


Matéria Escura no Ensino Médio

Dark Matter in Secondary Education

Samuel Jorge Carvalho Ximenes¹, Carlos Eduardo Aguiar^{*2} 

¹Instituto Federal do Paraná, Campus Capanema, Capanema, PR, Brasil.

²Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Recebido em 19 de dezembro de 2022. Revisado em 22 de abril de 2023. Aceito em 27 de maio de 2023.

Apresentamos uma abordagem do conceito de matéria escura, desenvolvida visando o ensino médio. Evidências da existência de matéria escura são estudadas a partir das curvas de rotação de galáxias, utilizando apenas elementos presentes na grade curricular de estudantes pré-universitários, como a mecânica do movimento circular, conceitos básicos da gravitação newtoniana e a terceira lei de Kepler. Uma aplicação dessa abordagem é relatada. **Palavras chave:** Ensino de física, gravitação, matéria escura.

We present a didactic approach to the concept of dark matter that can be used in secondary schools. Evidence for dark matter is studied by analyzing galaxy rotation curves, using only elements that are already familiar to the students: mechanics of the uniform circular motion, basic concepts of Newtonian gravitation and Kepler's third law. We also report on an application of this approach.

Keywords: Physics education, gravitation, dark matter.

1. Introdução

A matéria que vemos à nossa volta é composta por átomos, que por sua vez são formados por prótons, nêutrons e elétrons. Há fortes evidências, entretanto, de que a maior parte da matéria existente no Universo não é constituída dessa maneira. Cerca de 80% da massa do Universo parece ter origem em partículas que não são prótons, nêutrons, elétrons nem combinações desses. Mais ainda, essas partículas exóticas não interagem com a radiação eletromagnética, de modo que a matéria formada por elas é invisível, ou seja, não emite, absorve ou reflete luz em nenhum comprimento de onda. Por isso ela é chamada de *matéria escura*. Como não pode ser vista por telescópios – desde radiotelescópios até os 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. Entre as várias evidências da existência de matéria escura estão a taxa de rotação de galáxias, a velocidade das galáxias em aglomerados e o desvio da luz por lentes gravitacionais [1].

Um dos indícios mais fortes da existência de matéria escura é a curva de rotação de galáxias espirais – a relação entre velocidade e o raio das órbitas das estrelas em uma dessas galáxias – e esse é o aspecto sobre o qual concentraremos nossa atenção neste artigo. 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 ao previsto pela terceira lei de Kepler. Entretanto, não é isso o que se observa nas galáxias espirais. No início da década de 1970 a astrônoma Vera Rubin descobriu que a velocidade orbital nessas galáxias não diminuía com o aumento da distância ao centro galáctico, mesmo que esta distância fosse muito grande [2, 3]. A explicação mais aceita atualmente para esse comportamento das curvas de rotação é a existência de um halo de matéria escura envolvendo a galáxia e indo muito além da região luminosa.

A discussão de curvas de rotação de galáxias e sua conexão com a matéria escura pode ser efetuada utilizando-se apenas conceitos básicos da dinâmica e gravitação newtonianas, essencialmente aqueles que levam à terceira lei de Kepler, um tema comumente abordado no ensino médio e nos ciclos básicos universitários. Isso abre perspectivas pedagógicas interessantes que pretendemos explorar neste artigo.¹ Como veremos, a ligação entre as curvas de rotação de galáxias e a existência da matéria escura pode ser estudada como uma extensão natural do tratamento da gravitação newtoniana apresentado nos cursos introdutórios de física. Essa extensão, embora simples, é riquíssima em consequências – os alunos são apresentados a uma das ideias mais surpreendentes do século XX, a de que a maior parte da massa do Universo vem de algo que não podemos ver e que até hoje não sabemos o que é. Ao se deparar com isso os estudantes não apenas são postos em contato com uma área de pesquisa atual; eles também têm oportunidade de mudar

*Endereço de correspondência: carlos@if.ufrj.br

¹ O artigo é baseado na dissertação de Mestrado em Ensino de Física de um dos autores [4].

profundamente alguns aspectos de sua visão de mundo (de que é feito o Universo?) e de perceber como evolui o conhecimento científico.

