

謎の銀河 E+A 銀河の正体

後藤 友嗣

〈Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, 3400 North Charles Street, Baltimore, MD 21218–2686 USA〉

e-mail: tomo@jhu.edu

E+A 銀河は最近 10 億年以内に活発に行っていた星形成を急に止めてしまったポストスターバースト銀河である。しかし、その起源は、発見以来 20 年以上にわたって謎のままであった。スローンデジタルスカイサーベイから見つかった過去最大の E+A 銀河のサンプルを用いて、筆者らは E+A 銀河の起源について有力な手がかりを得たので以下に紹介したい。

1. E+A 銀河って何？

このタイトルを見て疑問に思われた読者の方も多いだろう。そう思われた方は実は正しい。E+A 銀河は発見以来今日まで 20 年以上にわたって、世界中の名だたる研究者が挑戦しても正体のわからなかった謎の銀河なのである。E+A 銀河の発見は 1983 年に遡る。Dressler と Gunn¹⁾ は遠方の銀河団銀河の分光観測中に、観測データの中に妙な銀河がいることに気がついた。後に彼らが E+A 銀河と名づける*1 これらの銀河のスペクトルは強いバルマー吸収線を持ちながら、全く輝線を持ち併せていないという非常に珍しい特徴を持っていた。図 1 に E+A 銀河のスペクトルの例を示す。H β (4,681 Å), H γ (4,340 Å), H δ (4,102 Å) などの非常に強いバルマー吸収線がありながら、[OII] (3,727 Å), H α (6,564 Å) らの輝線を全く持たないという奇妙な特徴を見ていただけたと思う。

では、これらの特徴は物理的には何を意味するのか？ まず、強いバルマー吸収線は A 型星に顕著な特徴であるから、この銀河の中ではたくさんの A 型星が光っていることがわかる。A 型星の寿命は約 10 億年ほどであるから、E+A 銀河は最近約 10 億年ほどの間に活発な星形成活動を行い、たくさんの A 型星を作ったということがわかる。一方で、[OII] (3,727 Å), H α (6,564 Å) らの輝線は、A 型星よりもさらに重い O, B 型星に起因する。O, B 型星の寿命は A 型星のそれよりもずっと短いから（約 5,000 万年ほど）これらの輝線は観測された時点での銀河の星形成活動を反映する。その輝線が全く存在しないということは、E+A 銀河は今現在は星形成活動を全く行っていないということになる。つまり、E+A 銀河は 10 億年前には星形成を活発に行っていたが、観測時までの間に急に星形成を止めてしまった、いわゆるポストスターバースト銀河なのである。

ここまでは、星のスペクトルの知識を持った人

*1 「E+A 銀河」という名前は E+A 銀河のスペクトル（図 1）が、A 型星（強いバルマー吸収線が特徴）と英語で elliptical galaxy と呼ばれる楕円銀河（金属の吸収線が特徴）のスペクトルの重ね合わせのように見えることから名づけられた。その後、渦巻き形態をした E+A 銀河が見つけたという報告があったため²⁾、純粋にスペクトルの観点から「K+A 銀河」と再命名されたが、筆者らはより均一なサンプルで再度 E+A 銀河の形態は楕円銀河的であることを発見したため、この原稿中では「E+A 銀河」という名称を用いることにする。

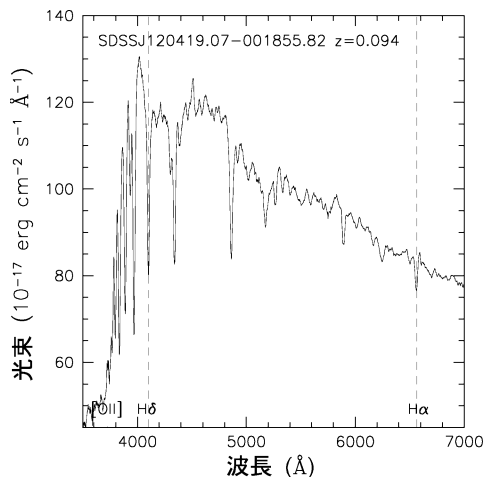


図 1 E+A 銀河のスペクトルの一例。波長は静止系に戻してある。強いバルマー吸収線 ($H\delta$) があり, $[OII]$ や $H\alpha$ の輝線が存在しないという珍しい特徴を見ていただきたい。スペクトル全体もまるで A 型星のそのような形をしている。

