

活動銀河中心核の広がった輝線放射領域

吉 田 道 利*

1. はじめに

活動銀河中心核 (AGN) は、極めてパワフルな活動を示す天体であり、特殊な銀河中心核であると考えられている。その概観は綾仁氏の稿にゆずるとして、ここでは AGN の外側の領域に目を向けてみることにしよう。

AGN を分光観測すると、様々な原子から放射される輝線がたくさん見える。それらのほとんどは点状の放射源、つまり AGN そのものから放射されている。しかし、いくつかの AGN では、AGN のある位置以外の所から放射されている輝線が観測されるのである。しかも、詳しく観測すると、その輝線放射領域は大体 AGN を中心にして、数千~数万光年のスケール (大まかに言って銀河系の 1~1/10 の大きさ) で広がっていること、その輝線間の強さの相対比が我々の銀河系に存在するいかなる天体のそれとも異なることなどがわかる。

いくつかの AGN がこのような広がった輝線放射領域を持つことは、1970 年代に分光観測からわかっていた。1980 年代に入って、CCD という非常に感度の良い観測装置 (超高感度のテレビカメラのようなもの) を用いた狭帯域撮像という観測手法が行えるようになり、一気に様々な AGN に広がった輝線放射領域が存在することが明らかになった。狭帯域撮像とは、輝線だけが透過してくるような特殊なフィルターを通して、輝線で光っているところのみの写真を撮る方法で、広がった輝線放射領域の形態がよくわかる (図 1)。

今日では、クェーサー、電波銀河、セイファート銀河など AGN の種類によらず、かなりの数の AGN に広がった輝線放射領域が存在することがわかっている。AGN に存在する、数千~数万光年にわたって広がる輝線放射

領域を、ここでは EELR (Extended Emission Line Region) と呼ぶことにする。EELR とは何なのだろうか? AGN とはどのようなつながりがあるのだろうか?

2. EELR—輝線放射メカニズムのおさらい

そのことを考える前にまず、輝線の放射メカニズムをおさらいしてみよう。可視光で見える輝線は、何等かの理由で高エネルギー状態になった (まあ、簡単に熱くなくなったと思って貰えば良い) 原子がエネルギーを失う (つまり、冷える) ときに失ったエネルギーに相当する光を放出するという現象を示している。輝線の“線”とは、ある特定の波長の光だけが明るく、分光するとその波長だけが輝き、線のように見えることを示している。

原子がエネルギーを失うとは、実際には原子核の周りを回っている電子がその軌道を変えることに他ならないのだが、電子はいくつかの (本当は無限個の) 決まった軌道しか回らない。原子内には電子の通るレールが何本かあって、そのレール間を電子が行ったり来たりしているようなものだ (図 2)。レールが固定されているので、レール間の移動に伴うエネルギーの得失量はどのレール間を電子が移動するかによって決まっている。ある高エネルギーのレール (レール 1 としよう) から、別の低エネルギーのレール (レール 2 とする) に電子が移動するとき、レール間のエネルギー差に等しい決まったエネルギーが失われる。つまり、このとき放射される光はある特定の波長を持つことになる。レール 1 からレール 2 への電子の移動が多数の原子で起こったら、その移動で出される光は強くなる。そうして特定の波長の光が強められて輝線として観測されるわけである。

輝線が出されるためには、電子はエネルギーの高いレ

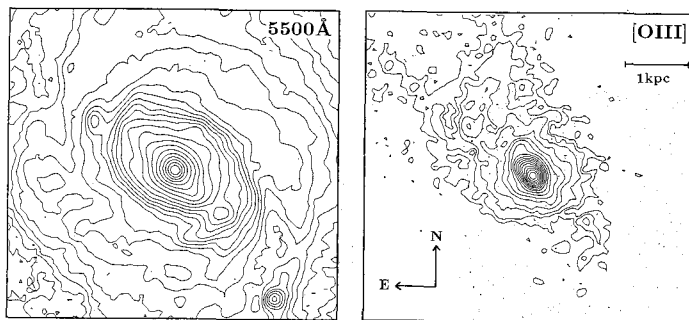


図 1 セイファート銀河 NGC 1068 の EELR (1 kpc は 3260 光年のこと)。左図は 5500 Å 付近の連続光イメージ (星の分布を示す)、右図は [O III] 輝線イメージ (EELR)。EELR が、数千光年にわたって星と全く異なる分布を示している。

