Sementes de Buracos Negros Supermassivos no Universo Primordial

DA SILVA, Nathan Cordeiro[1]; DE LARA, Lucas Stori[2];

Universidade Estadual de Ponta Grossa – Departamento de Física[1,2]

ncs941@hotmail.com

Palavras-Chave: quase-estrelas; buracos negros; TOV.

Resumo

Neste trabalho exploramos modelos de estrelas exóticas como sementes pesadas de buracos negros supermassivos no Universo primordial, enfatizando quase-estrelas, envelopes gasosos extensos sustentados pela pressão de radiação de buracos negros estelares em seus núcleos.

I. Introdução

Observações recentes do telescópio espacial James Webb (JWST) revelaram a existência de buracos negros supermassivos com massas da ordem de 10^9 massas solares ($M_\odot$) quando o Universo tinha menos de mil milhões de anos. Como esses objetos podem ter crescido tão rapidamente é um dos maiores desafios da astrofísica moderna. A hipótese mais promissora envolve a formação de "sementes" massivas, buracos negros com massas entre 10^2 e 10^5 $M_\odot$ que depois crescem por acreção de gás. As quase-estrelas são um dos modelos teóricos mais estudados para produzir essas sementes.

Uma quase-estrela é um objeto híbrido: um buraco negro central envolto por um enorme envelope hidrostático, dominado pela pressão de radiação e fortemente convectivo. A energia libertada pela acreção de gás no buraco negro é transportada pelo envelope por convecção, permitindo taxas de acreção superiores ao limite de Eddington. Dessa forma, o buraco negro pode crescer rapidamente até se tornar uma semente massiva.

Observações recentes do telescópio espacial James Webb (JWST) têm revelado uma população de fontes compactas e extremamente vermelhas em altos *redshifts*, conhecidas como *Little Red Dots* (LRDs), ou Pequenos Pontos Vermelhos. Estudos espectroscópicos, como o de Kokorev et al. (2026), mostram que estes objetos apresentam fortes quebras de Balmer e características de absorção, sugerindo que hospedam núcleos ativos de galáxias (AGN) envoltos por densos invólucros de gás, potencialmente alimentados por acreção super-Eddington.

Um caso recente que merece atenção é o de GLIMPSE-17775, um LRD luminoso ($L \sim 10^{45}$ erg s^{-1}) a $z = 3{,}501$, observado com espectroscopia profunda do JWST. Os dados revelam mais de 40 linhas de emissão e absorção, incluindo uma rica floresta de linhas de Fe II de baixa ionização e numerosas transições de recombinação do hidrogênio. A análise indica que estas características são consistentes com um cenário de acreção super-Eddington, com uma densidade de gás $n \sim 10^8$ cm^{-3} e uma massa de buraco negro da ordem de $10^{6,7}$ M$_\odot$.

Estas observações fornecem fortes indícios de que, pelo menos, alguns LRDs são alimentados por buracos negros em crescimento acelerado no Universo primordial. Embora ainda não seja possível afirmar diretamente que estes objetos sejam quase-estrelas, as semelhanças são notáveis: ambos os cenários envolvem buracos negros envoltos por envelopes gasosos densos, com taxas de acreção que podem exceder o limite de Eddington. As quase-estrelas preveem precisamente esse tipo de configuração para as sementes de buracos negros supermassivos, o que torna os LRDs candidatos naturais a serem observacionalmente associados a este modelo.

II. Fundamentação Teórica/Materiais e Métodos

O envelope da quase-estrela comporta-se como um politropo de índice $\gamma = 4/3$, adequado para um gás dominado pela pressão de radiação. A equação de equilíbrio hidrostático, escrita em forma adimensional, é:

$$\tilde{K}\frac{d}{d\xi}\left[\left(\frac{1}{\xi}\frac{dm}{d\xi}\right)^{1/3}\right] = -\frac{m}{\xi^2}, \tag{1}$$

onde $\xi = r/r_B$ é o raio normalizado pelo raio de Bondi r_B, $m(\xi) = M(\xi)/M_B$ é a massa adimensional contida dentro de ξ, M_B é a massa total dentro do raio de Bondi, ou seja, buraco negro mais gás, e $\tilde{K}$ é um parâmetro adimensional associado à entropia do envelope.

O raio de Bondi define a região de influência gravitacional do buraco negro:

$$r_B = N\frac{2GM_\bullet}{c_s^2}, \tag{2}$$

onde N é um parâmetro de transição de ordem unitária, que reflete o nosso desconhecimento sobre os detalhes da passagem do envelope hidrostático para a zona de acreção em queda livre, e c_s é a velocidade do som no meio. A condição de contorno em $\xi = 1$, na fronteira do raio de Bondi, é:

$$\left.\frac{dm}{d\xi}\right|_{\xi=1} = \left(\frac{6N}{\tilde{K}}\right)^3. \tag{3}$$

Dentro do raio de Bondi, o gás está em queda livre e a densidade segue $\rho \propto r^{-3/2}$. Integrando esse perfil, obtemos a relação entre a massa do buraco negro e a massa total contida em r_B:

$$\frac{M_\bullet}{M_B} = 1 - \frac{2}{3}\left(\frac{6N}{\tilde{K}}\right)^3. \tag{4}$$

A razão final entre a massa do buraco negro e a massa total da quase-estrela, $M_\bullet/M_\star$, é o produto entre essa expressão e o inverso da massa adimensional no raio superficial, obtido da solução do envelope:

$$\frac{M_\bullet}{M_\star} = \left[1 - \frac{2}{3}\left(\frac{6N}{\tilde{K}}\right)^3\right] \times \frac{1}{m(\xi_{\rm sup})}. \tag{5}$$

Estudos anteriores (BALL et al., 2011; MCMAHON et al., 2012) sugeriram a existência de um limite máximo para $M_\bullet/M_\star$, da ordem de 1,7%, assumindo $N = 1$ e usando uma condição de contorno específica. Esse limite foi interpretado como análogo ao limite de Schönberg-Chandrasekhar para núcleos inertes em estrelas evoluídas. Se verdadeiro, impediria que as quase-estrelas produzissem sementes suficientemente massivas.

