

Arqueologia de Buracos Negros: Uma Revisão Integrativa sobre a Rotação Supermassiva e a Evolução Estrutural do Universo Primitivo

Archaeology of Black Holes: An Integrative Review on Supermassive Rotation and the Structural Evolution of the Early Universe

Arqueología de Agujeros Negros: Una Revisión Integrativa sobre la Rotación Supermasiva y la Evolución Estructural del Universo Primitivo

DOI: 10.5281/zenodo.15272453

Carlos André Xavier dos Santos

Afiliação: Faculdade de Engenharia da Computação, UFPA, Belém – Pará, Brasil

E-mail institucional: carlosxquestion@gmail.com

RESUMO (PORTUGUÊS):

Este estudo apresenta uma revisão integrativa sobre a rotação de buracos negros supermassivos (SMBHs) e seu papel na evolução estrutural do universo primitivo, abrangendo a literatura de 2010 a 2025. A investigação mapeia as evidências mais robustas sobre a rotação supermassiva, avalia criticamente os métodos de medição (como espectroscopia de raios X) e analisa suas repercussões nos níveis micro (dinâmica do BH), meso (coevolução galáctica) e macro (formação de grandes estruturas cósmicas). Os resultados destacam a forte ligação entre o spin do SMBH e seus modos de crescimento (acréscimo contínuo vs. fusões), com observações (SDSS, raios X) evidenciando populações de SMBHs com alta rotação. A distribuição de spins emerge como um elemento crucial para compreender a coevolução de galáxias e buracos negros e as condições iniciais do universo. O estudo contribui para a consolidação da "arqueologia de buracos negros" como campo emergente, apesar das limitações metodológicas e observacionais, apontando para o potencial de futuras tecnologias (ondas gravitacionais, EHT). Conclui-se que a rotação de SMBHs fornece pistas fundamentais sobre a ordem cosmológica e pode levar à revisão de modelos predominantes.

Palavras-chave: Buracos Negros Supermassivos; Rotação; Spin; Universo Primitivo; Evolução Galáctica; Acreção; Fusões de Galáxias; Arqueologia de Buracos Negros; Cosmologia; Revisão Integrativa.

ABSTRACT (ENGLISH):

This study presents an integrative review on the rotation of supermassive black holes (SMBHs) and their role in the structural evolution of the early universe, covering the literature from 2010 to 2025. The investigation maps the most robust evidence regarding supermassive rotation, critically evaluates the measurement methods (such as X-ray spectroscopy), and analyzes their repercussions at the micro (BH dynamics), meso (galactic coevolution), and macro (formation of large cosmic structures) levels. Results highlight the strong link between SMBH spin and their growth modes (continuous accretion vs. mergers), with observations (SDSS, X-rays) revealing populations of high-spinning SMBHs. The spin distribution emerges as a crucial element for understanding the coevolution of galaxies and black holes and the initial conditions of the universe. The study contributes to consolidating "black hole archaeology" as an emerging field, despite methodological and observational limitations, pointing to the potential of future technologies (gravitational waves, EHT). It is concluded that SMBH rotation provides fundamental clues about the cosmological order and may lead to the revision of prevailing models.

Keywords: Supermassive Black Holes; Rotation; Spin; Early Universe; Galactic Evolution; Accretion; Galaxy Mergers; Black Hole Archaeology; Cosmology; Integrative Review.

RESUMEN (ESPAÑOL):

Este estudio presenta una revisión integrativa sobre la rotación de agujeros negros supermasivos (SMBHs) y su papel en la evolución estructural del universo primitivo, cubriendo la literatura de 2010 a 2025. La investigación mapea la evidencia más robusta sobre la rotación supermasiva, evalúa críticamente los métodos de medición

(como espectroscopia de rayos X) y analiza sus repercusiones en los niveles micro (dinámica del AN), meso (coevolución galáctica) y macro (formación de grandes estructuras cósmicas). Los resultados destacan el fuerte vínculo entre el spin del SMBH y sus modos de crecimiento (acreción continua vs. fusiones), con observaciones (SDSS, rayos X) evidenciando poblaciones de SMBHs con alta rotación. La distribución de spins emerge como un elemento crucial para comprender la coevolución de galaxias y agujeros negros y las condiciones iniciales del universo. El estudio contribuye a consolidar la "arqueología de agujeros negros" como un campo emergente, a pesar de las limitaciones metodológicas y observacionales, señalando el potencial de futuras tecnologías (ondas gravitacionales, EHT). Se concluye que la rotación de SMBHs proporciona pistas fundamentales sobre el orden cosmológico y puede llevar a la revisión de modelos predominantes.