* 京大理 Michitoshi Yoshida; Extended Emission Line Region of Active Galactic Nuclei

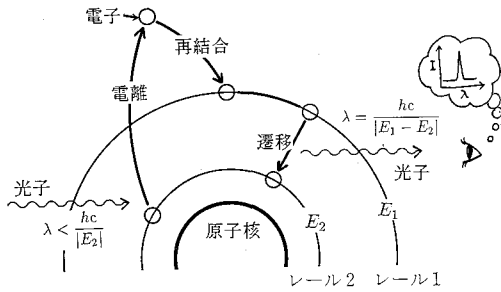


図2 光子電離による輝線放射メカニズムの概念図。過程は図の左から右へ進行する。ある限度を越えた高エネルギーの光(光子)によって原子が照らされると、電子が原子の外へ飛び出す(電離される)。外へ飛び出した電子は次第にエネルギーを失い、また電離原子によって捕まえられる(再結合)。このとき一般に、電子は原子内の比較的高いエネルギーを持った軌道に捕まえられる。こうして高いエネルギーの軌道にいる電子が、低いエネルギーの軌道に移動(遷移)すると、軌道間のエネルギー差に応じた波長を持つ光が放出される。これが輝線として観測されるのである。放出される光の波長は図中の式によって計算される。ここで、 λ は光の波長、 c は光の速さ、 h は定数(プランク定数と呼ぶ)、 E_1 、 E_2 はそれぞれの軌道のエネルギーである。

ールから低いレベルに移動しなければならない(そうでないとエネルギーを放出できない)。言い換えると、輝線を出すような原子は予め外からエネルギーを与えられて高エネルギー状態になっている必要がある。そこで、輝線が観測されれば、そこに原子を高エネルギー状態にするエネルギー源が存在することを示している。与えられるエネルギーがある限度を越えると、電子は原子に留まっていられなくなり、外へ飛び出してしまふ。これを電離されるという。特に、紫外線やX線の光子からエネルギーを与えられて電離する場合を光子電離という。

外へ飛び出した電子がエネルギーを失うと、電離された原子(イオン)に再び捕まってしまう。これを再結合という。このあと、捕まえられた電子は原子内で次々と低エネルギーのレベルに軌道を変えていき(冷えてい

き)、その過程で様々な輝線を放射する。こういうメカニズムで放射される輝線を再結合線という。水素原子の出す $H\alpha$ 線がその代表である。電離によって外へ飛び出した電子によって原子が叩かれてエネルギーを得、その結果、輝線を放出することもある。こうして出される輝線を衝突励起線という。2階電離された(2つ電子を失った)酸素原子が出す衝突励起線の1つが星雲線として有名な波長 5007 \AA の輝線([O III] $\lambda 5007 \text{ \AA}$ 線という)である。天体観測に於て、可視光で見える輝線のほとんどは再結合線が衝突励起線である。

再結合線はもちろん電離された原子の存在を意味しているが、衝突励起線も強いものの大半は、[O III] $\lambda 5007 \text{ \AA}$ 線のように電離された原子から放出されるものであることがわかっている。ここにきてお分かり頂けたと思うが、天体に於ける輝線放射領域とは、電離原子の集合体(電離ガス)のことなのである。そして、そのことは、原子を電離する外部エネルギー源がその領域の近くに存在するというでもある。