A matéria escura também mostra o que pode ser um bom caminho para se inserir temas de física moderna e contemporânea no ensino médio, uma preocupação antiga de professores e pesquisadores em ensino. Como veremos, a apresentação de um tema de física moderna tem muito a ganhar se esse puder ser associado à física tradicionalmente abordada nos currículos escolares. Isso possibilita, por exemplo, que as dificuldades encontradas pela física “antiga” sejam reconhecidas e seus limites mapeados, ou seja, faz com que essa física seja melhor compreendida. Também podemos entender melhor as novas ideias e as razões que nos levaram a elas e, o que talvez seja mais importante, somos capazes de apreciar com maior clareza as diferenças entre as velhas e novas concepções. Discutiremos esse ponto em mais detalhes na próxima seção.

2. Inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio

Uma queixa comum entre professores de física é que os currículos tradicionais do ensino pré-universitário vão apenas até a física do século XIX, deixando de lado os grandes avanços ocorridos no século XX, como a mecânica quântica, a relatividade (restrita e geral) e os ramos da física que se desenvolveram apoiados nessas teorias (física atômica, nuclear, de partículas, da matéria condensada, cosmologia, etc.). A discussão sobre a inclusão ou não de tópicos de física moderna em disciplinas de física básica é antiga e, muitas vezes, ocorreu de forma acirrada [5, 6].

A matéria escura é certamente um tema de física contemporânea. Mais que isso, é uma área de pesquisa em plena atividade; a natureza da matéria escura é desconhecida e vários experimentos estão sendo realizados em busca das partículas que a comporiam. Assim, a inclusão do tema “matéria escura” faz parte do quadro mais geral da inserção de tópicos atuais em cursos introdutórios de física. Nesta seção discutiremos alguns dos argumentos que têm sido usados para justificar tal inserção e apresentaremos as principais metodologias adotadas nas iniciativas nesse sentido.

Há muitos motivos para se incluir temas atuais nos currículos introdutórios de física [7, 8]. Entre eles destaca-se o estímulo a que os estudantes reconheçam a física como um empreendimento humano em andamento, do qual se pode participar. Tem-se também a oportunidade de discutir como a física evolui, contribuindo não apenas para uma compreensão da natureza da ciência mas também a um melhor entendimento das físicas clássica e moderna. Outra motivação importante é que a física moderna mudou radicalmente nossa visão de mundo, distanciando-a da ditada pelo senso comum. É verdade que a física tradicional já havia feito

isso; basta lembrar como a noção galileana de inércia contradiz nossa intuição aristotélica de movimento. A física moderna, entretanto, foi muito além, levando esse distanciamento a extremos que desafiaram noções muito básicas – como o conceito de simultaneidade, por exemplo, que com a relatividade deixou de ter um significado absoluto.

Quaisquer que sejam as razões, parece certo que existe entre professores de física um desejo de que cursos introdutórios abordem aspectos da física moderna. Contudo, como enfatizado por Arons [5, 9], o sucesso de uma iniciativa desse tipo depende de quais conteúdos são escolhidos e da forma como são apresentados. Arons questiona se a inserção prematura de resultados da mecânica quântica ou da física nuclear, por exemplo, produz um aprendizado e compreensão genuínos desses conteúdos. Segundo ele, o que provavelmente ocorre é apenas a memorização cega de resultados finais, sem um entendimento apropriado dos conceitos físicos relevantes.

A preocupação de Arons é confirmada pelo trabalho de Gil Pérez e Solbes [10]. Nele, os autores analisam livros-texto espanhóis e relatam que a imensa maioria (cerca de 90%) não faz qualquer referência às dificuldades que originaram a crise da física clássica nem às profundas diferenças conceituais entre a física clássica e a moderna. Gil Pérez e Solbes aplicaram um questionário a professores em atividade em escolas espanholas, perguntando sobre os critérios e métodos que esses utilizavam para ensinar física moderna. Apenas 12% das respostas faziam referência à necessidade de se começar pelos problemas encontrados pela física clássica ou enfatizavam as diferenças entre os paradigmas das físicas clássica e moderna. Esses dados mostram que o tipo de abordagem criticada por Arons é mais comum do que seria de esperar. O resultado de tais práticas é, segundo Gil Pérez e Solbes, que a compreensão dos estudantes sobre os principais aspectos dos novos paradigmas é muito pobre. Um questionário aplicado pelos autores a alunos com idades entre 16 e 18 anos mostrou que cerca de 90% deles ignoravam a existência de uma crise no desenvolvimento de física clássica, sendo incapazes de mencionar um único problema associado a essa crise ou uma diferença entre as físicas moderna e clássica. Percentagem semelhante dos alunos apresentou concepções profundamente equivocadas sobre questões como a velocidade da luz, a dualidade onda-partícula, etc. Gil Pérez e Solbes atribuem esses resultados a formas pouco apropriadas de se apresentar a física moderna aos estudantes, e enfatizam que isso produz uma compreensão errônea tanto da física moderna quanto da física clássica, por não esclarecer os limites de validade da última e as diferenças entre os paradigmas envolvidos.

