Observational Cosmology

Stephen Serjeant

東京大学理学部天文学科4年 安藤 亮

平成 26 年 7 月 10 日

6 Black holes

6.8 Black hole demographics

巨大質量 BH の質量 $M_{\rm BH}$ と、ホスト銀河の楕円体 1 の速度分散 σ との間の関係式

$$M_{\rm BH} = (1.66 \pm 0.32) \times 10^8 M_{\odot} \left(\frac{\sigma}{200 \text{ km s}^{-1}}\right) \tag{1}$$

を用いると、現在の BH の宇宙論的密度を見積もることができる。これは、式 (1) を楕円体の光度関数で積分するとともに、Faber-Jackosn 関係 2 を利用すると、BH の宇宙論的密度は

$$\rho_{\rm BH} = 9.4^{+3.9}_{-2.9} h^2 \times 10^5 M_{\odot} \,\,{\rm Mpc}^{-3} \tag{2}$$

と求められる。これは、クエーサーの number count を用いて Soltan が導出した値

$$\rho_{\rm BH} = \frac{1 - \eta}{0.9} \frac{0.1}{\eta} \times 8 \times 10^4 M_{\odot} \,\,{\rm Mpc}^{-3} \tag{3}$$

(η は降着効率) より 10 倍ほど大きな値となっているが。これは、広い輝線が見られる 1 型活動銀河 のみを考慮していたことによる。近傍では 2 型活動銀河は 1 型活動銀河の 4 倍ほど存在しているが、 この近傍での値を用いて Soltan の議論を拡張するには、1 型と 2 型の数の比が進化するものとする か、bolometric correction を補正する必要が出てくる。

活動銀河の X 線での number count を用いて、Soltan が行ったのと同様の分析を行うこともできる。この場合、少なくとも Compton-thin な 2 型の活動銀河は考慮され、導出される BH の宇宙論的 密度は

$$\rho_{\rm BH} = (4.7 - 10.6) \times \frac{1 - \eta}{9\eta} \times 10^5 M_{\odot} \,\,{\rm Mpc}^{-3} \tag{4}$$

となる。近傍の BH 数密度と比較すると、降着効率に弱いながらも $\eta = 0.04 - 1.6$ という制限を与えることができる。クエーサーが降着に要する時間の割合 (duty cycle) や、降着効率、Eddington 比などをモデル化する試みはすでに複数なされており、こうしたモデルでの初期条件は、近傍の BH の質量関数³、進化するクエーサーの光度関数、そして 1 型と 2 型の活動銀河数比の光度依存性である。

1渦巻銀河の場合はバルジの部分、楕円銀河の場合は銀河全体を表す。

 $^{^{2}}$ 渦巻銀河の速度分散 σ_{v} と光度 L との間に、 $L \propto \sigma_{v}^{\alpha}$ という冪乗則が成り立つという関係。

³単位体積単位質量あたりの BH の数。

近傍銀河の X 線観測から、銀河の中心に位置しているわけでもないのに極めて明るい X 線源 (ultraluminous X-ray sources, ULX, 光度 10^{32} W = $3 \times 10^5 L_{\odot}$ 以上)の存在が明らかになった。も しこれらが BH だったとすると、質量 $10^2 - 10^4 M_{\odot}$ 程度の中間質量 BH ということになる。こうし た BH はどのように形成されたのだろうか。球状星団の中には、中心に中間質量 BH を有する証拠を 示すものもあり、こうした球状星団は銀河の楕円体と同様な $M_{\rm BH} - \sigma$ 関係に従うことも分かってい る。このような中間質量 BH が銀河の中心に落ち込むことによって、巨大質量 BH が形成されるのか 否か、また中間質量 BH が球状星団の形成にどのように関与しているのか、さらには ULX が実際に 中間質量 BH なのか、あるいは super-Eddington state の X 線で明るい降着を起こしている恒星質量 BH なのかといった問題は、目下明らかになっていない。



図 1: Swift X 線望遠鏡による M31 銀河の 2 つの ULXs (NASA/Swift)



図 2: M31 銀河における ULX の位置 (NASA/Swift)

6.9 Observation of black hole growth and the effects of feedback

BHと銀河と、どちらが先に形成されたのだろうか。現状この問題に観測的制限を与えるには、不確定性が大きい。この問題は実は、銀河団における cooling flow problem ⁴ との関連があり、銀河団の中心部の銀河で BH によって星形成が制限されている兆候を、銀河団コアに存在する低温高密度のガスから観測することができる。

BH の sphere of influence (SOI) を直接分解することは、一部の近傍銀河を除いて目下技術的に困難である。近傍銀河での $M_{\rm BH} - \sigma$ 関係は、多重衝突などを含む数十億年の BH 進化の結果生じたものである。直感的には、 $M_{\rm BH} - \sigma$ 関係は進化の初期段階ですでに生じていると考えられるし、数値シミュレーションでも、一度この関係が生じれば、銀河衝突を経てもこの関係はずっと維持されることが分かっている。しかしながら、高赤方偏移における BH とホスト銀河の関係性を、直接観測することは極めて難しい。

それでも、多少は直接的なアプローチもあり、例えば reverberation mapping ではクエーサー BH の質量を導出できるし、クエーサーのホスト銀河における吸収線幅からは速度分散を求められる。この2つの手法で信頼できる測定が可能ならば、BH とホスト銀河との関係の進化に何らかの制限を与えることができる。