ならば、少し考えればたどり着ける結論である。しかしながら、この解釈は二つの大きな疑問を残す。まず、なぜ E+A 銀河は活発な星形成（スターバースト）を行っていたのか？そして、さらに重要なことに、どうして E+A 銀河はその星形成を急に止めてしまったのか？研究者の好奇心をくすぐる二つの大きな謎である。しかしながら、発見以来 20 年間、E+A 銀河についての研究は遅々として進まなかった。A 型星の寿命は約 10 億年であるから、E+A 銀河の特徴である強いバルマー吸収線は、星形成を止めた後 10 億年経つと消えて見えなくなってしまう。つまり E+A 銀河は星形成を止めて 10 億年以内に観測しなければ見つからなくなってしまう。その短い寿命ゆえに、E+A 銀河は非常にまれで見つけにくく、難しい研究対象であった。ちなみにラスカンパナス赤方偏移サーベイでは、約 1 万個の銀河の分光観測をした中でたった 21 個しか E+A 銀河は見つからなかった³⁾。実に約 0.2% である。現在までで最大の E+A 銀河のサンプルは Galaz⁴⁾ が提示

された 50 個であるが、それもあちこちのサンプルの寄せ集めで均一性を欠くため統計的な研究には不十分なものであった。

2. 千載一遇のチャンス到来

スローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS)⁵⁾ は全天の約 4 分の 1 にあたる 1 万平方度の広大な領域から、100 万個の銀河の分光観測をする過去最大の赤方偏移サーベイである。100 万個もの銀河のスペクトルは、その数の多さゆえに、珍しい銀河を研究するには絶好の母サンプルとなる。このサーベイは国際協力のもとで行われているが、日本グループの研究者の方々も CCD カメラおよびフィルターの作製、測光精度の検証など多大に貢献されていたため⁶⁾、日本人である著者たちはデータにアクセスしやすい環境にあった。ここにおいて、筆者らのチームはまれさゆえに過去見つけることができなかった E+A 銀河について、詳細な統計的研究が可能な巨大サンプルを用いて研究をする千載一遇のチャンスを得た。本研究ではこれまでに SDSS で観測された約 18 万個の銀河のスペクトルの中から、 $H\delta$ 吸収線の等価幅が 4 \AA よりも強い、かつ、 $[OII]$ 、 $H\alpha$ の輝線を全く持たないという厳しい条件を課して、133 個の E+A 銀河のサンプルを選び出した⁷⁾。このサンプル数は過去最大であることはもちろん、 $H\alpha$ の輝線を持つ銀河をすべて除外している点において、質においても過去に例をみない均一なものとなっている。これら過去最大の E+A 銀河のサンプルを用いて、筆者らは E+A 銀河の謎に挑むことにした。

これまで E+A 銀河の起源として提案されてきた仮説は主に以下に挙げる三つに大別できる。筆者らの観測データと照らし合わせて、これらの説を検証してみる。

3. E+A 銀河は銀河団によって作られたのだろうか？

発見当時、Dressler と Gunn は銀河団銀河の観測をしていたため、銀河団に付随した物理作用が E+A 銀河を作り出すのではないかと考えた。例えば、銀河団は全体が熱いプラズマガスで覆われている。銀河が銀河団に落ち込むときに、これらの銀河団プラズマガスからの圧力のために銀河の中の冷たいガスがはぎ取られてしまうとすれば、その際に銀河の星形成は急に止まるだろう（ガスのはぎ取り作用についての理論的計算は藤田の論文⁸⁾に詳しい）。後に銀河団中に E+A 銀河を発見したという報告が相次いだため^{9), 10)}、この説は現在まで広く支持されてきたようである。