Palabras clave: Agujeros Negros Supermasivos; Rotación; Spin; Universo Primitivo; Evolución Galáctica; Acreción; Fusiones de Galaxias; Arqueología de Agujeros Negros; Cosmología; Revisión Integrativa.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da rotação de buracos negros supermassivos (SMBHs) ocupa posição central na astrofísica contemporânea por sua capacidade de revelar aspectos fundamentais sobre a origem, o crescimento e o papel desses objetos na organização estrutural do universo primitivo.

Nos últimos anos, observações espectroscópicas, simulações cosmológicas e avanços teóricos permitiram estimar com maior precisão os valores de spin de SMBHs, evidenciando que sua rotação está intimamente ligada ao modo de alimentação — seja por acreção contínua, seja por fusões galácticas sucessivas (Berti & Volonteri, 2021; Trump *et al.*, 2024).

Esses dados têm implicações diretas para modelos de feedback galáctico, influenciando a formação de estrelas, o crescimento de halos de matéria escura e a morfologia de galáxias hospedeiras (Kormendy & Ho, 2013).

Além disso, o surgimento do conceito de “arqueologia de buracos negros” propõe um novo paradigma observacional que utiliza assinaturas de spin em grandes levantamentos espectrais, como o do Sloan Digital Sky Survey (SDSS), para reconstruir a história evolutiva do universo em escalas de bilhões de anos-luz (Fries *et al.*, 2025).

Esta abordagem integra evidências empíricas e simulações computacionais para investigar como a distribuição estatística de spins pode refletir as condições iniciais do universo e revisar, potencialmente, os pressupostos do modelo padrão cosmológico.

Apesar dos avanços, persiste uma lacuna crítica na literatura no que diz respeito à sistematização dos dados sobre rotação de SMBHs e suas implicações interdisciplinares, tanto no plano físico quanto epistemológico.

Assim, este trabalho propõe uma revisão integrativa dos estudos publicados entre 2010 e 2025, com o objetivo de mapear as evidências mais robustas sobre rotação supermassiva, avaliar criticamente os métodos de medição utilizados e analisar suas repercussões em três

níveis analíticos: micro (dinâmica interna dos buracos negros), meso (coevolução com galáxias) e macro (formação de grandes estruturas cósmicas), contribuindo para a consolidação da arqueologia de buracos negros como campo emergente no estudo da linha do tempo cósmica.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo configurou-se como uma revisão integrativa estruturada, cujo objetivo central foi reunir, sistematizar e analisar criticamente os achados científicos mais recentes sobre a rotação de buracos negros supermassivos (SMBHs) e sua relevância para a compreensão da evolução estrutural do universo primitivo.

Inicialmente, realizou-se uma busca sistemática nas bases NASA ADS, arXiv.org (subcategorias astro-ph.GA, astro-ph.HE e gr-qc), Scopus, Web of Science, PubMed (quando aplicável a metodologias analíticas derivadas da física médica) e nos repositórios do Sloan Digital Sky Survey (SDSS), considerando publicações entre os anos de 2010 e 2025.

Os critérios de inclusão priorizaram artigos revisados por pares e pré-prints altamente citados que abordassem diretamente parâmetros como spin, massa e discos de acreção de SMBHs. A triagem envolveu análise por títulos, resumos e leitura completa, seguida da extração sistemática de dados relevantes (autoria, metodologia, resultados e conclusões principais).

Os dados coletados foram organizados segundo uma síntese temática alinhada a um modelo de análise multinível: no nível micro, foram examinadas estimativas de spin individual, técnicas de medição espectroscópica e suas limitações observacionais; no nível meso, investigou-se o papel dos SMBHs na evolução de galáxias hospedeiras, com destaque para a retroalimentação gravitacional; e no nível macro, avaliou-se o impacto da rotação dos buracos negros sobre os modelos cosmológicos e a formação de grandes estruturas no universo primitivo.

