

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	稲吉 恒平
論文題目	Formation of supermassive black holes in the high-redshift universe (宇宙初期の超巨大ブラックホール形成)		
(論文内容の要旨)			
<p>多くの銀河の中心核で質量が太陽質量の100万倍から10億倍の巨大ブラックホールが存在している。その起源としては、星の重力崩壊で形成された質量が太陽質量の10倍程度のブラックホールにガスが降着することにより質量が増大して形成されたとするのが定説である。ところが、近年、質量が太陽質量の10億倍にも達する超巨大ブラックホールが、遠方 (赤方偏移が6以上) の銀河でも存在しているのが確認された。そのような遠方の銀河では宇宙が始まってから10億年程度しか時間が経っていないので、定説に従うとブラックホールの質量が増大する時間が足りない。</p> <p>申請者は、初期宇宙に質量が太陽質量の10万倍程度の超巨大星が形成されてブラックホールになった後に、それを種にしてガス降着すれば超巨大ブラックホール形成の時間が足るのではないかと考え、超巨大星の形成の可否を様々な観点から検討している。星の質量は、星を形成するガス雲の温度が密度の関数として極小になるところでのJeans質量 (=温度の1.5乗に比例し密度の平方根に逆比例) で決まる。現在の宇宙では重元素からなるダストによる冷却が効いてガス雲は低温(10K程度)・高密度状態に至るので、せいぜい太陽質量の数十倍程度の質量の星しか形成されない。一方、宇宙初期では重元素が存在しない種族IIIの星が形成される。種族IIIの星の形成では、ダストが存在しないので、水素原子と水素分子による冷却が主である。その結果、ダストによる冷却よりは温度が高く500K程度、密度は水素原子の数密度が$10^4/\text{cm}^3$程度で太陽質量の1000倍程度の質量の星が生まれるが、種族III星の紫外線が強いため最終的には太陽質量の100倍以下の星となり、必要とされる超巨大ブラックホールの種にはなれない。そこで、先に出来た種族III星の紫外線の効果で、水素分子が破壊されることを考える。すると、等温に近い状態でガス雲の収縮が進むため温度の極小が存在しないので、ガス雲は分裂せずに太陽質量の100万倍程度の質量の超巨大星が形成され超巨大ブラックホールの種となる可能性があることを示した。</p> <p>星の超新星爆発により宇宙線やX線が発生するが、それらによる水素の電離により発生する電子が、$\text{H} + \text{e}^- \rightarrow \text{H}^- + \gamma$, $\text{H} + \text{H}^- \rightarrow \text{H}_2 + \text{e}^-$ という反応のため水素分子を生成する。この反応は紫外線による水素分子の破壊と拮抗し得るので、申請者は他の可能性も検討している。宇宙で最初の銀河の形成の数値シミュレーションでは冷たいガスの流れが出来る事が示されている。このような流れが2つ衝突すると強い衝撃波が発生して、温度と密度が上がり、水素分子は原子や電子との衝突で破壊される。その結果、水素原子による冷却が主体となって、等温に近いガス雲の収縮が進み超巨大星の形成に至る可能性が生まれる。この仮説を確かめるため申請者は等温のガス雲から出発してその後の進化の3次元数値シミュレーションを実行した。その結果、予想通りガス雲は分裂することなく収縮し、ガス降着率は年間に太陽質量の3倍程度までに達して、星の寿命内に太陽質量の10万倍以上の超巨大星が形成されることを示した。ガスの降着下での星の構造は降着率が高いと通常の星とは異なり、水素燃焼段階でも赤色巨星のような構造になり、表面温度は1万K程度で強い紫外線によって降着ガスの降着を妨げるといふ事は起こらない事を示した。結論として、2つの異なるモデルとも必要とされる超巨大ブラックホールの種となるブラックホールが形成される可能性があり、宇宙初期の超巨大ブラックホールの存在と矛盾しないことを示した。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

多くの銀河の中心核に巨大ブラックホールが存在することは以前から知られていたが、高赤方偏移でも太陽質量の10億倍もの超巨大ブラックホールが存在する事が判明したのは近年になってからである。このような高赤方偏移の超巨大ブラックホールの数は少ないが、定説では形成する時間が足りないと言う矛盾を示しているので、その起源の解明は学問的にどうしても必要である。申請者は高赤方偏移での超巨大ブラックホールの特異性は宇宙初期に形成されたはずの種族III星の特異性に起因するとしている。近傍の超巨大ブラックホールの形成は定説で説明可能であるから、特異性の原因を重元素がない種族IIIの星という環境に求めたアイデアは高く評価できる。

種族IIIの星は質量が大きく重元素がない。その結果、半径が小さくて光度も大きくなるので表面温度が高く紫外線強度が強いため、時間的に後に誕生する種族IIIの星の形成に大きな影響を与える。申請者は紫外線の効果だけではなく、拮抗する宇宙線やX線の効果も入れた議論を行い、紫外線の強さが宇宙線とX線の強度で決まるある臨界値を超えると、質量が太陽質量の100万倍程度の超巨大星となり得ることを示したのは、新しい知見である。

上の結果は未知の紫外線、宇宙線、X線の強度に依存するので申請者は別の可能性を次に論じている。それは、銀河形成のシミュレーションで見られる冷たい流れの衝突を利用するもので、今度は水素分子の破壊をするのは衝撃波であるが、この場合も同様に質量が太陽質量の100万倍程度の超巨大星となり得ることを示したのも新しい知見である。

申請者はさらに、この超巨大星が分裂しない事を3次元数値シミュレーションで示している。さらには、超巨大星の脈動不安定星も調べて、超巨大星は質量放出をせずに最終的には必要とされる超巨大ブラックホールの種となるブラックホールになる事を示している。このような細部にわたる検討をしている点は高く評価できる。

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、平成26年1月17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