

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	Botella Lasaga, Ignacio
論文題目	Structure of the outflow from super-massive black-hole seeds and its impact on the cosmological scales (超大質量種ブラックホールからのアウトフロー構造と宇宙論的スケールへの影響)		
(論文内容の要旨)			
<p>It is one of the biggest issues in black hole (BH) astrophysics how to precisely evaluate BH feedback to its environments. Previous work attempting to evaluate these phenomena have been limited by lack of observation evidence, computational power or other constrains. Aiming at studying the unique gas dynamics of super-Eddington flow around supermassive black hole (SMBH) seeds at high redshift, the thesis applicant carried out axisymmetric two-dimensional radiation hydrodynamic simulations through the Nested Simulation-Box (NSB) method which he has developed. This novel method consists of dividing the simulation box into individual simulation boxes each covering length scales of around 3 orders of magnitude. This allows the applicant to create a chain of simulations capable of covering any region of space between the cosmological inner boundary and the black hole boundary. In this thesis the applicant used 2 distinct simulation boxes, the first one covering the inner zone at $(2 - 3 \times 10^3) r_s$ (with r_s being the Schwarzschild radius) and the second covering the outer zone at $(2 \times 10^3 - 3 \times 10^6) r_s$. In order for these 2 boxes to form a single larger simulation one need to create a smooth connection between them. This guarantees a smooth connection of the physical quantities and thus a continuation between the inner and outer zones. One can hence simulate the evolution of gas outflow over a wide spatial range from the BH scale to the cosmological simulation scale.</p> <p>In the first (fiducial) model the applicant started the calculation by injecting mass through the outer boundary of the inner zone at a constant rate of $10^3 L_{\text{Edd}}/c^2$, where L_{Edd} is the Eddington luminosity and c is the speed of light, with a small angular momentum. At the center of the simulation box he placed a SMBH seed of mass of $M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\text{sun}}$. Powerful outflows are generated in the innermost region and they propagate from the inner zone to the outer zone. The outflows are characterized by velocity of $0.02c$ (or $0.7c$) and density of 10^{-17} (10^{-19}) g cm^{-3} in the edge-on (face-on) direction. Even in the outer zone the outflow is gradually accelerated as it travels by accepting radiation-pressure force. The final mass outflow rate at the outermost boundary is 60% of the injection rate. By extrapolating the outflow structure to a further larger scale, he found that the momentum and mechanical energy fluxes at $r = 0.1 \text{ pc}$ are $(10 - 100) L_{\text{Edd}}/c$ and $(0.1 - 10) L_{\text{Edd}}$, respectively. Moreover, he found that the impacts are highly anisotropic in the sense that larger impacts are given towards the face-on direction than in the edge-on direction. These results indicate that the BH feedback will more efficiently work on the interstellar medium than that assumed in the cosmological simulations.</p> <p>In the second model the applicant reduced the mass injection rate to $500 L_{\text{Edd}}/c^2$, while keeping all other initial values. He then found that the accretion process becomes more</p>			

efficient, while the outflow rate is less, about 40% of the injected mass rate. As a result, the generated wind is weaker, with velocity of $0.03c$ (or $0.7c$) and density of 10^{-18} (10^{-19}) g cm^{-3} in the edge-on (face-on) direction. Doing the extrapolation to the cosmological inner boundary (i.e., 0.1 pc) he obtained in this case the momentum and mechanical energy fluxes values of $(1 - 10) L_{\text{Edd}}/c$ and $(0.01 - 10) L_{\text{Edd}}$, respectively. This means again that the cosmological models tend to underestimate the impact from the AGN feedback.

