

## **UMA INVESTIGAÇÃO DA TEORIA DINÂMICA DE NEWTON MODIFICADA**

José Carlos de Mélo Silva; Morgana Lígia de Farias Freire

Universidade Estadual da Paraíba-Centro de Ciências e Tecnologia. E-mail: fisicaarlos@gmail.com

### **INTRODUÇÃO**

A mecânica newtoniana tem como sucesso um conjunto de leis conhecidas como leis de Newton para o estudo dos corpos em movimento. Sendo esse conjunto de leis a base da física clássica. Apesar de se conhecer algumas de suas limitações no diz respeito aos fenômenos com valores de velocidades e distâncias grandes, o que não faz parte do nosso cotidiano ou que não estamos acostumados no nosso dia a dia. Essas limitações começaram a ser reconhecidas no início do século XX. Uma primeira limitação que podemos citar, diz respeito a objetos que se movimentam com velocidades comparáveis a da luz – daí o advento da teoria da relatividade restrita ou especial. A segunda limitação diz respeito ao estudo de objetos cujas escalas têm comprimentos compatíveis com as escalas do tamanho de elétrons, prótons e nêutrons, ou seja, escalas menores que  $10^{-8}$  m – daí o advento da mecânica quântica.

Dessa forma, concordamos com Sampaio et al. (2011) que desde o advento da física moderna, no início do século XX, que estudos em mecânica clássica têm perdido o atrativo ou encanto. Assim, existe uma tendência em se preocupar por teorias contemporâneas, sem se preocupar com novos problemas em mecânica newtoniana, entender novos sistemas cujas ferramentas matemáticas e explicações são tidas como sofisticadas e elegantes. Mesmo tendo a condição de teoria fundamental, a mecânica newtoniana “conserva ainda grandes e interessantes aplicações em cenários puramente teóricos e ligados à física contemporânea de ponta, além de todas as incontáveis aplicações técnicas que estão intimamente ligadas ao nosso dia-a-dia” (SAMPAIO et al., 2014, p.1).

Por exemplo, apesar da teoria da relatividade geral explicar, com sucesso, testes referentes ao sistema solar, têm-se algumas discordâncias quanto se trata de sistemas maiores, como galáxias e aglomerados de galáxias. As previsões obtidas através da teoria não são compatíveis com os dados observacionais quando se analisa a curva de velocidade de rotação das galáxias (BOSMA, 1978; OLIVEIRA, 2007). Baseado na teoria de Newton é verificado que a velocidade de rotação de um corpo deveria diminuir à medida que se afasta de seu centro. Mas na realidade o que se comprova é que essa velocidade de rotação ao afastar-se do centro está se mantendo praticamente constante. A teoria de Newton não estava de acordo com o movimento destes corpos. Ao perceber a mudança no

comportamento dos corpos em a sua velocidade de rotação, verificou-se a necessidade de encontrar respostas para este comportamento. Duas possíveis respostas seriam a existência de uma “matéria escura” que não é vista por telescópios e uma mudança nas leis da dinâmica de Newton, ou teoria MOND.

Esta segunda resposta foi nossa proposta de trabalho. A partir de uma análise da modificação da dinâmica de Newton, mostramos que sua interpretação tem consistência física e pode ser tratada como uma teoria de grande importância. Para se explicar corretamente os fenômenos pela descrição da relatividade geral ou gravitação newtoniana é preciso supor a existência de matéria escura. Caso não se tenha suposição da existência da matéria escura, torna-se necessária a formulação de uma nova teoria, pode-se atacar o problema da seguinte maneira: usando a gravitação newtoniana com modificações, ou seja, modificando a dinâmica do sistema em estudo.

A utilização da Gravitação Newtoniana Modificada – Modelo MOND - ao invés da relatividade geral que modifica a mecânica newtoniana em situações de baixas acelerações de origem gravitacional, explicando corretamente o comportamento da curva de rotação das galáxias espirais sem a necessidade de matéria escura. Assim, existem duas teorias principais, ou correntes de pensamentos, em relação ao giro das galáxias, a MOND e a que propõe a existência de massa física no espaço exterior com características peculiares e desconhecidas, a matéria escura.

No entanto, vamos desconsiderar a existência da matéria escura nesse espaço exterior e considerar que se deve modificar a dinâmica gravitacional. Para essa modificação utilizaremos a teoria MOND. A sustentação da ideia da dinâmica modificada se justifica por que ela passaria a reger o movimento de corpos em escalas de aceleração muito pequenas. A teoria MOND, na realidade, trata-se de uma modificação na segunda lei de Newton. Portanto, esta investigação tem como principal interesse, o de mostrar a potencialidade desta teoria para o esclarecimento diferenciado na rotação de galáxias. Sendo assim, nosso objetivo geral foi investigar como a teoria MOND passaria a reger o movimento de rotações das galáxias.

## **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A Teoria MOND baseia-se numa modificação da segunda lei de Newton às acelerações com intensidades muito baixas de origem gravitacional, explicando corretamente o comportamento da curva de rotação das galáxias sem a necessidade da matéria escura.