この説を検証するためには、E+A 銀河の存在環境を調べてみればよい。図 2 に斜線で筆者らの E+A 銀河サンプルの銀河個数密度分布を示す。ただし銀河のサンプルは、明るいものほど観測されやすいというバイアスを補正した体積限定サンプルである。銀河個数密度は、銀河の周り赤方偏移方向 $\pm 1,000 \text{ km s}^{-1}$ のサンプルで、5 番目に近い銀河までの距離を測ることで計算したものである。比較のために、体積限定サンプル内のフィールド（銀河団外）の銀河と銀河団銀河（銀河団中心より 0.5 Mpc 以内）の個数密度分布を実線と点線で示す。図 2 からわかる重要なことは、E+A の存在環境は銀河団にあるのではなく広く一般のフィールド（低密度環境）に広がっているということである。フィールドに存在する E+A 銀河を、銀河団付随の物理作用で説明することはできない。どうやら、E+A 銀河の起源はほかに存在するようである。

歴史的に E+A 銀河は、銀河団銀河の進化の証拠であるブッチャー・エムラー効果¹¹⁾や形態-密度関係 (morphology-density relation¹²⁾) などにおける過渡期の天体として位置づけられることも多かったが、低密度領域にも E+A 銀河が多数存在

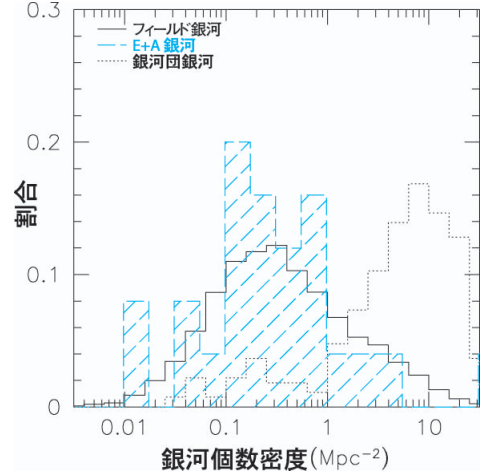


図 2 E+A 銀河の存在環境。E+A 銀河、フィールド銀河、銀河団銀河のそれぞれについて、銀河の存在環境を銀河個数密度の分布として示してある。青線が E+A 銀河、実線がすべての銀河、点線が銀河団銀河である。それぞれのサンプルは $M_r < -20.5, z < 0.1$ の体積限定サンプルから選んである。ここでは銀河個数密度は $\pm 1,000 \text{ km s}^{-1}$ 内で 5 番目に近い銀河までの距離を測り、銀河個数密度に焼き直してある。銀河団銀河は銀河団中心より $\pm 1,000 \text{ km s}^{-1}$ 内、角度方向 0.5 Mpc 内にあるものをもってある。E+A 銀河の存在環境は銀河団銀河のそれとは大きく異なり、フィールド銀河の存在環境とよく一致している。

することから、E+A 銀河を銀河団の進化に関連づける視点は見直しを迫られることになる。

4. E+A 銀河はダスト(塵)に覆われたスターバーストだろうか？

この説は E+A 銀河は星形成を今現在も続けているという立場をとる。実は存在する星形成 ($H\alpha$, [OII] などの輝線) が、厚いダストによって隠されているとすると、スターバースト+厚いダスト吸収によって E+A 銀河のスペクトルを説明できる可能性がある。実際に、Smail ら¹³⁾はダストに隠された星形成銀河を発見し、そのような可能性を提唱している。

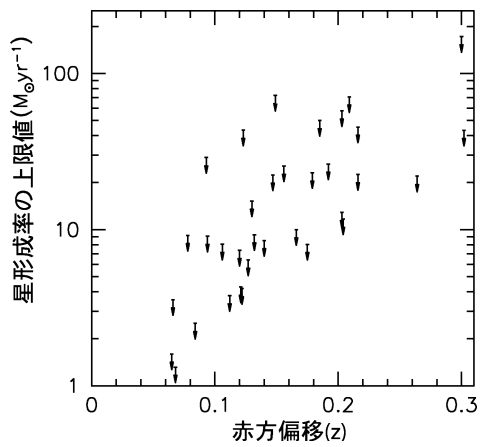


図 3 20 cm の波長帯での VLA 電波観測から得られた E+A 銀河の星形成率の上限値. 筆者らが観測した 34 個の E+A 銀河はどれも VLA では検出されなかったため、ノイズレベルの 3σ から計算した上限値を星形成率の上限値に焼き直してある.