3. EELR——その電離源

さて、ようやく AGN の EELR について考える準備が出来た。一つの銀河内では、星の分布とガスの分布は一般に異なる。しかしながら、電離ガス輝線(放射領域)の分布は、普通の銀河の場合、エネルギーの高い青い星の分布と重なる。このことは、電離ガスを作り出すには電離エネルギー源が必要な事からすれば、ちっとも不思議ではない。明らかに高エネルギーの星の光がガスを電離しているのであり、そうした星の周りに電離ガスが作られているのである。ところが、EELR の分布は、普通の銀河と違って、青い星の分布とは全く異なる分布を見せているのである(図1, 3参照)。しかも、中心核から細長く伸びたような構造を示しているものが多い。

単に分布が変わっているだけではない。EELR から放出される様々な輝線の強度比も、通常の銀河に存在する輝線放射領域の輝線強度比と大きく異なっている。通常

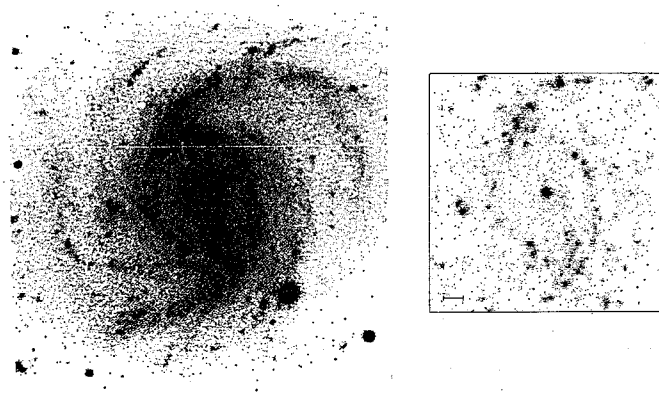


図3 渦巻銀河 NGC 5921 の星の分布(左図)と輝線放射領域の分布($H\alpha$ 線, 右図)。図1と異なり、電離ガスは青い星の集中する渦巻腕に沿って分布しており、中心核から伸びるような構造は見られない。

の銀河で青い星の周りに存在する輝線放射領域は、相対的に $H\alpha$ 線が強いのにに対して、EELR においては、上述の $[O III]\lambda 5007 \text{ \AA}$ 線が非常に強く、また、窒素や硫黄の衝撃励起線も強い。このような輝線強度比の特徴は星の光では作り得ないことがわかっている。そして、むしろこうした輝線強度比は、AGN の NLR (Narrow Line Region; 綾仁氏記事参照) に似ているのである。

上のような 2 つの事実から、「EELR は星によって電離されているのではない」と結論できよう。では、EELR を電離しているエネルギー源は何か？ 答えは明かである。 “AGN” である。

4. EELR——その電離メカニズム

EELR の電離エネルギー源は AGN だと先ほど述べたが、その詳しい電離メカニズムについては 2 つの異なる考え方がある。1 つは、AGN の強力な中心核紫外線、X 線による電離 (光子電離) である。もう 1 つは、衝撃波による電離である。これらの電離メカニズムの違いは、観測される輝線強度比の違いとなって現れる。光子電離では、ガスは特別な運動をしている必要はなく、ただ、高エネルギーの光に照らされさえすればよい。一方、衝撃波による電離では、EELR のような高電離のガスを作り出すには、秒速数 100 km の速さを持つ衝撃波を発生させるような激しい物質の運動がなければならない。

結論からいうと、EELR 全体の輝線強度比は、光子電離的であることが多い (例えば、図 4)。しかし、個々の EELR によって、また、同じ EELR でも場所によって少しずつ輝線強度比は異なり、光子電離的輝線強度比からずれているものもある。EELR の運動を観測すると、少なくとも EELR の外側の部分に関してはガスはおとなしい動きしかしていない。セシル (Cecil, Ap. J., 355, 70, (1990)) 達は、我々の銀河系に最も近い AGN である NGC 1068 というセイファート銀河の EELR を

詳細に観測したが、彼らの結果によると、EELR の内側の部分 (中心核から数 100 光年以内) で、中心核から秒速数 100 km で吹き出すガスを見つけた。このような詳しい観測はまだ 2~3 例しかないが、いずれも中心核近くの EELR は中心核から吹き出すような運動を示している。