Neste artigo apresentamos uma sequência de ensino baseada na discussão dos limites de um paradigma clássico (toda matéria no Universo é composta de átomos), procurando deixar claro aos alunos o que este paradigma é capaz de explicar e onde ele falha. Nos pontos de crise torna-se clara a necessidade de reformulação das ideias

e conceitos antigos, e as teorias modernas ganham justificativas que podem ser entendidas e apreciadas pelos estudantes. Essa abordagem é, essencialmente, aquela defendida por Gil Pérez e Solbes. Ela permite que os alunos percebam a extensão das diferenças entre as ideias antigas e as novas, e porque as últimas têm vantagens sobre as primeiras. Isso lhes dá uma melhor compreensão não apenas dos novos conceitos; a própria física clássica fica melhor entendida, na medida em que seus limites são reconhecidos. Igualmente importante é o fato, já mencionado, desse enfoque facilitar a percepção dos alunos sobre a natureza da ciência e de como esta evolui.

Partindo do pressuposto que os estudantes já foram apresentados aos conceitos básicos da cinemática e da mecânica newtoniana (incluindo a teoria da gravitação), a sequência de ensino que propomos tem início com a apresentação da terceira lei de Kepler e sua representação por curvas de rotação. Após verificar o sucesso dessa lei na descrição das órbitas dos planetas do sistema solar e das luas de Júpiter, abordamos seu aparente fracasso quando se tenta explicar, a partir da matéria visível, as curvas de rotação medidas em galáxias. Discutimos então como a hipótese da matéria escura explica de forma simples a discrepância entre esses dados experimentais e a previsão kepleriana. Nas seções a seguir descreveremos essa sequência de ensino e sua aplicação em turmas do ensino médio.

3. A Terceira Lei de Kepler

Nossa discussão sobre a matéria escura tem início com a dedução e verificação empírica da terceira lei de Kepler, a “lei dos períodos”. A dedução é baseada em tópicos que já estão presentes no currículo de nível médio de ensino: movimento circular uniforme, mecânica newtoniana e lei da gravitação.

Vamos considerar um planeta de massa m em órbita circular em torno de uma estrela de massa M , como mostrado na Figura 1. Vamos supor que a massa da estrela seja muito grande ($M \gg m$), de modo que essa possa ser considerada fixa.

Usando a segunda lei de Newton para relacionar a força gravitacional à aceleração centrípeta do planeta,

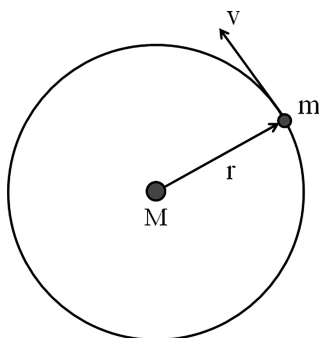


Figura 1: Planeta em órbita circular em torno de uma estrela.

obtemos que

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r}, \quad (1)$$

onde r é o raio da órbita, v é o módulo da velocidade do planeta e G a constante gravitacional. A equação (1) leva à relação entre a velocidade e o raio da órbita,

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

chamada de *curva de rotação* dos corpos que circulam 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 no ensino médio. No resultado encontrado nos livros-texto, o período da órbita, $T = 2\pi r/v$, é usado no lugar da velocidade v . Substituindo essa relação na equação (2) encontramos a terceira lei em sua forma familiar,

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

3.1. Curvas de rotação de planetas e luas

O Sol possui mais de 99% de toda a massa do sistema solar e em seu entorno encontram-se diversos corpos celestes. Consideraremos aqui apenas os planetas, que descrevem órbitas praticamente circulares. A distância ao Sol, velocidade e período de rotação desses planetas [11] estão listados na Tabela 1.