ダストに邪魔されずに星形成を観測するにはどうすればよいだろうか？ダストは一般に短い波長の光ほどよく吸収する。つまり、この説を検証するためには、ダストの影響を受けにくい長い波長で星形成を観測すればよい。20 cm の電波放射は主に重い星が超新星爆発を起こした後のシンクロトロン放射に起因するから、20 cm の電波強度は一般によく星形成率を反映することが知られている¹⁴⁾。そこで筆者らは 20 cm 帯の電波で星形成を捕らえるべく Very Large Array (VLA) に観測提案をした。VLA はアメリカのニューメキシコ州にある電波望遠鏡で、25 m のアンテナを 27 基つないで干渉計にしてある。幸いにして 27 時間の観測時間をいただき 34 個の E+A 銀河を VLA の CnB 配置で観測することができた。得られた結果は衝撃的であった。34 個の E+A 銀河のどれも電波観測では検出されなかったのである。図 3 に電波観測により得られた星形成率の 3σ 上限値を示す。 $z < 0.3$ の E+A 銀河すべてについて星形成率は $100 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 以下、 $z < 0.08$ のものについてはさらに厳しい制限が得られ、星形成率は

$10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ 以下となった¹⁵⁾。どうやら、E+A 銀河はダストに覆われたスターバースト銀河ではないようである。

5. 合体・衝突起源説

ここで少し視点を変えて、E+A 銀河をモデルと比較してみたい。図 4 は静止系での $u-g$ の色を $H\delta$ 吸収線の等価幅に対してプロットしてある。E+A 銀河は小さい青丸で示されていて、同じ母サンプルのフィールド銀河の分布はコントアで示されている。E+A 銀河は $H\delta$ 吸収線の等価幅が他の銀河のそれに比べて大幅に大きいことがわかる。青破線で示したのは Bruzual と Charlot¹⁶⁾ の理論モデルでポストスターバーストの星形成史を

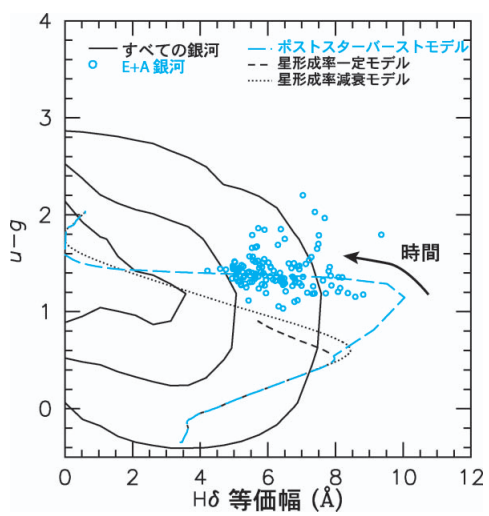
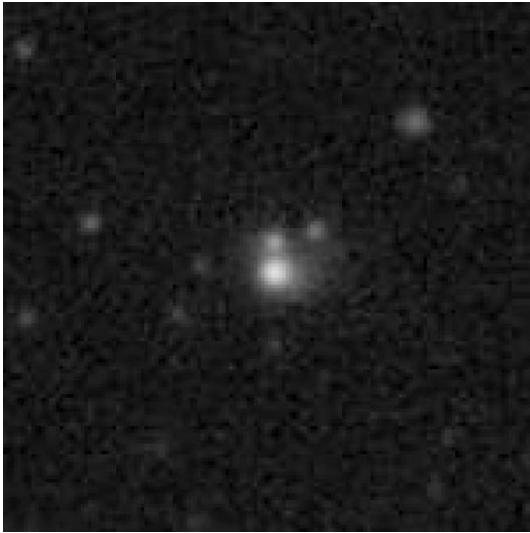