EELR の電離メカニズムは光子電離が主要な役割を占めているようだが、衝撃波との混在を示唆する部分もあり、EELR ガス中で何が起きているのかを正確に述べることは今のところできない。電離メカニズムの特定は、ガスの正体 (起源) を知る上でも大切であり、特に EELR の場所毎の電離メカニズムを決めることが重要である。この目的には、後述する 3 次元分光観測が大きな役割を果たすものと思われる。

5. EELR——AGN 解明への道

AGN に付随する輝線放射領域には、BLR や NLR などがあり、それぞれ AGN の理解に欠くことの出来ない領域である。EELR はこれらの輝線放射領域と何が違うのか？ 一言で言ってサイズである。EELR は銀河全体にも広がるような巨大なサイズを持った輝線放射領域である。BLR や、NLR が中心核近傍に存在し、AGN そのものと深く関わっているのに対して、EELR は AGN とその親銀河 (AGN を有する銀河のことをこう呼ぶ) とをつなぐものといえる。

AGN には様々な謎があり、今日でもその多くが解決されていないが、AGN にまつわる謎には大きく分けてふたつの側面がある。一つには当然、AGN の活動性の正体、言い替えば、AGN の構造に関する謎であり、もう一つには AGN の形成に関する謎である。AGN の構造に関しては、観測事実を矛盾なく説明するには至っていないものの、現在いくつかの簡単なモデルが考えられており、少しずつ理解が進んでいる (綾仁氏記事参照)。しかし、AGN がどうして (どのようにして) でき

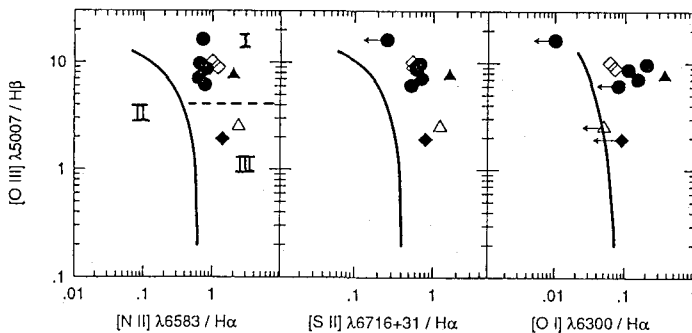


図 4 いくつかのセイファート銀河の EELR の輝線強度比 (Pogge, Ap. J., 345, 730 (1989)). $[O III]\lambda 5007/H\beta$ は 2 階電離された酸素原子の波長 5007 \AA の輝線と $H\beta$ 輝線の強度の比を表わす。 $[N II]\lambda 6583$, $[S II]\lambda 6716+31$, $[O I]\lambda 6300$ はそれぞれ 1 階電離された窒素の 6583 \AA の輝線、1 階電離された硫黄の 6716 \AA と 6731 \AA の輝線、中性 (電離されていない) 酸素原子の 300 \AA の輝線を表わす。丸や三角で書かれた点が観測点。図中の領域 I は、AGN 的な高エネルギー光による光子電離、領域 II は星の光による電離、領域 III は衝撃波による電離をそれぞれ示す。EELR はほとんど領域 I にある事が分かる。

たのかという疑問は、ほとんど手つかずのままで残っているといつて良い。はっきり言えば全然分かっていないのである。

EELRは、これらふたつの謎と重要な関わりを持っている。既に述べたように、EELRはAGNによって形成されたものであることが、観測から強く示唆されている。とすれば、EELRの様々な特徴を決めているのはAGNそのものであることになる。しかも、AGNからかなり離れていることから、AGN近傍の物質の影響を積分した形のAGN放出エネルギーが、EELRの特徴を決めているはずである。つまり、EELRはAGN近傍の物質構造を反映していると考えられる。

