



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
Instituto de Física  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
Mestrado Profissional em Ensino de Física

## **A Matéria Escura**

Samuel Jorge Carvalho Ximenes  
&  
Carlos Eduardo Aguiar

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Samuel Jorge Carvalho Ximenes, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2016

# A Matéria Escura

Samuel Jorge Carvalho Ximenes

Carlos Eduardo Aguiar

## 1 Introdução

A matéria que vemos à nossa volta é composta por átomos, que por sua vez são formados por prótons, nêutrons e elétrons. Entretanto, há fortes evidências de que a maior parte da matéria existente no Universo não é constituída dessa maneira. Cerca de 80–90% da massa do Universo parece ter origem em partículas que não são prótons, nêutrons, elétrons ou combinações destes. Mais ainda, essas partículas exóticas não interagem com a radiação eletromagnética, de modo que a matéria formada por elas é invisível, ou seja, não absorve ou reflete luz de qualquer comprimento de onda. Por isso ela é chamada de *matéria escura*. Como não pode ser vista por telescópios (de radiotelescópios aos telescópios de raios-X) a matéria escura só é detectada através de sua interação gravitacional, que afeta, por exemplo, o movimento de objetos visíveis como estrelas e galáxias.

Um dos indícios mais fortes da existência de matéria escura é a curva de rotação de galáxias – a relação entre velocidade e o raio das órbitas das estrelas de uma galáxia. Segundo a gravitação newtoniana, para estrelas muito distantes do núcleo galáctico, a velocidade orbital deveria diminuir à medida que o raio da órbita aumenta, um resultado semelhante à terceira lei de Kepler. Entretanto, não é isso o que se observa nas galáxias espirais (o que será melhor explicado mais a frente). A discussão das curvas de rotação de galáxias e sua conexão com a matéria escura pode ser realizada utilizando-se apenas conceitos básicos da dinâmica, gravitação newtonianas e a terceira lei de Kepler. Vejamos então uma rápida apresentação dos conceitos que são

essenciais para apresentarmos a matéria escura.

## 2 A terceira lei de Kepler

Para obtermos a terceira lei de Kepler, a “lei dos períodos”, consideraremos um planeta de massa  $m$  em órbita circular em torno de uma estrela de massa  $M$  (figura 1). Vamos supor que a massa da estrela é muito grande ( $M \gg m$ ),

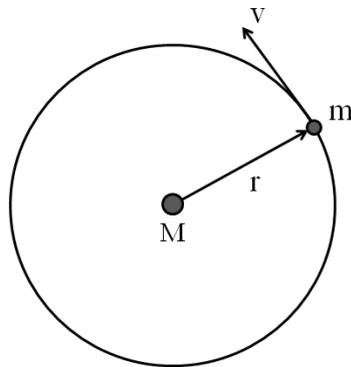


Figura 1: Planeta em órbita circular em torno de uma estrela.

de modo que esta pode ser considerada fixa. Como a órbita do planeta é circular, sua aceleração (centrípeta) é

$$a = \frac{v^2}{r}, \quad (1)$$

onde  $r$  é o raio da órbita e  $v$  a velocidade do planeta. A força que age sobre o planeta é dada pela lei da gravitação universal de Newton,

$$F = G \frac{Mm}{r^2}, \quad (2)$$

onde  $G = 6,674287 \times 10^{-11} \text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$  é a constante gravitacional. A segunda lei de Newton relaciona a aceleração do planeta à força gravitacional,

$$F = ma, \quad (3)$$

ou seja,

$$G \frac{Mm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad (4)$$

e portanto

$$v^2 = \frac{GM}{r}. \quad (5)$$

Com isso obtemos uma relação entre a velocidade e o raio da órbita,

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad (6)$$

chamada de *curva de rotação* dos corpos (planetas, etc) que giram em torno dessa estrela. Vemos que a velocidade de rotação diminui à medida que o raio orbital aumenta, um resultado que será essencial para a nossa discussão da matéria escura.

