

Análise das Séries Temporais de Raios-X Oriundas de Sistemas Astrofísicos Utilizando uma Proposta de Modelagem Matemática Lastreada na Equação Não-linear de Fokker-Planck

Melina Silva de Lima* (PG), Marcelo A. Moret (PQ). ¹Faculdade SENAI CIMATEC

melinas_mel@hotmail.com, mamoret@gmail.com.

XRBS, Equação de Fokker-Planck, Mecânica Estatística de Tsallis, q-Gaussiana.

Introdução

As diretrizes da pesquisa perpassam por hipóteses da existência de propriedades fractais em sistemas astrofísicos, em especial no que se refere à emissão, em difusão, de radiação eletromagnética na frequência dos raios-X por pares binários (geralmente uma estrela massiva - buraco negro ou estrela de nêutrons e uma estrela na sua fase não terminal (Osorio, 2010)).

Desta forma o **objetivo geral** da pesquisa é a análise das séries espectrais de raios-X de sistemas binários astrofísicos como lastro para legitimar o modelo de difusão (ou difusão anômala) por meio de uma equação de Fokker-Planck; e, como **objetivos específicos** tem-se a análise estatística das séries numéricas dos registros consolidados pelo satélite "Rossi X-ray timing Explorer"; a modelagem da difusão de raios-X nas regiões vizinhas a estes objetos, bem como a proposta de uma lei de potência para o comportamento nesta região.

A proposta de desenvolvimento da pesquisa e do produto da mesma inicia-se com uma revisão de literatura sobre a fenomenologia estudada, ou seja, os sistemas astrofísicos binários, seus conceitos fundamentais, definições e funções de comportamento conhecidas. Posteriormente deve-se proceder um estudo da base matemática da sua regência para que, em confronto com os registros das séries com os dados dos raios-X emitidos pelos mesmos sistemas possamos focar em um sistema específico, no caso o coletado pelo satélite "Rossi X-ray timing Explorer", e, a partir daí a sugestão de um modelo matemático que trate da difusão destas ondas eletromagnéticas nos arredores do respectivo par binário com a proposta de modelagem com a equação de Fokker-Planck.

Resultados e Discussão

Na Figura 1, mostramos um exemplo de uma curva de uma XRBS, cujos resultados modelados mostram uma q-gaussiana e uma gaussiana como curvas de melhor ajuste aos pontos. É fácil perceber o melhor ajuste dado à q-gaussiana, o que demonstra seu caráter tsalliano, ao passo que nos

permite modelar os dados determinando valores específicos do parâmetro q , determinado nesta pesquisa.

Foram analisadas 142 XRBS para este estudo.

Do ponto de vista inerentemente matemático, a mecânica estatística de Tsallis substitui o comportamento exponencial por uma lei de potência na função entrópica e na distribuição de probabilidades.

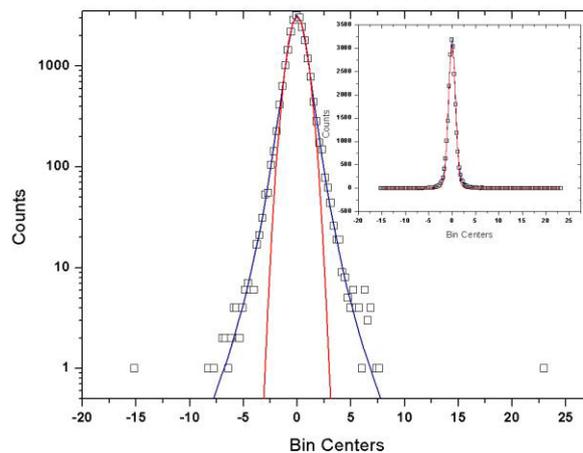


Figura 1. Curva de emissão de raios-X ajustada: resultados modelados para o XRBS GX1+4 (em azul) e uma distribuição Gaussiana (vermelho).

A Figura 1 mostra duas curvas, a q-gaussiana (azul) e a gaussiana (vermelho) ajustadas aos valores de emissão de raios-X de uma XRBS, com parâmetros $q=1,39\pm 0,01$, $k=1,20\pm 0,01$ e $A=3200,32\pm 6,06$. Pela análise de variância (ANOVA)¹, $F_{\text{value}}=140297$ com $\text{Prob}>F=0$. Em todas as nossas análises, a q-gaussiana mostrou-se melhor ajustável aos pontos. Por outro lado, a gaussiana não se ajustou tão bem,

¹ A Análise de Variância (ANOVA) é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos. Existem muitas variações da ANOVA devido aos diferentes tipos de experimentos que podem ser realizados.

como podemos ver a partir da figura e pela análise ANOVA.

Conclusões

A entropia termodinâmica de *Boltzman* e *Gibbs* é considerada apropriada apenas sob estritas condições, tais como homogeneidade, interações de curto alcance entre os elementos do sistema e em um contexto ergódico, que costumam ser caracterizados matematicamente e computacionalmente por meio de equações lineares e distribuições estacionárias gaussianas (Ribeiro, 2012).

Nos sistemas cujos elementos são fortemente correlacionados, a entropia tsalliana (sempre não-aditiva), torna-se não-extensiva para um valor apropriado do parâmetro q , denominado de índice entrópico (Moret et al, 2010). Sistemas que apresentam estados estacionários, ou quase-estacionários, que não são consistentemente descritos pela estatística de *Boltzmann*, são não-aditivos (Tsallis, 1988). Eles são normalmente melhor caracterizados por correlações de longo alcance, espaciais e temporais; processos não-markovianos; equações não-lineares e distribuições não-gaussianas, como é o caso do objeto de estudo de nossa pesquisa, as XRBS. Neste caso estes sistemas são não-extensivos, pois as grandezas termodinâmicas se comportam dessa maneira, como pudemos verificar.

Moret, Marcelo A. et al (2010). *X-ray Binary Systems and Nonextensivity*. Physica A 389 (2010) 854_858.

Osorio, Yesson Fabian M. (2009), "Determinação do Período Orbital de Sistemas Binários Eclipsantes",
Dissertação de Mestrado, IF/UFRN, Natal.

Ribeiro, Maurício de Souza. *Estudo de Equações de Fokker-Planck Não-lineares e Aplicações*. Dissertação de Mestrado, Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, RJ, 2012.

Skipper, Chris. (2015) "Fast Spectral Variability in the X-ray Emission of Accreting Black Holes", Doutoral Thesis, University Southampton, UK.

Tsallis, Constantino. (1988) "Possible generalization of Boltzmann-Gibbs entropy", J. Stat. Phys, 52,479.