

Trabalho



Título em Português: Buracos negros: Leis mecânicas e suas analogias termodinâmicas

Título em Inglês: black holes: mechanical laws and their thermodynamic analogies

Autor: Pedro Henrique de Moraes Mota

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Daniel Augusto Turolla Vanzela

Área de Pesquisa / SubÁrea: Física Geral

Agência Financiadora: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Buracos negros: Leis mecânicas e suas analogias termodinâmicas

Pedro Henrique de Moraes Mota

Prof. Dr. Daniel Augusto Turolla Vanzella

Instituto de Física de São Carlos (IFSC), Universidade de São Paulo (USP)

pedromota@usp.br

Objetivos

Buracos negros estão entre os objetos mais exóticos previstos por uma teoria clássica, seu estudo está além de testes reprodutíveis em laboratório e sua natureza se dá em situações extremas, como é o caso de singularidades providas de colapsos gravitacionais. [1]

Embora tradicionalmente estudados pela relatividade geral, estes entes astronômicos, em certos regimes, apresentam propriedades fortemente análogas às leis clássicas da termodinâmica - como a conservação de energia e entropia positiva [1,2]. Este projeto foca em entender as características básicas de buracos negros em regimes estacionários e não estacionários, bem como as leis clássicas que regem seu comportamento: As leis da mecânica de buracos negros, que dão origem às analogias termodinâmicas.

Métodos e Procedimentos

Partindo da definição formal de buracos negros [1,2], pode-se compreender em quais situações um colapso gravitacional gera uma singularidade no espaço-tempo e se a mesma pode ou não ser considerada nua — possível de ser vista por observadores externos — o que remete à hipótese do censor cósmico e suas variações, segundo a qual nenhuma informação pode escapar do colapso. Como, por suposição, não se tem acesso ao interior de um buraco negro e de sua singularidade, utilizam-se

variáveis externas ao mesmo, como massa, momento angular, e área, para definir leis e propriedades. Passando a entender as particularidades geradas em regimes estacionários — sem interação com matéria ao redor — encontram-se alguns resultados, tendo como principal o teorema de Hawking [1], que estabelece que a área de um buraco negro nunca decresce com o tempo.

Por fim, o projeto se estende ao estudo das leis mecânicas que regem o regime não estacionário, analisando propriedades físicas e geométricas. Quando se estuda a interação de buracos negros com matéria temos leis que regem a variação de massa tal como a variação de área [1] da entidade, vide o teorema de Hawking. Quando postas em formato matemático, estas explicitam uma clara relação com as já conhecidas leis da termodinâmica clássica conforme tabela (1) [1], que mostra as leis térmicas em contraponto com as leis dos buracos negros. De forma explícita [1,2]

Lei Zero: relaciona a temperatura constante em equilíbrio térmico à constância de κ sobre um horizonte estacionário;

Primeira Lei: associa a variação de energia com a variação de massa e trabalho às variações de área, momento angular e carga;

Segunda e Terceira Leis: descrevem restrições sobre entropia e impossibilidade de atingir temperaturas extremas, refletidas respectivamente

na não diminuição da área e na impossibilidade de $\kappa = 0$ por processos físicos.

Isso tudo reflete um possível indício de um significado mais profundo no mecanismo de funcionamento desses tais objetos exóticos.

Buracos negros e termodinâmica

Leis	Termodinâmica	Buracos negros
zero	Temperatura constante em equilíbrio térmico	κ constante sobre um horizonte estacionário
primeira	$dE = TdS + W$	$dM = \frac{1}{8\pi} \kappa dA + \Omega dj$
segunda	$\delta S \geq 0$ em qualquer processo	$\delta A \geq 0$ em qualquer processo
terceira	Impossível alcançar $T = 0$ por processos físicos	Impossível alcançar $\kappa = 0$ por processos físicos

Tabela 1 – Analogias termodinâmicas

Resultados

Espera-se obter um entendimento das leis mecânicas de buracos negros, quando submetidos ao regime não estacionário, e associar o conjunto de leis encontrado com o campo da termodinâmica, que parece fornecer relações explicitamente parecidas em sua natureza.

Conclusões

Embora ainda não se tenha um entendimento completo de sua natureza, os buracos negros apresentam propriedades previstas pela relatividade geral e por teorias clássicas da gravitação. A análise proposta neste projeto busca relacionar propriedades geométricas e físicas desses objetos em regimes não estacionários com as leis da termodinâmica, organizando de forma sistemática os resultados já estabelecidos na literatura. Espera-se que a

incorporação de conceitos quânticos contribua para uma compreensão mais profunda do tema e ajude a orientar estudos futuros.

