

MATÉRIA ESCURA E SEU IMPACTO NA CURVA DE ROTAÇÃO DAS GALÁXIAS ESPIRAIS

WILLIAM LIMA CAIANO¹; VICTOR PAULO BARROS GONCALVES²

¹Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Física – gowthercaiano27@gmail.com

²Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Física – victorpbg@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

O estudo da matéria escura, ou matéria não visível, teve início por conta do trabalho de Fritz Zwicky (1933), que, na década de 1930, observou que as galáxias no aglomerado giravam em grandes velocidades, o que implicava que apenas a massa visível presente ali não poderia gerar uma força gravitacional suficiente para manter sua estrutura em altas velocidades. Ele chegou a essa conclusão quando calculou a massa das galáxias em um aglomerado, fazendo esse cálculo de duas formas: pelo teorema do virial e pela luz emitida pelas galáxias. O primeiro método, que considera a energia cinética e potencial do sistema, resultou em uma massa muito maior do que a obtida pelo segundo, que se baseia apenas na luz emitida pela massa visível. Essa discrepância sugeriu a existência de uma quantidade significativa de massa invisível, que Zwicky chamou de matéria escura, por não emitir radiação em nenhum comprimento de onda da luz visível.

As partículas que compõem a matéria escura são desconhecidas, mas, a partir de estudos (Fisher, 2022), foi verificado que essas partículas não têm interações com as partículas já conhecidas, pois não emitem, tampouco absorvem, radiação em nenhum comprimento de onda conhecido. Sabemos apenas que elas interagem gravitacionalmente com as outras partículas.

O objetivo deste trabalho é verificar essa evidência da matéria escura, mostrando seu efeito gravitacional em galáxias espirais. Para isso utilizaremos a lei de gravitação de Newton, para chegar à terceira lei de Kepler, e, utilizando o modelo de Kuzmin para uma correção no uso da terceira lei de Kepler em galáxias espirais, mostrar graficamente esse efeito nas curvas de rotação como foi mostrado por Zwicky (1933).

2. METODOLOGIA

Este estudo foi realizado baseado nos trabalhos de Zwicky (1933) e Rubin, Ford e Thonnard (1978), onde estudamos o efeito da matéria escura na curva de rotação das galáxias espirais. Para isso, nosso estudo inicia na dedução da terceira lei de Kepler, tendo isso em vista que inicialmente vamos considerar um sistema isolado, onde um planeta de massa m orbita uma estrela de massa M . Usando os princípios da Mecânica Clássica e a lei de gravitação de Newton, considerando que $M \gg m$, para que o sistema permaneça em equilíbrio, a soma das forças centrípeta e gravitacional deve ser igual a zero. Igualando as duas expressões, temos que

$$\frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} = \frac{m \cdot v^2}{r} \quad (1)$$

ou seja,

$$v = \sqrt{\frac{G \cdot M}{r}} \quad (2)$$

A equação (2) é chamada de curvas de rotação ou Terceira Lei de Kepler (Pereira; Velásquez-Toribio, 2024), que descreve o movimento de sistemas em órbita, relacionando a velocidade com o raio orbital. Ela nos diz que quanto maior o raio orbital menor é a velocidade tangencial do sistema. Para demonstrar na prática, usaremos o sistema solar como referência, pois é esperado que a terceira Lei de Kepler descreva o comportamento desse sistema de forma apropriada.

A Terceira Lei de Kepler, quando aplicada ao sistema solar, considera o sol como 99% da massa do sistema. Portanto, tratamos o Sol e os planetas como objetos pontuais em um plano. No entanto, essa abordagem não funciona para galáxias espirais, pois elas têm uma distribuição de massa não homogênea. O bojo central é quase esférico e as bordas, que são praticamente planas, contém uma porção significativa da massa, o que impede que a galáxia seja tratada como esférica ou plana. Uma análise mais adequada requer correções que considerem essa estrutura mais próxima possível da realidade.

Um modelo alternativo é considerando que sua estrutura é de um disco achatado com simetria azimutal, onde a densidade diminui conforme a distância do centro aumenta (Ximenes; Aguiar, 2023), conforme equação

$$\sigma(r) = \frac{M}{2\pi} \cdot \frac{R}{\sqrt{(r^2 + R^2)^3}}, \quad (3)$$

onde $\sigma(r)$ representa a massa por unidade de área a uma distância r do centro do disco, M é a massa total da galáxia e R define a escala de tamanho do disco. Essa distribuição de densidade é conhecida como o modelo de Kuzmin. No plano da galáxia, o campo gravitacional gerado por essa distribuição de massa aponta para o centro do disco. Para uma órbita circular dentro desse campo gravitacional, a velocidade tangencial é dada por

$$v = \frac{\sqrt{GM \cdot r}}{\sqrt[4]{(r^2 + R^2)^3}}, \quad (4)$$

que é uma adaptação para o uso da terceira lei de Kepler para uma galáxia espiral, pois leva em consideração sua distribuição de massa (Ximenes; Aguiar, 2023).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Começamos a apresentação dos nossos resultado na figura 1, onde os dados orbitais de cada planeta do sistema solar são analisados a partir da equação (2). Vemos que a curva kepleriana (em vermelho) apresenta uma excelente concordância, pois a velocidade tangencial dos planetas é

inversamente proporcional ao raio de órbita, como esperado pela terceira lei de Kepler (Ximenes; Aguiar, 2023).