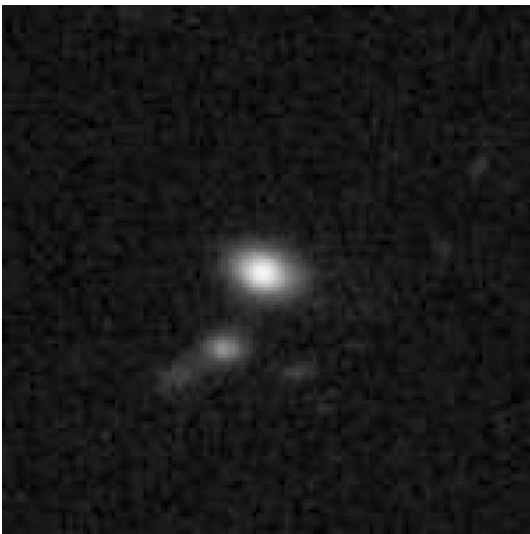
図 4 $u-g$ の色 (静止系) を $H\delta$ の等価幅に対してプロットしてある。E+A 銀河は青丸で示され、フィールド銀河の分布はコントアで示されている。内側のコントアほど銀河の数が多。青線、破線、点線はそれぞれ、ポストスターバーストモデル、星形成率一定のモデル、星形成率減衰モデル (10 億年のスケールで指数関数的に減少) を示している。モデル計算は太陽と同じ金属量と Salpeter 型の初期質量関数を仮定して、筆者の開発したコード¹⁵⁾を用いて行っている。ポストスターバーストモデルだけが E+A 銀河の観測値をよく説明していることが見てとれる。



(a)



(b)



(c)



(d)

図 5 若い E+A 銀河 ($H\delta$ 等価幅 $>7 \text{ \AA}$) の顔写真. それぞれの写真は $60'' \times 60''$ の大きさにて, g, r, i のカラー合成である. どの E+A 銀河も伴銀河を近くに持つことがうかがえる.

再現したものである. モデルはデータ点とよく一致し, E+A 銀河の性質をよく再現している. これに対して, 一定の星形成を続けるモデル (黒破線) および, 10 億年のスケールで星形成を指数的に弱めるモデル (黒点線) は E+A 銀河の性質をよく反映していない. これはすなわち, モデルを

使っても E+A 銀河がポストスターバースト銀河であることが確認されたといえる.

この図でもう一つ注目したいのは, モデルの線は $u-g$ の小さい側から大きい側に向かって (図の下から上に向かって) 時系列をなしているという点である. すなわち, ポストスターバーストのモ

表 1 すべての E+A 銀河, 若い E+A 銀河 ($H\delta$ 等価幅 $>7 \text{ \AA}$), ランダムサンプルについて, それぞれ 50 kpc, 75 kpc 内の伴銀河の数. 伴銀河の個数は中心の銀河の赤方偏移を仮定し, 絶対等級 $-23.0 < M_r^* < -19.5$ の明るさの範囲にある銀河の数を角度方向 50 kpc, 75 kpc 内で数えた. 背景/前景の銀河の影響は平均の銀河密度を用いて統計的に差し引いてある.

サンプル	50 kpc 内の伴銀河の数	75 kpc 内の伴銀河の数
ランダム	0.03 ± 0.01	0.16 ± 0.01
すべての E+A 銀河 ($H\delta$ 等価幅 $>4 \text{ \AA}$)	0.12 ± 0.03	0.26 ± 0.04
若い E+A 銀河 ($H\delta$ 等価幅 $>7 \text{ \AA}$)	0.24 ± 0.09	0.40 ± 0.12

デル (青破線) を仮定するならば, $H\delta$ 吸収線のより強い E+A 銀河 (図のより右側) の方が, より若い E+A 銀河ということになる. E+A 銀河が若いと言うことは, より星形成を急に止めた時期に近いということであり, 若い E+A 銀河をより詳しく調べればもっと手がかりが得られるのではないか……と考えた筆者らは, $H\delta$ の等価幅が 7 \AA 以上の E+A 銀河を若い E+A 銀河として取り出して特別に調べてみることにした. 青破線のモデルによるとこれらの若い E+A 銀河は星形成を急に止めてから 2.7~4.3 億年という時期にあることになる.

図 5 がこれら若い E+A 銀河の g, r, i バンドの画像を合成した顔写真である. 何かお気づきになるだろうか? まずどの銀河も高い中心集中度を持っており, 渦巻き形態はしていない. それに加えて, 近くに伴銀河が多く存在するように筆者らには見受けられた.