A Figura 2 compara os dados da Tabela 1 à previsão da terceira lei de Kepler, na forma da curva de rotação $v \times r$. Observamos que existe um acordo excelente entre os dados empíricos e a lei de Kepler.

Um teste semelhante pode ser feito para Júpiter, o planeta com maior número de luas do sistema solar. Nesse caso, Júpiter é o corpo massivo central, em torno do qual orbitam 80 satélites. Faremos para as luas de Júpiter a mesma análise realizada com os planetas do

Tabela 1: Dados orbitais dos planetas do sistema solar [11]. A distância média ao Sol é r e o período da órbita é T . A velocidade orbital média é calculada através de $v = 2\pi r/T$.

Planeta	r (10^9 km)	v (km/s)	T (anos)
Mercúrio	0,0579	47,86	0,24
Vênus	0,1082	35,02	0,62
Terra	0,1496	29,79	1
Marte	0,2279	24,12	1,88
Júpiter	0,7783	13,06	11,86
Saturno	1,427	9,65	29,42
Urano	2,870	6,80	84,01
Netuno	4,497	5,43	164,73

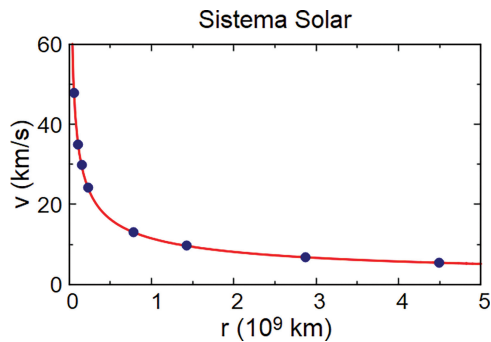


Figura 2: Curva de rotação para o sistema solar. Os pontos são os valores observados para os planetas e a linha representa a curva de rotação kepleriana, equação (2).

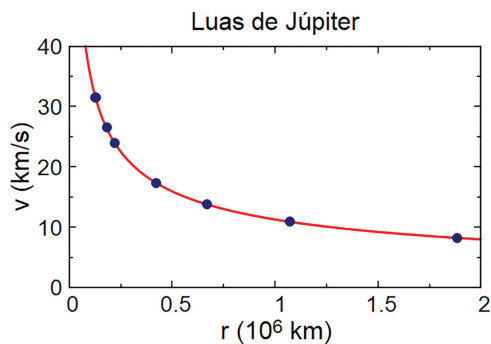


Figura 3: Curva de rotação para as luas de Júpiter. Os pontos são os valores observados e a linha representa a previsão kepleriana.

sistema solar, considerando apenas os satélites mais próximos. Os dados orbitais dessas luas de Júpiter podem ser obtidos em [12] e utilizados para construir uma tabela semelhante à já mostrada para os planetas. Com isso, novamente podemos comparar os resultados observacionais à curva de rotação prevista pela terceira lei de Kepler. O resultado está mostrado na Figura 3 e mais uma vez constatamos um excelente acordo entre os dados e a previsão kepleriana.

4. A Rotação de Galáxias

As estrelas não estão distribuídas uniformemente pelo Universo; elas se agrupam em galáxias, “ilhas de estrelas” contendo bilhões de sóis. As galáxias costumam ser classificadas em três tipos [1]: *galáxias espirais*, que têm a aparência de discos achatados com um bojo central; *galáxias elípticas*, que têm forma esferoidal, sem apresentar um disco; e *galáxias irregulares*, que não têm forma de disco nem são arredondadas. Nossa discussão terá foco nas galáxias espirais.

4.1. Curvas de rotação de galáxias

As galáxias não contêm apenas estrelas. Há também um *meio interestelar* composto de gás, essencialmente

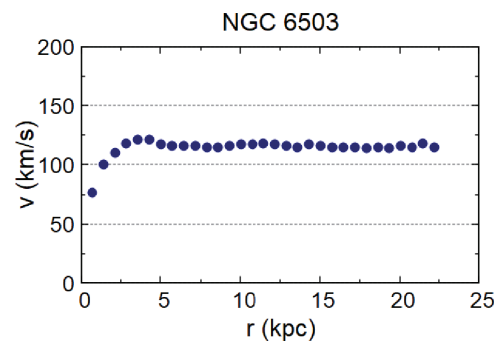


Figura 4: A galáxia NGC 6503 [14] e sua curva de rotação [13]. O raio do disco galáctico visível é de aproximadamente 5,3 kpc.

hidrogênio (atômico e molecular) e poeira. Tanto as estrelas quanto o gás e a poeira giram em torno do centro galáctico. No caso de galáxias espirais esse movimento é aproximadamente circular e podemos analisá-lo a partir de curvas de rotação como as que discutimos para o sistema solar e as luas de Júpiter. Em particular, é razoável esperar que a terceira lei de Kepler se aplique a estrelas e gás 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 e gases da periferia orbitariam essa 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.