EELRが、細長く伸びたような構造を呈していることが多いと既に述べたが、この特徴は電離度の高いガスほどますます顕著になることが、いくつかのセイファート銀河の観測から知られている(図5)。これなど、高電離ガスを作り出す高エネルギー光が、AGNから細長く伸びた領域に放出されていることを示すもので、つまりはAGNからの高エネルギー放射はその放出方向が等方的ではなく、ある方向に片寄っているのである。AGN近傍に放射を片寄らせる構造が存在するはずである。こうして、AGN近傍に放射をブロックする分厚いトーラス(ドーナツ)が存在するという仮説が提出された。AGNの放射はトーラスの穴の方向にだけ逃げだし、EELRを形成するというモデルである。実はこのトーラス仮説は他の観測から示唆されていたものであるが、EELRの研究からも支持されたのである。

AGNが銀河の中心核であるという事実から、AGNの形成問題は、AGNと親銀河の間の相互作用を抜きにしては考えられない。EELRはまさにAGNと親銀河の相互作用の現場である。少なくとも、親銀河に対して

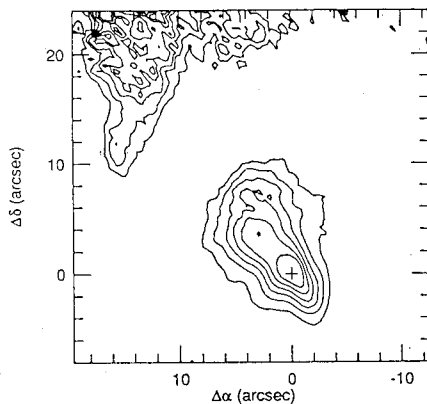


図5 セイファート銀河 NGC 1068 の EELR で、[OIII] 輝線の強調されている領域 (Pogge, Ap. J., 345, 730 (1989)). 高電離ガスが中心核 (+印) から細長く伸びている。

AGNが作用した結果がEELRである。問題は、EELRからAGNへの反作用があるのか、あるとすればどういふものなのかという点にある。この問題を考えるには、EELRを構成するガスの正体を知らなければならない。EELRを構成するガスは通常の銀河にあるような星間ガスと同じものなのか、AGNから噴き出したガスなのか、或は、銀河の外から降り積もってきたガスか。EELRガスはAGNへの燃料なのか。残念ながら、現在、これらの疑問に明確に答えられるほどの観測がない。しかし、将来観測が進み、EELRガスの正体について明確な答えが得られれば、EELRとAGNとの関係がよりはっきり見えて来るようになるだろう。

6. EELR——その観測

EELRの観測はこれまで、特定の輝線での狭帯域撮像や長いスリットを用いた分光といった手段で行われてきた。EELRの存在を明らかにした狭帯域撮像という観測方法は、波長情報を極端に犠牲にして(ある特定の輝線のみを見るというように)EELRの空間的構造を得てきた。一方、スリットを用いた分光は、EELRの特定の場所の物理状態、運動状態等を明らかにした。しかしながら、EELRは空間的に広がっているので、本来はEELRの各場所における分光をして、空間構造と物理・運動状態を同時に得なければEELRの全体像は見えてこない。したがって、これからのEELRの研究には3次元分光(空間2次元、波長1次元の3次元情報を同時に得る)が必要不可欠となろう。現在までのところ、世界には数種の3次元分光装置が存在し、それらを用いていくつかのグループがEELRの3次元分光観測を行いつつある。

我々京都大学のグループ(大谷他)は、昨年度、岡山観測所にSNG(スペクトロ・ネビュラ・グラフ)という3次元分光システムを構築し、それを用いていくつか

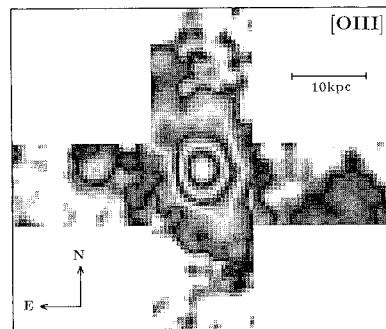


図6 セイファート銀河 3C 120 の [OIII] 輝線イメージ。岡山観測所のSNGで得られた。南北方向と、東西方向のスキャンデータを重ね合わせて表示している。この複雑な構造を持つEELRは、サイズ、強度ともにセイファート銀河中で最大規模のものである。ちなみに3C 120の親銀河の長軸は北西を向いており、EELRの広がり方向とほぼ直角である。