No entanto, um estudo realizado por Coughlin e Begelman (2024) mostrou que esse valor é extremamente sensível a um parâmetro arbitrário N, associado à incerteza sobre a transição da região radiativa para convectiva. A presente pesquisa implementou numericamente a solução da equação de equilíbrio para vários valores de N, reproduzindo e estendendo os resultados.

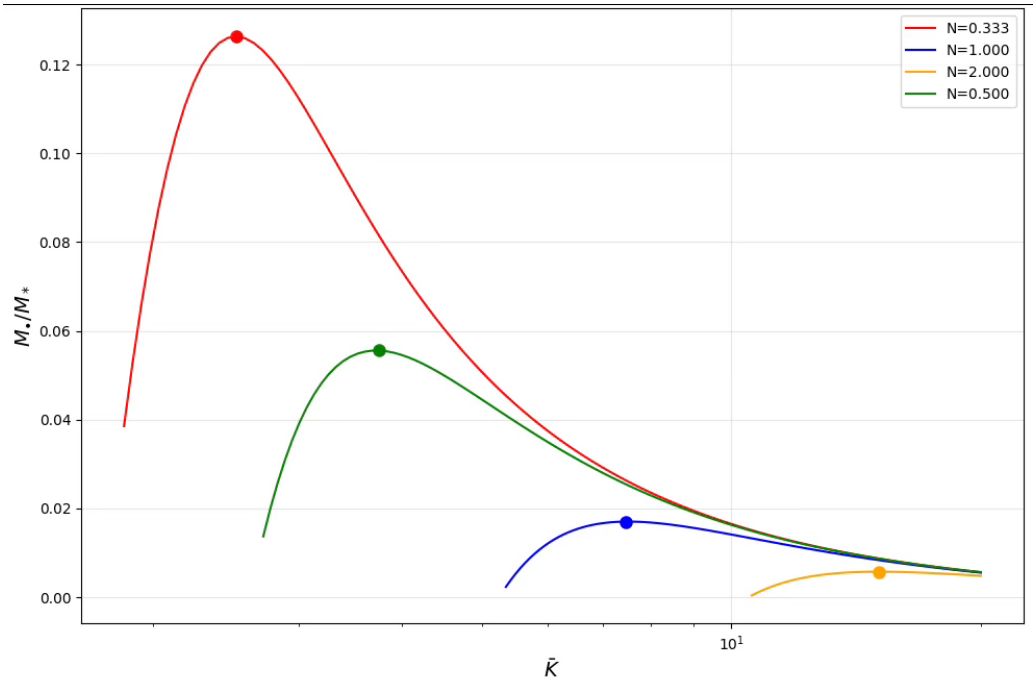
Foi implementado um código em Python que resolve a equação de equilíbrio usando um integrador de Runge-Kutta. Para cada par $(N, \tilde{K})$, integramos desde $\xi = 1$ até encontrar a superfície, onde $dm/d\xi \approx 0$. A partir daí, calculamos $M_\bullet/M_\star$.

III. Resultados

A Figura 1 apresenta $M_\bullet/M_\star$ em função de $\tilde{K}$ para diferentes valores de N.

Para um dado N, a curva apresenta um máximo, que corresponde à maior fração de massa que o buraco negro pode atingir. No regime de $\tilde{K}$ alto, o envelope é extenso e de baixa densidade, e a fração cresce à medida que $\tilde{K}$ diminui. No regime de $\tilde{K}$ baixo, o raio de Bondi ocupa uma fração significativa do raio total, reduzindo a fração. O máximo

Fig. 1. Razão da massa do buraco negro pela massa total da quase-estrela em função da entropia adimensional aplicada na equação de Lane-Emden.



Fonte: O autor.

ocorre no equilíbrio entre esses dois efeitos.

Tabela I. Parâmetro de transição do envelope pela razão da massa do buraco negro pela massa total da quase-estrela.

N	$M_\bullet/M_\star$
2	0,007
1	0,017
1/2	0,058
1/3	0,13

Fonte: O autor.

IV. Conclusões

O modelo de quase-estrelas oferece um cenário teoricamente consistente para a formação de sementes de buracos negros supermassivos no Universo primordial. O suposto limite de 1,7% para a razão $M_\bullet/M_\star$ não é fundamental, sendo apenas um artefato da escolha do parâmetro N, com a fração máxima de massa do buraco negro podendo variar entre 0,7% e 13%, dependendo do valor de N.

Agradecimentos

Agradecimentos à Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Referências

BALL, W. H. et al. The structure and evolution of quasi-stars. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 414, p. 2751–2762, 2011.

COUGHLIN, E. R.; BEGELMAN, M. C. Quasi-stars as a means of rapid black hole growth in the early universe. **The Astrophysical Journal**, v. 970, p. 158, 2024.

MCMAHON, J. M. et al. The properties of hydrogen and helium under extreme conditions. **Reviews of Modern Physics**, v. 84, n. 4, 2012.