Uma galáxia constitui-se de uma família de estrelas que se juntaram no espaço pela força da gravidade. As galáxias, não estão distribuídas uniformemente pelo universo, algumas estão em

grandes famílias. Aparem em uma variedade de tamanhos, formas e massas. As pequenas têm apenas alguns milhões de estrelas e medem apenas um milhão de anos-luz, as maiores têm milhões de estrelas e centenas de milhões de anos-luz de comprimento. No entanto, deve-se ressaltar que existem algumas observações astronômicas, principalmente, colisões de aglomerados de galáxias, contradizem esta teoria. Como sabemos hoje, o gás forma a maior parte da massa de um aglomerado de galáxias.

As velocidades de rotações das galáxias espirais dos tipos Sa, Sb e Sc crescem rapidamente em distâncias perto de seu centro (RUBIN, 1980; RUBIN et al., 1985) e para distâncias longínquas do centro e na sua periferia, a velocidade das estrelas cresce lentamente e tende a um limite de velocidade máxima, que é maior do que as velocidades para distâncias menores (SANDOVAL, 2008).

Os resultados indicaram que as velocidades dependem do tipo das galáxias espirais. Os valores para as distribuições de velocidades foram maiores para as do tipo Sa do que para as dos tipos Sb e Sc, sendo Sa menos estendido em seu raio equatorial em relação ao Sb e Sc, e tendo a mesma intensidade luminosa. Para as galáxias do mesmo tipo aquelas de maior brilho tiveram maiores velocidades de rotação (SANDOVAL, 2008). As explicações para as altas velocidades de rotação das estrelas de galáxias espirais são duas: (1) a presença de matéria escura, cujas propriedades na atualidade não são muito bem conhecidas, mas que foi necessário propor sua existência para explicar o porquê das estrelas não serem ejetadas para fora das galáxias – devido à massa total não ser suficiente para manter em rotação em torno do seu centro; e, (2) as leis de Newton ter apresentar falhas e ser necessário fazer uma correção e/ou modificação. A matéria escura tem sido amplamente estudada (SANDOVAL, 2008), mas sua existência não foi comprovada.

A segunda explicação foi indicada por Milgron (1983), que propôs uma modificação da segunda lei de Newton para a gravidade fraca. De modo semelhante, Disney (1984) sugere modificações da lei de Newton da gravitação universal. Galáxias que não dispõem de barras, ou outro recurso de simetria, parecem resultar, aproximadamente, em órbitas circulares, e o campo de velocidade é simplesmente rotação vista na projeção do movimento. Galáxias barradas, por outro lado, são mais complicadas, por duas razões: primeiro as velocidades, especialmente, na região barrada, manifestam fortes movimentos de fluxo não circulares, e em segundo a geometria de visão é muito difícil de determinar. Tanto o ângulo de inclinação em relação ao plano do céu quanto o ângulo de posição em relação ao eixo de projeção são difíceis de determinar.

No início da década de 1980, uma das grandes perguntas no mundo da ciência era como os corpos celestes se movimentam e como descrever estes movimentos? Era conhecido que os corpos celestes em movimento não realizavam um movimento semelhante ao previsto pela teoria gravitacional de Newton. Existia uma discrepância entre o comprovado por Newton e o que era visualizado experimentalmente. De acordo com a teoria de Newton, os corpos celestes ao se distanciarem do centro de referência, deveriam diminuir a sua velocidade de rotação. Porém, o que acontece é uma constância nos valores das velocidades de rotações das galáxias. Essa discrepância está ligada apenas para sistemas estelares em que a aceleração é inferior a um valor fixo. Este valor fixo para aceleração, algum tempo depois foi chamada de aceleração crítica  $a_0$ , seu valor é aproximadamente igual a  $a_0 = 1,2 \times 10^{-8} \text{ cm.s}^{-2}$ . Foi observado que para corpos estelares que desempenham aceleração inferior ao valor crítico, não há explicação para o movimento, senão modificar a dinâmica de Newton ou a existência de uma matéria escura não-bariônica na descrição deste movimento. De tudo isso, temos a necessidade de se estudar tal comportamento.

Outra coisa importante nas observações é o fato de que os satélites utilizados não conseguem detectar por meio da luminosidade dos corpos celestes a discrepância que é apresentada no gráfico, então, isso pode ser descrito por meio de uma matéria escura que possivelmente estaria modificando o movimento destes corpos. Aqui optamos por uma descrição alternativa que é a modificação na dinâmica de Newton (MOND), proposta por Milgrom (1983). Então, estaremos analisando a MOND com o intuito de mostrar a sua importância e funcionalidade teórica.

## **A teoria MOND**

Na teoria de Newton, é possível analisar o comportamento de corpos em relação às galáxias, a partir de sua posição. Portanto, consideramos uma galáxia como uma distribuição esfericamente simétrica de massa de raio  $R$ , com densidade constante e igual a  $\rho$ . Para isso vamos tomar o sistema com sendo um corpo de massa  $m$  presente em uma galáxia esférica de massa  $M$ , raio  $R$  e densidade  $\rho$ . Tudo isso para fazermos a análise do problema da curva de rotação de galáxias.