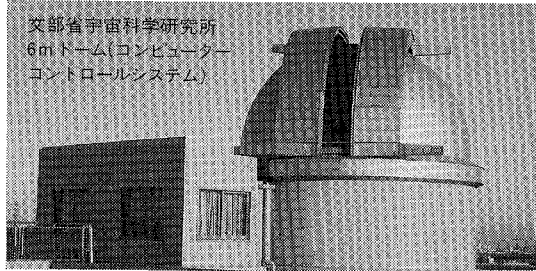
の AGN について EELR の 3次元分光観測を行おうとしている。SNG は、スリット分光器を用い、スリットを天球に対して移動させつつデータを取得するシステムで、異なる天球位置での分光データをくっつけて3次元データを得る。図6に、昨年冬に行なったセイファート銀河 3C 120 の SNG 観測の結果の一例を示す。3C 120 は 10 数万光年にもわたるような非常に巨大で複雑な構造を持つ EELR を有する。現在、スペクトルを詳しく解析中である。

7. ま と め

前述したように、EELR は AGN 活動と密接に結び付いているであろうし、AGN の理解のためには EELR の研究は重要である。しかしながら、EELR の構造や、物理・運動・化学組成などの特質はまだ十分には理解されていない。この小文ではかなり断定的に EELR の一般的性質を述べてきたが、実は例外が結構存在し、それらに対する理解も進んでいない。これは、EELR の観測がこれまで2次元観測主流であったこと、発見されてから日が浅く十分な観測がなされていない(特に系統的な観測) ことなどが大きな要因を占めている。これからの EELR 理解のためのキーワードは3次元分光による系統的観測である。

ASTRO Observatory Domes

天文台の建設は青少年の未来の心をはぐくみます



文部省宇宙科学研究所
6mドーム(コンピュータ
コントロールシステム)

◆主な天体観測ドーム納入先◆

文部省宇宙科学研究所／東京大学教養学部／宮崎大学教育学部／東京学芸大学／埼玉大学／福島大学／川崎市青少年科学館／杉並区立科学教育センター／駿台学園一心荘(北軽井沢)／防衛大学校／東海大学宇宙情報センター(熊本)／日原文天文台(島根)／尾鷲市立天文科学館(三重)／葛飾区郷土と天文の博物館等の他全国に数多くの実績があります。

アストロ光学工業株式会社

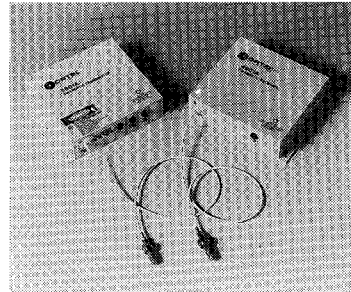
〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(3985)1321

NEW LIGHTWAVE

マイクロ波アナログ光伝送の決め手

ORTEL

米国オーテル社製高性能・高品質マイクロ波アナログ光伝送用送受信機をご紹介します。電波天文学・粒子加速器プロジェクトでのタイミング供給や、アナログ方式によるデータリンク、そして移動通信中継やレーダー中継分野における活躍が期待されております。



	Transmitter	Receiver
特長	<ul style="list-style-type: none"> ・アナログ伝送 ・低雑音/低歪み ・50Ω SMAコネクタ ・使用温度範囲(-40℃~70℃) ・InGaAsPレーザダイオード (1300nm) 	<ul style="list-style-type: none"> ・広帯域アナログ受信 ・50Ω SMAコネクタ ・シングルモード光ファイバ ・InGaAsPフォトダイオード (1300nm)
仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・3GHz/6GHz/10GHz/12GHz ・広帯域信号用 (CATV) 	<ul style="list-style-type: none"> ・3GHz/6GHz/10GHz/12GHz ・広帯域信号用 (CATV)

総輸入代理店



住友セメント株式会社

光・電子事業推進部 TEL(03)3296-9854
〒101 東京都千代田区神田美土町1番地 FAX(03)3295-5953