Testes dessa ideia estão nas Figuras 4 e 5, que mostram as galáxias NGC 6503 e NGC 7331 com suas respectivas curvas de rotação [13]. As distâncias ao centro galáctico estão dadas em *quiloparsecs* (abreviado como *kpc*, aproximadamente 3300 anos-luz).

Os raios da NGC 6503 e NGC 7331 são, respectivamente, 5,3 kpc e 23,3 kpc [13]. Esse é o raio da região visível do disco, onde se concentram praticamente todas as estrelas da galáxia. É interessante notar que as curvas de rotação das Figuras 4 e 5 se estendem até distâncias bem maiores que o raio visível. Isso se deve ao fato dos pontos medidos corresponderem à velocidade orbital do hidrogênio atômico presente em forma gasosa nas galáxias. Esse hidrogênio emite ondas de rádio (com comprimento de onda de 21 cm) que podem ser detectadas por radiotelescópios, mesmo quando têm origem nas regiões mais distantes da galáxia, de onde, pela escassez de estrelas, praticamente não sai luz visível.

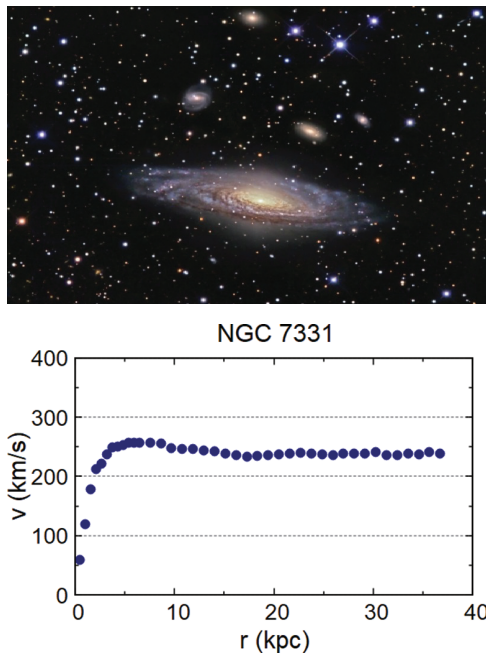


Figura 5: A galáxia NGC 7331 [15] e sua curva de rotação [13]. O raio do disco galáctico visível é de aproximadamente 23,3 kpc.

É evidente nas Figuras 4 e 5 que as curvas de rotação apresentam comportamento muito diverso daquele previsto pela terceira lei de Kepler, $v \propto 1/\sqrt{r}$. Duas diferenças podem ser ressaltadas:

1. Próximo ao centro da galáxia, a velocidade orbital aumenta com a distância.
2. Para distâncias maiores, muito além da região visível, a velocidade permanece praticamente constante.

Discrepâncias desse tipo não são encontradas apenas na NGC 6503 e NGC 7331; muitas outras galáxias espirais apresentam curvas de rotação com características semelhantes. Como veremos logo a seguir, o comportamento da velocidade a pequenas distâncias pode ser facilmente explicado pelo tamanho finito das galáxias. Já a uniformidade da velocidade a grandes distâncias é mais difícil de entender e, como será discutido na seção 5, a explicação nos levará à matéria escura.

4.2. Efeito do tamanho da galáxia

Quando aplicamos a terceira lei de Kepler ao sistema solar ou aos satélites de Júpiter, não faria sentido considerar planetas no interior do Sol ou luas dentro de Júpiter. Por isso tratamos o Sol e Júpiter como se fossem objetos pontuais, com a mesma massa do corpo original. Essa redução é possível porque, como sabemos da teoria de Newton, o campo gravitacional no exterior de um corpo esférico não é alterado se imaginarmos que toda a massa está concentrada no seu centro.