そこで筆者らは, これを統計的に確かめるべく, SDSS の撮像データから, E+A 銀河から距離 50 kpc および 75 kpc 以内にある伴銀河の数を数えた. ここでは中心の E+A 銀河の赤方偏移を仮定したときに r バンドの絶対等級が -23.0 から -19.5 等級にあたる銀河のみを数え*, 無関係な銀河が見かけ上同じ方向にある効果は補正した. 表 1 にこの結果を示す. 比較のためにすべての E+A 銀河, およびランダムに抽出された 1,000 個の銀河についても同じ計算をして伴銀河の数を示

してある. 驚いたことに若い E+A 銀河はランダムに選ばれた銀河に対して, 50 kpc 内で 8 倍, 75 kpc 内でも 2.5 倍の伴銀河を持つことがわかった.

E+A 銀河が統計的に多くの伴銀河を持つということは, その起源が伴銀河との重力相互作用にあるのではないかということを示唆している. 一般的に銀河同士の近接相互作用が銀河の星形成を刺激することは知られているから¹⁷⁾, E+A 銀河が伴銀河との合体・衝突の際に急激なスターバーストを起こし, さらにこのスターバーストが星形成の源であるガスを消費し尽くした瞬間, 急に星形成が止まってしまったとすると, 図 1 に示したような E+A 銀河のスペクトルも自然に理解される. コンピューターシミュレーションにおいては, 衝突・合体を経験した銀河は楕円銀河的な形態を示すことが知られている¹⁸⁾. 図 4 で E+A 銀河の写真が楕円銀河的形態を示していたのも伴銀河との衝突・合体の結果として理解しうるかもしれない. どうやら, このあたりに E+A 銀河の起源がありそうである.

いずれにしても 20 年来謎とされてきた E+A 銀河の起源に, 伴銀河の過多という大きなヒントが見つかったことに違いはない. まさに EUREKA (わかった) という瞬間という言い過ぎだろうか.

*2 この原稿中では宇宙論パラメーターは, $(\Omega_m, \Omega_\Lambda, h) = (0.3, 0.7, 0.75)$ という値を用いている.

謝 辞

本稿は筆者が東京大学でまとめた博士論文¹⁹⁾の一部を元に作成したものです。長年にわたり指導していただいた関口真木，岡村定矩両先生に感謝いたします。また，SDSS の望遠鏡の建築ならびにデータの取得に多大に貢献された SDSS 日本グループの皆様，SDSS Collaboration の皆様，本稿に関して貴重なコメントをいただいた藤田 裕氏に感謝いたします。

参 考 文 献

1) Dressler A., Gunn J. E., 1983, ApJ 270, 7
 2) Franx M., 1993, ApJ 407, 5
 3) Zabludoff A. I., et al., 1996, ApJ 466, 104
 4) Galaz G., 2000, AJ 119, 2118
 5) Abazajian K., et al., 2003, AJ 126, 2081
 6) Fukugita M., et al., 1996, AJ 111, 1748
 7) Goto T., et al., 2003, PASJ 55, 771
 8) Fujita Y., 2004, PASJ 56, 29
 9) Couch W. J., Sharples R. M., 1987, MNRAS 229, 423
 10) Poggianti B. M., et al., 1999, ApJ 518, 576
 11) Goto T., et al., 2003, PASJ 55, 739
 12) Goto T., et al., 2003, MNRAS 346, 601
 13) Smail I., et al., 1999, ApJ 525, 609

14) Condon J. J., 1992, ARA&A 30, 575
 15) Goto T., 2004, MNRAS, submitted
 16) Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS 344, 1000
 17) Liu C. T., Kennicutt R. C. Jr., 1995, ApJ 450, 547
 18) Barnes J. E., Hernquist L., 1992, ARA&A 30, 705
 19) Goto T., 2003, Ph. D. Thesis, The University of Tokyo, astro-ph/0310196

The Origin of E+A Galaxies

Tomotsugu Goro

Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, 3400 North Charles Street, Baltimore, MD 21218-2686, USA

Abstract: The origin of E+A (post-starburst) galaxies has been a mystery for more than 20 years. By analyzing the large and uniform sample of 133 E+A galaxies selected from the Sloan Digital Sky Survey, we have found that (i) E+A galaxies are ubiquitous in the field region; (ii) E+A galaxies are not likely to be dusty-starbursts; (iii) E+A galaxies have more companion galaxies than normal galaxies do.