(論文審査の結果の要旨)

宇宙は138億年前のビッグバンで始まったとされる。その後、現在に至るまでの宇宙の歴史を解明することは、天文学最大の課題の一つと言える。確かに観測の進展によって見える宇宙の進化の姿が少しずつ明らかにされているとはいえ、直接見えないブラックホールに関しては、依然謎に包まれている。銀河中心にあるとされる巨大ブラックホールはいつ、どのようにその種が形成され、その後どのように進化し周囲にいかなる影響を与えてきたのか。申請者の研究はこの内、種ブラックホールが周囲に与える影響（フィードバック）という課題に、新シミュレーション手法を提案して挑むものであり、研究の意義および志の高さは高く評価できよう。

なぜ、ブラックホールが周囲に与える影響を調べるのが難しいのか、それは考慮する物理過程の長さスケールが大きく異なることによる。たとえば太陽質量の1000倍の質量をもつブラックホールを考えると、そのサイズはおよそ 10^9 cmである。一方、宇宙論的シミュレーションで到達できるグリッドサイズはせいぜいサブパーセク、すなわち 10^{18} cmである。そこに9桁の差がある。したがって単一のシミュレーションで、精度良くアウトフローの発生と伝搬を解くことはできない。そういう理由で、ブラックホール・フィードバックの研究は、ブラックホール近傍を分解するブラックホールスケールシミュレーションと、宇宙の大規模構造を計算する宇宙論的シミュレーションと、大きく二つのグループにきれいに分かれていた。

申請者は、そのギャップを埋めるべく、シミュレーションボックスを内側ボックス ($2 - 3 \times 10^3$) r_s (r_s はシュバルツバルト半径) と外側ボックス ($2 \times 10^3 - 3 \times 10^6$) r_s とに分割し、それぞれを精度よく計算する手法 (Nested Simulation-Box) を編み出した。その間がスムーズに接続できるように幾多の工夫をして、ついにこの方法を完成させ、質量注入率が $10^3 L_{\text{Edd}}/c^2$ (L_{Edd} はエディントン光度) のケースについてアウトフローの伝搬を、6桁を超えるスケールに渡って追い、その構造を明らかにすることに成功した。単に発想するだけでなく、地道な努力によってシミュレーションを実現に至らせた意義は大変大きく、申請者の面目躍如たる成果と言えよう。

こうして明らかにされたアウトフローは、従来のナイーブな予想に反し、思いのほか強く、また非等方な構造をもっていた。すなわち、アウトフロー率は注入率の約6割、円盤面方向の速度は $0.02c$ だが、円盤面に垂直方向の速度は $0.7c$ にも達していた。また、宇宙論的シミュレーションの最小グリッドサイズの 0.1 pc において、アウトフローが与える運動量は $(10 - 100) L_{\text{Edd}}/c$ 、エネルギー (光度) は $(0.1 - 10) L_{\text{Edd}}$ にも及ぶもので、従来の予想を凌駕するものであった。当然、周囲へのインパクトも非等方的であり、その絶対値も大きくなる。今後の宇宙論的シミュレーション分野への大きな波及効果が期待できる。

次に申請者は、ガス注入率を半分にして同様の計算を行った。その結果、アウトフロー率は注入率の4割に及び、 0.1 pc のスケールでの運動量およびエネルギーインパクトはそれぞれ、 $(1 - 10) L_{\text{Edd}}/c$ 、 $(0.01 - 10) L_{\text{Edd}}$ であった。すなわち注入率を半分にしても、宇宙論的スケールへのインパクトは比較的大きく保たれている。このメカニズムの解明、および広範なパラメータスタディは今後の課題であるが、興味深い話題を提供し、今後の発展がさらに期待できる大きな成果といえよう。

以上まとめると、従来の謎であった、ブラックホールスケールから宇宙論スケールに渡るアウトフロー伝搬過程を解明すべく、新シミュレーション手法を提案して実行し、6桁以上のスケールの差を超えてアウトフローの構造を明らかにしたことは、当該分野の研究に新しい流れを生み出しうる成果と認められる。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年1月14日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： _____ 年 _____ 月 _____ 日以降