Para obtermos a velocidade com que um corpo orbita nesta galáxia consideramos, duas regiões (1) a região interior ao raio  $R$  ( $r < R$ ) e a região exterior ao raio  $R$  ( $r > R$ ). A partir dos valores obtidos das velocidades para estas regiões estes foram comparados com os dados observacionais das galáxias para enfatizar que a teoria MOND explica bem o comportamento da curva de rotação (SANDERS, 2007; SANDERS e NOORDERMEER, 2007; VELTEN, 2008).

A alteração da dinâmica proposta por Newton foi dada por uma função  $\mu(x)$  denominada MOND (Modified Dynamics Newtonian), também denominada de teoria de Newton modificada. A teoria da MOND foi criada para que a partir desta função pudéssemos descrever de maneira correta o comportamento a respeito da rotação de galáxias, isto é, esta modificação tem como principal função adequar a física ao comportamento das galáxias em pontos suficientemente distantes do centro da galáxia. A função  $\mu(x)$  é uma função da aceleração para a descrição do movimento deste corpo (ou galáxia) ao longo de sua trajetória.

Um detalhe importante desta função é o fato de que o intervalo de estudo é o mesmo utilizado na teoria newtoniana, ou seja, devemos utilizar duas condições importantes, uma delas é analisar um corpo de matéria colocado próximo ao centro da galáxia e a outra é analisar o corpo colocado distante da galáxia. No entanto, deve-se enfatizar que existem na literatura diversas formas para função  $\mu(x)$ , pois as implicações causadas pela teoria MOND não dependem de uma forma exata para esta função  $\mu(x)$ .

## **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Cada análise feita, vemos que a velocidade dos corpos pode ser alterada de acordo com sua posição  $r$  em relação ao raio  $R$  da galáxia. Para analisarmos a eficiência desta teoria, determinamos a velocidade dos corpos para diferentes funções que modifica a dinâmica newtoniana. Na obtenção dos dados das galáxias apresentadas, ou seja, velocidade e raio, utilizados dados de observatórios e também empregamos o uso de um software de digitalização, quando não foi possível a aquisição de dados através destes observatórios. Os resultados indicaram que as velocidades dependem do tipo das galáxias.

De forma geral, no entanto, apesar da aproximação da configuração utilizada, temos que a teoria MOND apresenta uma melhor descrição para a curva de rotação do que a teoria newtoniana.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O movimento das estrelas e nuvens ao redor do centro galáctico faz com que estes não se desloquem espacialmente, ou seja, fiquem em seus devidos lugares. Semelhante ao que acontece com o movimento orbital dos planetas evita com que ao redor do sol. O que acontece no movimento conjunto de estrelas e gás ao redor do centro de uma galáxia é chamado de rotação galáctica, ou rotação da galáxia.

Com um modelo simplificado para o problema da curva de velocidade de rotação das galáxias, a teoria MOND, apresenta um comportamento que concorda de forma razoável com os dados observacionais. Pois, a teoria newtoniana falha principalmente na região exterior a galáxia. A teoria MOND, embora com suas diferenças com relação aos dados observacionais, foi testada em vários estudos de diversos sistemas e demonstrou seu sucesso. Mesmo se postulando, a matéria escura, este é um tema aberto, até que esta seja detectada por aceleradores de partículas, com é o caso do LHC (Large Hadron Collider).

## **REFERÊNCIAS**

- BOSMA, A. The Distribution and Kinematics of Neutral Hydrogen in Spiral Galaxies of Various Morphological Types, PhD Dissertation, University of Groningen, The Netherlands, 1978.
- DISNEY, M. The Hidden Universe, (New York: Macmillan Publishing company) p.145, 1984.
- MILGROM, M. A. Modification of the Newtonian Dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis. *Astrophysical Journal*, 270, 365, 1983.
- OLIVEIRA, J. D. B. de Limite gravitacional pós-newtoniano da teoria TeVeS de Bekenstein. Dissertação de Mestrado. Pós-graduação em Física, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.
- RUBIN V. C., Thonnard N., Ford Jr W. K., *ApJ*, 238, 471, 1980.
- RUBIN, V. C. et al. Rotation velocities of 16 Sa galaxies and a comparison of Sa, Sb, and Sc rotation properties, *Astrophysical Journal*, 289 81, 1985.
- SAMPAIO, R.V., FRACALOSSI, R.; OLIVEIRA A. M. Análise newtoniana de um sistema mecânico com uma força dependente da velocidade e a existência de condições para a conservação de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 36, n. 1, 1301, 2014.
- SAMPAIO, R.V.; FRACALOSSI, R.; OLIVEIRA A. M. Trajetórias limitadas num sistema com uma força dependente da velocidade. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 1, 1306, 2011.
- SANDERS, R. H.; NOORDERMEER, E. Confrontation of MOND with the rotation curves of early-type disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 379, p.702-710, 2007.
- SANDOVAL, E. Lopez. Static universe: infinite, eternal and self-sustainable. arXiv preprint arXiv:0807, 2008.
- VELTEN, H. E. S. MOND: uma alternativa à mecânica newtoniana. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 3, 3314, 2008.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelo suporte financeiro.