A curva de rotação é uma expressão da terceira lei de Kepler, embora não na forma usualmente apresentada na maioria dos livros do ensino médio. Para chegar ao resultado encontrado nos livros-texto, onde o período  $T$  da órbita é usado no lugar da velocidade  $v$ , basta notar que

$$v = \frac{2\pi r}{T}, \quad (7)$$

que substituído em (6) leva à forma usual da terceira lei de Kepler,

$$T^2 = \left( \frac{4\pi^2}{GM} \right) r^3. \quad (8)$$

### 3 Curvas de rotação do sistema solar e das luas de Júpiter

As figuras a seguir nos mostram, respectivamente, as curvas de rotação dos oito planetas do sistema solar e das oito primeiras luas de Júpiter. Em ambos os casos, nós encontramos um excelente acordo entre os dados (os pontos mostrados nas figuras) e a terceira lei de Kepler, representada por linhas nas figuras. Note que, em ambos os casos, temos uma série de corpos

distintos que estão girando ao redor de regiões massivas (Sol e Júpiter).

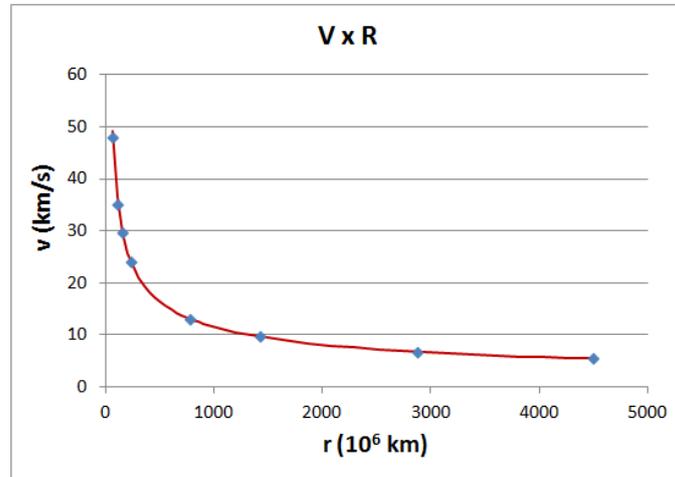


Figura 2: Curva de rotação para o sistema solar. Os pontos são os valores observados para os planetas e a linha representa a curva de rotação kepleriana, equação (6).

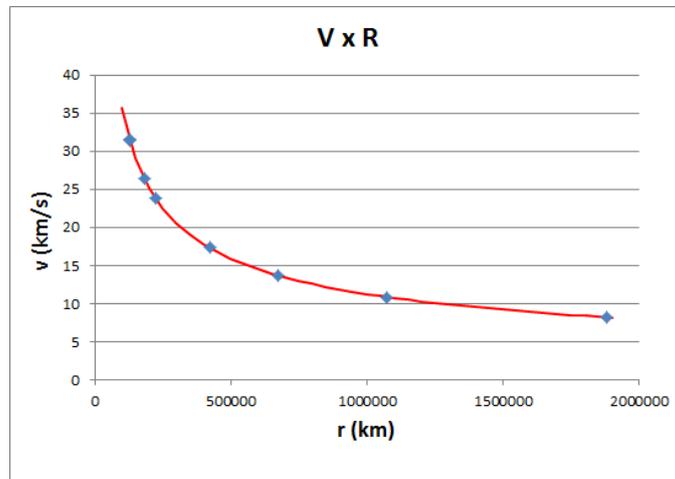


Figura 3: Curva de rotação para as luas de Júpiter. Os pontos são os valores observados e a linha representa a previsão kepleriana.