また、radio-loud active galaxy unification model を利用するという手法もある。radio-loud な電 波銀河⁵ は、一般に AGN から intergalactic medium の bow shock ⁶ にまで伸びる強力な電波ジェッ トを有している (図 3)。radio-loud unification model では、活動銀河にはダストのトーラスがあり、 このためにクエーサーの broad line region が遮られるような方向が存在する。クエーサーと電波銀 河が同じ光度の電波ローブを有していたとすれば、それらは同様の天体を異なる方向から見たもの である。したがって、電波銀河を調べることでホスト銀河の特徴を知ることができ、またクエーサー の分布の中で前述の電波銀河に対応する天体と比較することで、クエーサーの性質も調べることが できる。この手法から、BH 質量とホスト銀河の性質との関係に進化の兆候がある証拠が、弱いなが らもいくつか見つかっている。

Madau diagram⁷ を BH への降着の歴史と比較すると、クエーサーが存在している時代より以前 に、大量の星形成が起こっていたことが示唆される。電波源のカタログ 3CRR⁸ にある銀河の質量 と BH 質量とを比較すると、 $M_{\rm BH}/M_{\rm spheroid}$ の比は赤方偏移が大きくなるほど増大していることが 分かり、このことから、大半の大質量 BH はホスト銀河よりも先に存在していて、その BH の周囲に 銀河の楕円体が形成されたということになる。



図 3: 電波銀河 Cygnus A (VLA, NRAO)

⁴銀河団コアの高密度領域では、ガスの冷却時間のタイムスケールが、自由落下時間のタイムスケールよりも長くなること から、ガスは純静水圧並行的に成長する。コアの中でガスが冷却されると、中心から離れた位置ではガスに加わる重力を圧力 で支えきれずガスが圧縮されるので、中心部での冷却時間がさらに短くなり暴走的な冷却が起こる現象のこと。 ⁵電波銀河のうち radio-loud なものは 10%にとどまっているが、この理由は定かではない。

⁶磁気圏と周辺媒質との境界に生じる衝撃波のこと。この場合は、電波ジェットと intergalactic medium との境界面のことか。船の舳先 (bow) が起こす波と形状が似ていることからこう呼ばれる。

⁷紫外観測の結果から導かれた、宇宙の星形成史を表すグラフ。

⁸3C は Third Cambridge Catalogue of Radio Source のこと。159 MHz (後に 178 MHz) の波長で選ばれた電波源の カタログで、このカタログに記載された天体は、3C 273 などのように呼ばれる。3CRR は 1983 年に行われた 3C カタログ の第 2 改訂版である。

6. Black holes



図 4: AGN の構造

一方、サブミリ波で選ばれた銀河では、少なくとも可視の広い輝線が見えているサブミリ銀河につ いて、前述のクエーサーよりも *M*_{BH}/*M*_{spheroid} の比が小さくなっていることが知られている。加え て、多くのサブミリ銀河は硬 X 線でも検出されており、このことから一般的な銀河と比較して、サ プミリ銀河での BH への質量降着がより多く見られるといえる。おそらく大質量の爆発的星形成は、 質量降着により指数関数的に成長する BH からのエネルギー入力によって、最終的に多くが停止さ せられることになる。あらゆる *z* において、クエーサーは一般に超高光度なスターバーストである が、このことは必ずしも爆発的星形成の開始時点や終了時点において quasar phase になるというこ とを意味するわけではない。現状では、クエーサーにおける星形成率はクエーサー光度に対して

$$\frac{dM_*}{dt} \propto \left(\frac{dM_{\rm BH}}{dt}\right)^{0.44\pm0.07} \tag{5}$$

の依存性を有しているとされているが、この性質はクエーサーのフィードバックのモデルでは再現す ることができていない。



🗷 5: M33 (Subaru Telescope)



図 6: M31 銀河 (中心部) と NGC 205 銀河 (右下) (http://www.perezmedia.net/casgalleries/)

 $M_{\rm BH} - \sigma$ 関係の分散は、 $M_{\rm BH} - M_{\rm halo}$ 関係の分散よりも小さいようであり、このことから、重要なのはダークマターハローの質量ではなく、速度分散の方であると考えられる。これは、self-regulated black hole growth、すなわち BH への降着から生じるエネルギー放出によってガスの束縛が解け、BH 自身の成長に必要な燃料を断たれてしまうような現象と一致している。現在この分野では、前述の関係がどのくらい強いものなのかを調べ、物理的関連性の強さを明らかにする研究がなされている。たとえば、M33 や NGC 205 ⁹ といった銀河では、中心部の星の集団は通常と同じ中心質量 - 楕円体質 量関係に従うのにも拘らず、BH の数が他の銀河よりも圧倒的に少ないことから、異なる重要な関係 性が存在するのではないかと研究が進んでいる。また、近傍の活動銀河についても、星形成を起こしていないような星の集団と比べて、近年星形成を起こしたような銀河では、異なる Eddington 比 ¹⁰ の分布を示すことも分かっている。つまり、近年星形成を起こした銀河では、高い Eddington 比を示すのである。self-regulated black hole growth の中でも、ガスの供給が多い場合には星形成が起きるが、このガスが尽きると、BH への燃料は進化した星の mass loss だけになることから、BH は燃料不足に陥ることになる。前述の高い Eddington 比を示すような場合は、このような状況と一致している。

 10 Eddington 光度に対する全光度の比。これは、質量降着率の最大値に対する比とも等しくなる。すなわち

Eddington ratio =
$$\frac{L_{\rm bol}}{L_{\rm E}} = \frac{M}{\dot{M}_{\rm E}}$$

(6)

⁹アンドロメダ銀河 (M31) の2番目に大きい伴銀河。