速攻に唾然とした。VLTではVIMOSでコスモス・フィールドの銀河の分光をする計画になっている。コマストリ氏はたまたまFORS^{*5}の観測時間をもっていたので、ちょっと観測して

*5 FORS (=the visual and near UV FOcal Reducer and low dispersion Spectrograph): ヨーロッパ南天天文台 Very Large Telescope (VLT) 用の可視光分光器。FORSは2台あり、VLTの1号機(UT1)と2号機(UT2)に付いている。しかし、なぜかFORS1がUT2に、FORS2がUT1に付いている。多天体分光器であるVIMOS (=the Visible wide field Imager and Multi-Object Spectrograph)の世代前の分光器であるが、たくさんの優れた成果を出した観測装置の一つである。

みた。その結果だった。また一つ、コスモス・チームのパワーを垣間見ることとなった。

そして、もう一つ感心させられたことがある。それは photo-z の有効性である。この段階で使用していたのは、 B, r', z' の3バンドのデータだけである。可視光全域をカバーしているとはいえ、情報量が3バンド分しかないことは事実である。それにもかかわらず、 $z=0.7$ の銀河団をキャッチすることができた。今後、バンド数を増やしていけば、photo-z はかなり有用なツールになるように思えた。なんだか、新たな戦略が見えるような気がした。

38. 2004年、別の2月 その陸

GALEX チームからも朗報が届いた。

「コスモス・フィールドの観測が完了！」

まさに、多波長プロジェクトの醍醐味である。

GALEX (Galaxy Evolution Explorer) は NASA が宇宙に打ち上げた紫外線望遠鏡である (2003年4月28日打ち上げ)。口径はたった 50 cm しかないが、紫外線による全天サーベイを遂行する重要な使命をもった、紫外線専用の宇宙望遠鏡である。コスモス・フィールドの観測は GALEX のギャランティード・タイムに割り当てられていたので、あっというまにその観測は終わった。ありがたい話である。

この観測をやってくれたのは米国・コロンビア大学にいるデーブ・シミノヴィッチ (David Schiminovich) である。観測波長帯は遠紫外線 (Far Ultraviolet = FUV) と近紫外線 (Near Ultraviolet = NUV) で、それぞれカバーする波長帯は 1,350–1,740 Å と 1,750–2,800 Å である。総観測時間は 20 万秒、約 56 時間に及ぶ観測であった。

FUV と NUV のカラー合成画像を図 5 に示す。

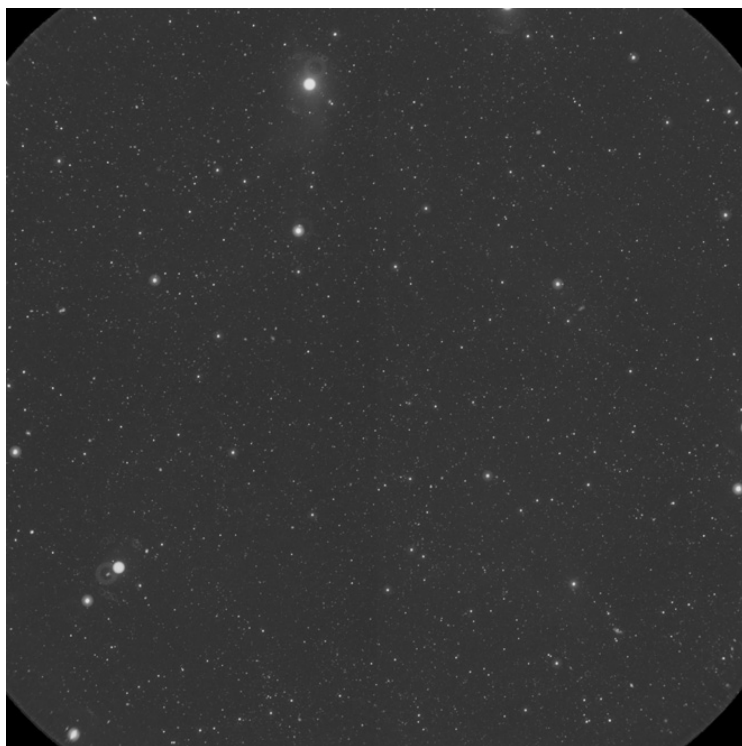


図 5 GALEX によるコスモス・フィールドの紫外線画像。5 万個もの銀河が写っている。

ここには5万個もの天体が写っている。撮像の深さという点では、AB等級で25等どまりである。それほど深い撮像ではないが、口径50cmの望遠鏡のベストだろう。比較的近傍にあるような銀河を見ると、なかにはとても異様に見えるものもある。星生成領域だけがクローズアップされているからだ。紫外線で見える宇宙は、私たちの慣れ親しんだものではない。それだからこそ、このデータが重要になる。デーブに深く感謝した。

39. 2004年、ようやく3月 その壺

私たちの2月はスプリーム・カムの観測とそのデータ解析に明け暮れる毎日だった。しかし、コスモス・チームの中では、以上紹介したように、“別の2月”が刻まれていたのである。

観測を続ける私たちにとって、この“別の2月”は嬉しい限りだった。すばるの観測が始まって、わずか2カ月。そのわずかな間に、コスモスには早くもサイエンスの香りがしてきたからである。