Agradecimentos

Agradecimento ao professor Dr. Daniel Augusto Turolla Vanzella pela oportunidade. A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) - 2025/07586-8, pelo apoio financeiro.

Referências

1. R. M. Wald, General Relativity (University of Chicago Press, Chicago, 1984).
2. P. V. Frolov e I. D. Novikov, Black hole physics (Springer Dordrecht, Berlin, 1998).
3. J. M. Bardeen, B. Carter e S. W. Hawking, The four laws of black hole mechanics, Commun. Math. Phys. 31, 161 (1973).

Black Holes: Mechanical Laws and Their Thermodynamic Analogies

Pedro Henrique de Moraes Mota

Prof. Dr. Daniel Augusto Turolla Vanzella

São Carlos Institute of Physics (IFSC), University of São Paulo (USP)
pedromota@usp.br

Objectives

Black holes are among the most exotic objects predicted by classical theory. Their study goes beyond reproducible laboratory tests, and their nature occurs in extreme situations, such as singularities arising from gravitational collapses. [1]

Although traditionally studied by general relativity, these astronomical entities, in certain regimes, exhibit properties strongly analogous to the classical laws of thermodynamics—such as conservation of energy and positive entropy [1,2]. This project focuses on understanding the basic characteristics of black holes in stationary and non-stationary regimes, as well as the classical laws that govern their behavior: the laws of black hole mechanics, which give rise to thermodynamic analogies.

Materials and Methods

Starting from the formal definition of black holes [1,2], one can understand in which situations a gravitational collapse generates a singularity in spacetime and whether or not it can be considered naked—possible to be seen by external observers—which leads to the hypothesis of the cosmic censor and its variations, according to which no information can escape the collapse. Since, by assumption, one does not have access to the interior of a black hole and its singularity, external variables, such as mass, angular momentum, and area, are used to define laws and properties. By understanding the particularities generated in

stationary regimes —without interaction with surrounding matter—some results are found, the main one being Hawking's theorem [1], which establishes that the area of a black hole never decreases with time.

Finally, the project extends to the study of the mechanical laws that govern the non-stationary regime, analyzing physical and geometric properties. When studying the interaction of black holes with matter, we have laws that govern the variation in mass as well as the variation in the entity's area [1], see Hawking's theorem.

When presented in mathematical format, these laws clearly relate to the already known laws of classical thermodynamics, as shown in Table (1) [1], which shows the thermal laws in contrast to the laws of black holes. Explicitly [1,2]

Zeroth Law: relates constant temperature in thermal equilibrium to the constancy of k_B over a stationary horizon;

First Law: associates the variation in energy with the variation in mass and work with variations in area, angular momentum, and charge;

Second and Third Laws: describe restrictions on entropy and the impossibility of reaching extreme temperatures, reflected respectively in the non-reduction of area and the impossibility of $\kappa = 0$ by physical processes. This all reflects

a possible clue to a deeper meaning in the mechanism of operation of these exotic objects.

Black holes and thermodynamics

laws	Thermodynamics	Black holes
zero	Constant temperature in thermal equilibrium	κ constant over a stationary horizon
first	$dE = TdS + W$	$dM = \frac{1}{8\pi} \kappa dA + \Omega dj$
second	$\delta S \geq 0$ in any process	$\delta A \geq 0$ in any process
third	Impossible to reach $T=0$ by physical processes	Impossible to reach $\kappa=0$ by physical processes

Table 1 – Thermodynamic analogies

Results

The aim is to gain an understanding of the mechanical laws of black holes when subjected to a non-stationary regime, and to associate the set of laws found with the field of thermodynamics, which appears to provide explicitly similar relationships in nature.

Conclusions

Although a complete understanding of their nature is not yet available, black holes exhibit properties predicted by general relativity and classical theories of gravitation. The analysis proposed in this project seeks to relate the geometric and physical properties of these objects in non-stationary regimes to the laws of thermodynamics, systematically organizing the results already established in the literature. It is hoped that the incorporation of quantum concepts will contribute to a deeper understanding of the subject and help guide future studies.

Acknowledgements

We would like to thank Professor Dr. Daniel Augusto Turolla Vanzella for the opportunity. We would like to thank the São Paulo Research Foundation (FAPESP) - 2025/07586-8, for the financial support.

References

1. R. M. Wald, General Relativity (University of Chicago Press, Chicago, 1984).
2. P. V. Frolov e I. D. Novikov, Black hole physics (Springer Dordrecht, Berlin, 1998).
3. J. M. Bardeen, B. Carter e S. W. Hawking, The four laws of black hole mechanics, Commun. Math. Phys. 31, 161 (1973).