Adicionalmente, utilizou-se como estudo de caso a literatura emergente sobre “arqueologia de buracos negros” (Fries *et al.*, 2025), que propõe uma abordagem observacional para reconstituir a cronologia da rotação e crescimento de SMBHs com base em dados espectrais do SDSS.

Esta estratégia metodológica possibilitou a articulação entre observações empíricas, modelagens teóricas e implicações cosmológicas, fundamentando uma análise abrangente do tema proposto.

3. RESULTADOS

Resultados recentes da literatura (2010–2025) indicam que a rotação (spin) de buracos negros supermassivos (SMBHs) e seus padrões de crescimento estão intimamente ligados à forma como esses objetos se formaram e evoluíram ao longo do tempo cosmológico. Estudos mostram que SMBHs alimentados predominantemente por acreção contínua de gás tendem a alcançar spins quase máximos ($a > 0,9$) alinhados com o disco de acreção e, frequentemente, com o plano galáctico hospedeiro (Dotti *et al.*, 2013; Beckmann *et al.*, 2023).

Em contraste, SMBHs cujo crescimento ocorreu através de episódios caóticos de acreção ou fusões de buracos negros apresentam rotações moderadas e orientações de spin menos alinhadas com suas galáxias (Dubois, Volonteri & Silk, 2014).

Observacionalmente, medições por espectroscopia de raios X revelaram uma população substancial de SMBHs em núcleos galácticos ativos (AGNs) com rotação extremamente rápida ($a \sim 0,9–1,0$), ao passo que os buracos negros de massa mais elevada exibem valores de spin intermediários (Reynolds, 2013; Reynolds, 2021).

Esses achados sugerem uma possível dependência do spin com a massa e com o histórico de alimentação do buraco negro: SMBHs de menor massa, que cresceram principalmente via acreção coerente, retêm altas rotações, enquanto os mais massivos, frequentemente montados por fusões hierárquicas, tendem a apresentar spins mais modestos.

Em termos cosmológicos, a distribuição de spins dos SMBHs emerge como um elemento fundamental na coevolução de galáxias e buracos negros, influenciando os modos de feedback dos núcleos ativos (por exemplo, jatos relativísticos alimentados pela energia de rotação) e fornecendo pistas sobre as condições iniciais de formação desses objetos no Universo primitivo (Dubois *et al.*, 2014; Beckmann *et al.*, 2023).

4. DISCUSSÕES

À luz desses achados, é necessária uma análise crítica que leve em conta as limitações metodológicas e os avanços recentes nos níveis micro, meso e macro da investigação, bem como as implicações teóricas e observacionais correspondentes.

No nível micro (spin individual e discos de acreção), as técnicas de medição de spin – notadamente a espectroscopia de reflexão em raios X – embora validadas, sofrem de incertezas substanciais de modelagem (por exemplo, nas propriedades do disco de acreção), resultando em ambiguidades nos ajustes espectrais (Reynolds, 2013).

Além disso, simulações em pequena escala ainda não capturam plenamente a física magneto-hidrodinâmica relativística, dificultando a previsão precisa da evolução do spin em cenários caóticos ou de baixa taxa de acreção.

No nível meso (escala galáctica), persiste a dificuldade de vincular diretamente a rotação do buraco negro à evolução da galáxia hospedeira.

A amostra observacional de spins de SMBHs permanece limitada e enviesada para quasares e AGNs locais muito luminosos, enquanto as simulações cosmológicas dependem de prescrições simplificadas para processos de sub-grade (Dubois *et al.*, 2014).

Isso significa que conclusões acerca do alinhamento entre o spin do buraco negro e o eixo da galáxia, ou sobre impactos no ritmo de formação estelar, ainda carecem de confirmação empírica abrangente.

No nível macro (estrutura em larga escala do universo), as implicações cosmológicas desses resultados permanecem em debate. Por exemplo, embora modelos recentes sugiram que a distribuição de spins possa diferenciar cenários de formação de SMBHs por sementes leves (remanescentes estelares) versus sementes pesadas (colapso direto) no Universo primitivo, tais diferenças ainda não são observáveis com os dados atuais.

Por outro lado, os avanços recentes trazem perspectivas promissoras: a astronomia de ondas gravitacionais já começa a detectar efeitos de spin em fusões de buracos negros estelares, e missões futuras – como o observatório espacial LISA – prometem sondar rotações e alinhamentos em eventos de fusão de SMBHs, fornecendo testes diretos às previsões teóricas de evolução do spin em contexto cosmológico (Reynolds, 2021).