しかし、そう楽しんでいるわけにもいかなかった。とにかくスプリーム・カムのデータを解析し、コスモス・チームのメンバーにその結果をい

ち早く公表しなければならない。じつは、コスモスでは、“データ取得から半年以内で解析結果をチームメンバーに公表する”というルールをとっている。スプリーム・カムのデータは、それだけでも膨大である。半年以内というのは、正直厳しい。というわけで、ため息をつく暇もない状況が続いたのである。

2月末になって、ようやくだいたいの解析を終えた。結局、私たちはB, V, r', i', そしてz'の5バンドのデータをスプリーム・カムで取得した。Bの重心波長は4,400 Å, z'のそれは9,500 Åである。つまり、可視光全体をほぼカバーしている。各バンドのイメージにはそれぞれ100万個以上の天体が写っている。このデータを使えば、コスモス・フィールドにどのような銀河が、どのように分布しているかが大雑把にはわかる。

これにHSTのACSによるI₈₁₄のイメージが加わる。さらに10万個の天体についてはVLTによる分光観測が予定されている。さらにX線、電波、赤外線とデータがそろふ。どう考えても凄すぎる。

最終結果までの道はまだ先だが、とにかく暫定

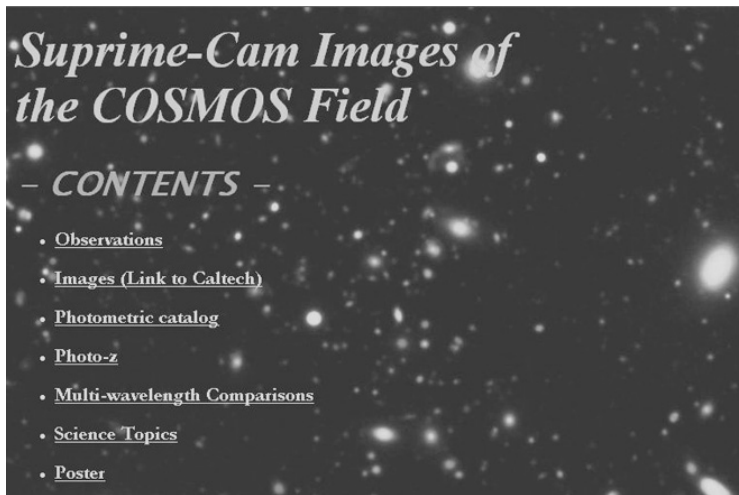


図6 私たちのグループが作成したWEB。コスモス・フィールドのすばる望遠鏡による観測がまとめられている。背景の写真はコスモス・フィールドの中心領域のカラー画像で、スプリーム・カムのデータから作成されたもの。

的な結果ということで、コスモスチームメンバーへ情報の提供を続けていた。3月中旬にはチャンドラ X 線天文台の観測提案の締切りが控えていたからである。

情報の公開に当たっては、2月に専用のウェブを立ち上げていた。パスワード付きにすることで、チームメンバー以外の人アクセスできないようにもできるからである。このウェブは佐々木君が作ってくれた。観測のステータス、カタログ、合成画像、サイエンスピックスなどの項目を入れ、非常に見やすいものが用意された (図 6)。

40. 2004 年, 3 月 その三

冒頭で、2004 年 1 月と 2 月のコスモス・ワールドの観測は、10 戦 7 勝 1 敗、2 引き分けと述べた。この中で、2 引き分けは望遠鏡のトラブルによるもので、2 快晴夜を失った 2 晩のことである。コスモスの観測はインテンシブ・プログラムとして採用されたものである。そして、インテンシブの場合に限ってではあるが、コンペンセーションが用意されている。そして、今回はこのコンペンセーションが発動された。

3 月 15 日と 4 月 15 日、2 全夜ではなかったが (1 晩強相当)、ハワイ観測所の判断に深く感謝した。

まず 3 月 15 日の観測のため、安食君と私は再びヒロへと向かった。15 日の時間割り当ては午前 2 時までだった。この頃、マウナケアの天候は荒れ気味で、晴れてはいたがシーイングが悪い (1 秒角以上)。z' バンドのデータを少しだけ撮って終了となった。こんなこともある。

「これだけのために、わざわざハワイに出かけるなんて」

と、思われるかもしれない。しかし、それは違う。そもそも、天気は誰にも制御できない。苦しい日程をやりくりして、コスモスの観測のために時間を用意してくれただけでもありがたい。確かに、有効なデータは撮れなかった。それでも、ハワイ観測所への感謝の念のほうが強く残った。その心を残して、私たちはヒロをあとにした。

仕切りなおしの 4 月、2 月に失った観測のコンペンセーションのための半夜。そして、新たな狭帯域フィルター*6 NB816 の観測がある (S04A-080)。赤方偏移 $z=5.7$ のライマン α 輝線銀河の探査である。コスモスの 2 平方度にわたってサーベイする。夢のプロジェクトである。コスモスの観測はまだ終わらない。

(つづく)

*6 撮像観測で使用される、最も一般的なフィルターは広帯域フィルターであり、帯域幅はざっと $1,000 \text{ \AA}$ はある (第一話の図 7 を参照)。それに対し、狭帯域フィルターは帯域幅は 100 \AA 程度である。その波長帯に入ってくる輝線天体の探査に用いられる。