## 4 Curvas de rotação de galáxias

As estrelas não estão distribuídas uniformemente pelo Universo. Elas tendem a agrupar-se em galáxias, “ilhas de estrelas” contendo bilhões de sóis semelhantes ao nosso astro. As galáxias costumam ser classificadas em três tipos:

- *Galáxias espirais*, que têm a aparência de discos achatados com um bojo central. Um exemplo está mostrado na figura 4(a). As estrelas no disco descrevem órbitas praticamente circulares em torno do centro galáctico.
- *Galáxias elípticas* têm forma arredondada, sem apresentar um disco. Frequentemente são mais alongadas numa direção que nas outras. A figura 4(b) mostra uma dessas galáxias.
- *Galáxias irregulares*, que não têm forma de disco nem são arredondadas. Uma galáxia irregular é apresentada na figura 4(c)

No caso de galáxias espirais, não são apenas as estrelas que estão em movimento. O gás (essencialmente hidrogênio atômico e molecular) e poeira presentes nessas galáxias também possuem um movimento aproximadamente circular em torno do centro galáctico. É razoável esperar que a terceira lei de Kepler se aplique a estrelas, gás e poeira situados na periferia das galáxias. Nesse caso a parte central da galáxia, contendo quase toda a massa visível, desempenharia um papel semelhante ao do Sol ou de Júpiter, e as estrelas, gases e poeira da periferia orbitariam esta parte central como os planetas giram em torno do Sol e os satélites em torno de Júpiter, ou seja, obedecendo à terceira lei de Kepler. Vejamos as curvas de rotação de três galáxias distintas:

Essas curvas são bem diferentes das que vimos para o sistema solar e as luas de Júpiter. O crescimento inicial das curvas ocorre na região mais massiva central. Não vemos esse crescimento nos planetas solares ou nas luas de jupiterianas porque isso significaria que corpos orbitam o interior do Sol ou de Júpiter. Fora das regiões centrais as curvas de rotação deveriam cair,

como o previsto pela lei de Kepler, porém os corpos no disco das galáxias espirais se movimentam com uma velocidade quase constante, independente da distância ao centro. O que aconteceu de errado?

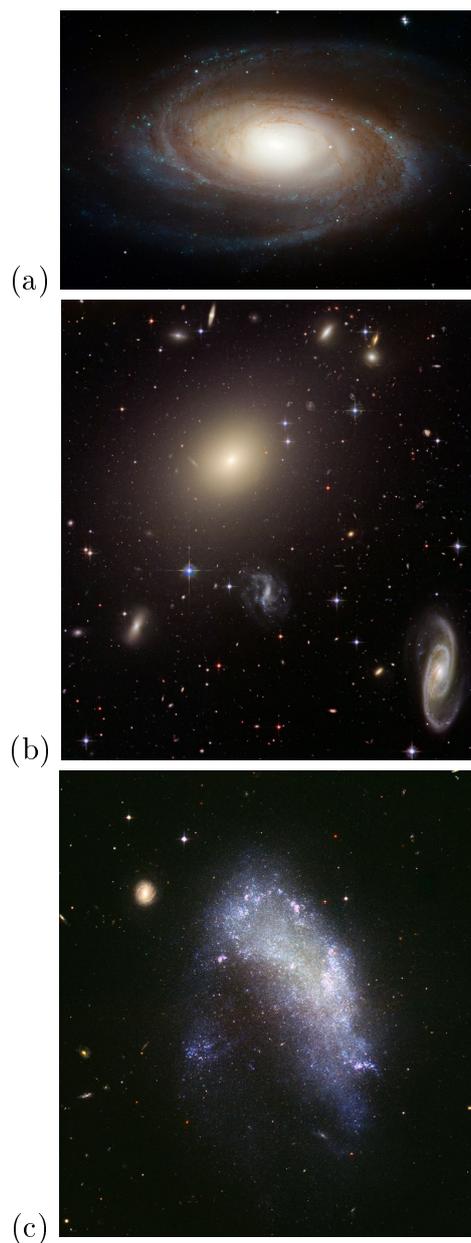


Figura 4: Três tipos de galáxias: (a) espiral, (b) elíptica e (c) irregular.