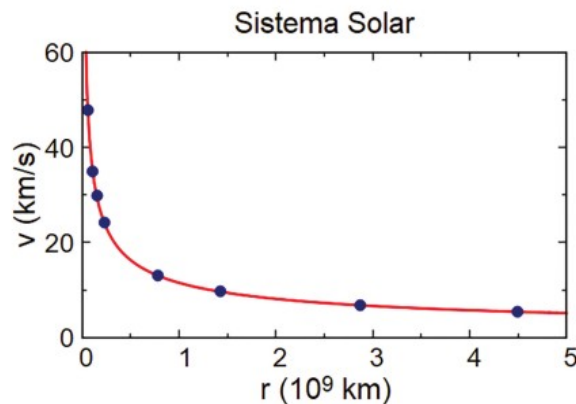


Figura 1: Curva de rotação do sistema solar. A linha vermelha representa a curva kleperiana obtida a partir da equação (2). Os pontos são dados orbitais dos planetas do sistema solar, retirados do trabalho de Ximenes e Aguiar (2023).

Na sequência, na figura 2, apresentamos os resultados de aplicação da equação (2) para as galáxias NGC 6503 e NGC 7331. Os dados (símbolos em azul) foram obtidos do trabalho de Ximenes e Aguiar (2023). Como mostrado nas linhas tracejadas (em preto), a concordância com a equação (2) não é boa. O comportamento observado das galáxias não segue o previsto pela lei de Kepler, pois há um aumento da velocidade nas proximidades do centro galáctico e velocidades quase constantes para distâncias maiores. Tal comportamento não acontece comente para as galáxias NGC 6503 e NGC 7331, já que o mesmo resultado foi obtido para várias outras galáxias.

Para distâncias intermediárias, o modelo de Kuzmin gera uma curva de rotação que conecta suavemente os limites dados pelas equações (2) e (4), como mostrado na figura 2 (linhas sólidas em vermelho), ajustados para que o pico teórico coincida com a maior velocidade observada. O cálculo coincide bem com os dados na região central da galáxia, mas, em áreas mais distantes, o modelo de Kuzmin prevê uma queda na velocidade, enquanto os dados orbitais mostram um valor quase constante nas periferias.

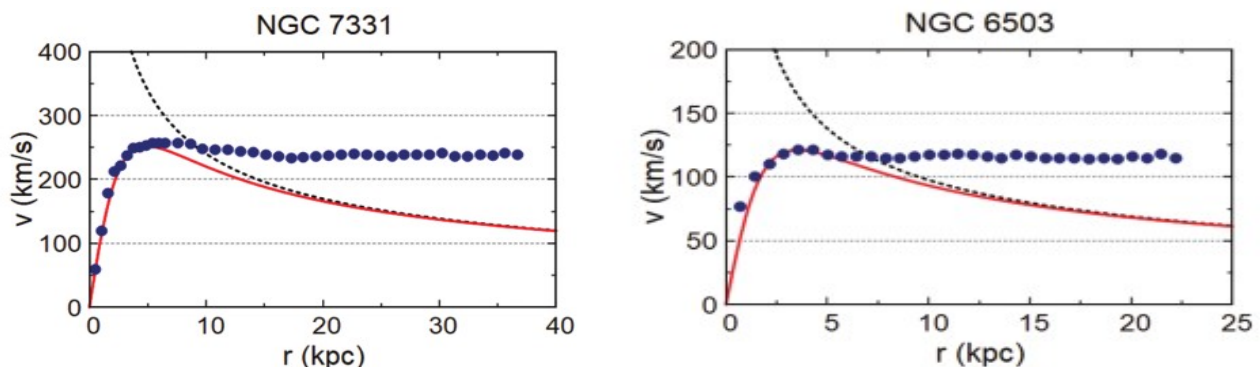


Figura 2: Curvas de rotação para as galáxias NGC 6503 e NGC 7331. As linhas contínuas em vermelho representam o modelo de Kuzmin, dado pela equação (4). As linhas tracejadas mostram o limite kepleriano, equação (2). Os pontos em azul foram extraídos do trabalho de Ximenes e Aguiar (2023).

4. CONCLUSÕES

As curvas de rotação das galáxias não seguem o padrão previsto pela terceira lei de Kepler, que sugere que a velocidade orbital das estrelas deveriam diminuir com a distância ao centro. Observações mostram que, nas regiões periféricas, a velocidade permanece constante. Esse desvio persiste mesmo com ajustes considerando a galáxia como um objeto extenso. A explicação mais plausível é a presença de matéria escura, invisível, que gera a gravidade adicional necessária para manter as altas velocidades orbitais, pois a matéria visível, por si só, não explica essa discrepância, reforçando a hipótese da matéria escura, que compõe cerca de 20% do universo e é fundamental para sua estrutura.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PEREIRA, C. C.; VELÁSQUEZ-TORIBIO, A. M. A Terceira Lei de Kepler em diferentes escalas: de luas até galáxias. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 46, p. e20230329, 2024.

PETER, Fisher. **What is dark matter?** (Princeton frontiers in physics). Princeton: Princeton University Press, 2022.

RUBIN, Vera C.; FORD JR, W. Kent; THONNARD, Norbert. Extended rotation curves of high-luminosity spiral galaxies. IV-Systematic dynamical properties, SA through SC. **Astrophysical Journal, Part 2-Letters to the Editor**, vol. 225, Nov. 1, 1978, p. L107-L111., v. 225, p. L107-L111, 1978.

XIMENES, Samuel Jorge Carvalho; AGUIAR, Carlos Eduardo. Matéria Escura no Ensino Médio. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, p. e20220334, 2023.

ZWICKY, Fritz. Die rotverschiebung von extragalaktischen nebeln. **Helvetica Physica Acta**, Vol. 6, p. 110-127, v. 6, p. 110-127, 1933.