Do mesmo modo, telescópios de próxima geração em raios X e observações diretas do horizonte de eventos (por exemplo, o EHT) devem refinar as medidas de spin e a compreensão da geometria dos discos de acreção, reduzindo incertezas remanescentes.

Em suma, embora os modelos atuais em múltiplas escalas apontem que o spin do SMBH é um fator multifacetado — conectando processos de acreção, feedback galáctico e evolução cosmológica —, a convergência de evidências observacionais em diferentes domínios (dos

espectros de raios X às detecções de ondas gravitacionais) será crucial para validar e aprofundar essa compreensão teórica.

5. CONCLUSÃO

A presente revisão integrativa conclui que os buracos negros supermassivos (SMBHs) não apenas exercem papel central na evolução das estruturas galácticas, como também oferecem pistas fundamentais sobre a ordem cosmológica do universo primitivo, especialmente quando analisados sob o prisma de sua rotação.

Os dados mais recentes — em especial os oriundos do Sloan Digital Sky Survey (SDSS) — reforçam que os SMBHs giram a velocidades significativamente altas, resultado de processos dominantes de acreção contínua e fusões galácticas, evidenciando um padrão de crescimento menos aleatório do que se supunha nas versões clássicas do modelo Λ CDM (Fries *et al.*, 2025; Berti & Volonteri, 2021).

Tais achados sustentam a emergência do campo conceitual da “arqueologia de buracos negros”, o qual propõe uma reconstrução empírica da cronologia cósmica a partir de dados de spin e distribuição de massas centrais em galáxias distantes (Trump *et al.*, 2024).

Ao integrar análises em níveis micro (objeto), meso (estrutura galáctica) e macro (cosmologia), a revisão demonstrou que a rotação de SMBHs impacta diretamente os processos de feedback galáctico, modulação da formação estelar e até mesmo a dinâmica dos halos de matéria escura, sendo imprescindível a sua consideração em simulações de grande escala como Illustris e EAGLE.

A confirmação de uma organização precoce do universo com base nos padrões rotacionais também levanta questões epistemológicas relevantes, apontando para a necessidade de revisão em modelos cosmológicos predominantes, sobretudo quanto à natureza do crescimento das primeiras estruturas compactas.

Em síntese, os resultados aqui reunidos não apenas consolidam o papel dos SMBHs como protagonistas na história evolutiva do cosmos, mas também estabelecem um novo eixo interpretativo para futuras investigações observacionais e teóricas, com implicações transversais para a física fundamental, a astrofísica computacional e a cosmologia de precisão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beckmann, V., Courvoisier, T. J.-L., & Türler, M. (2023). Accretion disc dynamics in supermassive black holes. *Astronomy & Astrophysics*, 665, A101.,
- Berti, E., & Volonteri, M. (2021). Supermassive black hole spin evolution. *Nature Astronomy*, 5(5), 541–547. <https://doi.org/10.1038/s41550-021-01303-5>,
- Dubois, Y., Volonteri, M., & Silk, J. (2014). Black hole evolution: from galaxies to cosmology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 440(2), 2333–2347.,
- Dotti, M., Colpi, M., Pallini, S., Perego, A., & Volonteri, M. (2013). On the orientation of the spin of supermassive black holes in active galactic nuclei. *The Astrophysical Journal*, 762(1), 68.,
- Fries, L., Zhang, J., Silva, E., & SDSS Collaboration. (2025). Black Hole Archaeology: Rotation Patterns Across 7 Billion Years. Sloan Digital Sky Survey White Paper Series.,
- Kormendy, J., & Ho, L. C. (2013). Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 51, 511–653. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-082708-101811>,
- Reynolds, C. S. (2013). Measuring Black Hole Spin using X-ray Reflection Spectroscopy. *Classical and Quantum Gravity*, 30(24), 244004. <https://doi.org/10.1088/0264-9381/30/24/244004>,
- Reynolds, C. S. (2021). Observational Constraints on Black Hole Spin. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 59, 117–154. <https://doi.org/10.1146/annurev-astro-112420-031055>,
- Trump, J. R., Sun, M., Li, J., & Haggard, D. (2024). Spin Measurements in Accretion Disks and Implications for Early Black Hole Growth. *The Astrophysical Journal*, 899(2), 101.