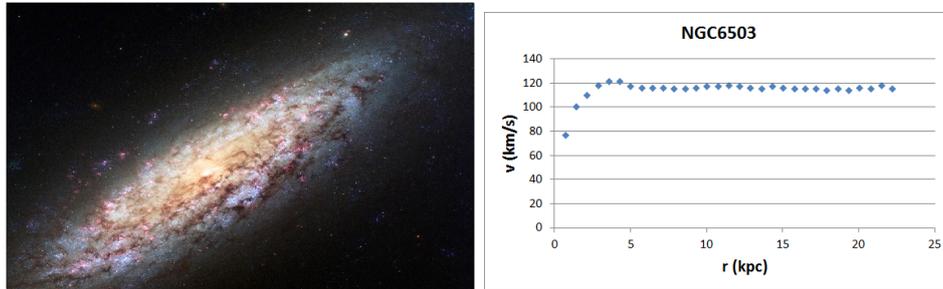


Figura 5: A galáxia NGC 6503 e sua curva de rotação. O raio do disco galáctico visível é de aproximadamente 5,3 kpc.

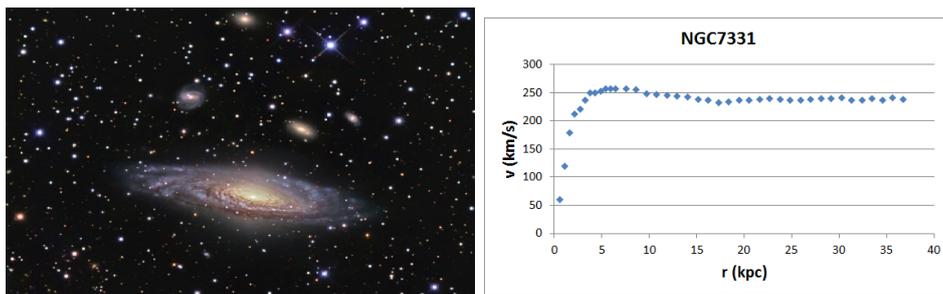


Figura 6: A galáxia NGC 7331 e sua curva de rotação. O raio do disco galáctico visível é de aproximadamente 23,3 kpc.

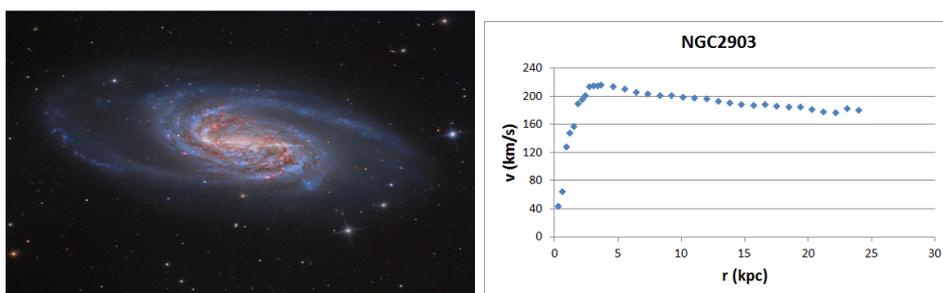


Figura 7: A galáxia NGC 2903 e sua curva de rotação. O raio do disco galáctico visível é de aproximadamente 11,7 kpc.

## 5 Matéria escura

Se olharmos para a relação

$$v^2 = \frac{GM}{r}, \quad (9)$$

veremos que, para explicar as velocidades das curvas de rotação que não caem como o esperado, deve haver uma grande quantidade de massa interagindo gravitacionalmente com as estrelas e com meio interestelar das galáxias. Aí está a *matéria escura*. Uma matéria “esquisita” se compararmos com a matéria que conhecemos. Não conseguimos enxergá-la, visto que ela não interage com a luz ou com qualquer outra forma de radiação, mas somos capazes de perceber sua presença através da força gravitacional que ela exerce nos corpos ao seu redor. Você deve prestar atenção a um detalhe curioso: as velocidades continuam com valores elevados mesmo nas regiões mais afastadas da galáxia, ou seja, para muito além do seu raio galáctico. Isso indica que a matéria escura deve formar um halo semelhante ao da figura 8. Devido a



Figura 8: Halo de matéria escura de uma galáxia.

este forte indício e outras evidências obtidas em observações astronômicas, a maior parte dos cientistas considera que a hipótese da matéria escura está bem fundamentada, apesar de não terem qualquer resultado experimental sobre a natureza das partículas que formam este tipo de matéria.