No caso de uma galáxia a situação é bem diferente, pois estamos considerando o movimento de estrelas

e gases em seu interior. Para compreender como a extensão da galáxia afeta a curva de rotação, vamos começar supondo que a maior parte de sua massa esteja uniformemente distribuída no interior de uma esfera de raio R . É importante ressaltar que essa é uma descrição extremamente simplificada da distribuição de massa em uma galáxia espiral. Embora o bojo central dessas galáxias seja aproximadamente esférico, uma parcela não desprezível da massa está no disco e portanto não apresenta simetria esférica. Mesmo com essa limitação, veremos que a simplificação nos permitirá compreender qualitativamente o crescimento da velocidade orbital na região central da galáxia.

Vamos calcular a velocidade de uma órbita no interior dessa esfera. É um resultado conhecido da teoria da gravitação de Newton que a força gravitacional a uma distância $r < R$ do centro é independente das camadas mais externas, sendo produzida apenas pela massa $M(r)$ contida numa região esférica de raio r concêntrica com a esfera de raio R [16, 17]. Com isso, a equação (1) pode ser generalizada para órbitas dentro da esfera, tornando-se

$$\frac{GM(r)}{r^2} = \frac{v^2}{r}, \tag{4}$$

que leva à curva de rotação

$$v = \sqrt{\frac{GM(r)}{r}}. \tag{5}$$

Para uma distribuição de massa homogênea no interior da esfera, é fácil ver que, com $r < R$,

$$M(r) = \frac{M}{R^3} r^3, \tag{6}$$

onde M é a massa total. Nesse caso a curva de rotação é

$$v = \sqrt{\frac{GM}{R^3}} r, \tag{7}$$

ou seja, próximo ao centro da galáxia ($r < R$) a velocidade deve aumentar à medida que o raio da órbita aumenta. Esse comportamento, que destoa da terceira lei de Kepler, é qualitativamente semelhante ao encontrado para pequenos raios em curvas de rotação como as mostradas nas Figuras 4 e 5. Para órbitas com $r > R$ o aumento é revertido e a velocidade deve diminuir à medida que r cresce, pois $M(r) = M$ e a curva de rotação será a prevista pela terceira lei de Kepler, dada pela equação (2).

Um modelo mais realista da distribuição de massa em uma galáxia espiral deveria levar em conta que esta não é nem esférica nem tem densidade uniforme. Sua forma é a de um disco achatado, cuja densidade diminui à medida que nos afastamos do centro. Supondo que o disco tem espessura zero e simetria azimutal, uma distribuição superficial de massa com essas características é dada pela função [18]

$$\sigma(r) = \frac{M}{2\pi} \frac{R}{(r^2 + R^2)^{3/2}}, \tag{8}$$

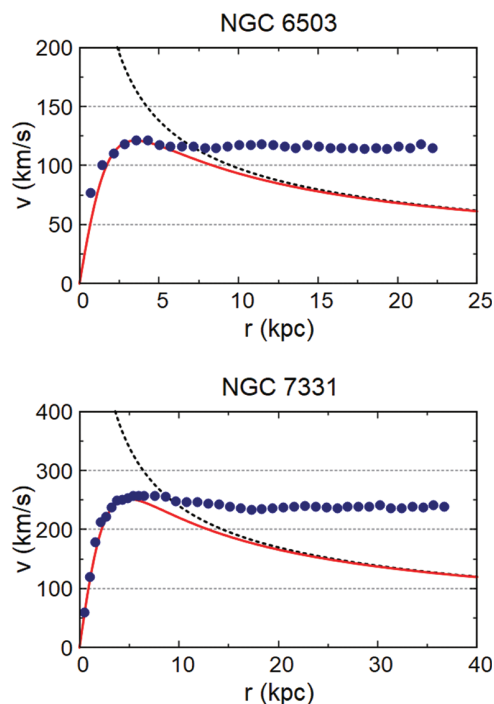


Figura 6: Curvas de rotação para as galáxias NGC 6503 e NGC 7331. As linhas contínuas representam o modelo de Kuzmin, dado pela eq. (10). As linhas tracejadas mostram o limite kepleriano, a eq. (11).

onde $\sigma(r)$ é a massa por unidade de área a uma distância r do centro do disco, M é a massa da galáxia e R determina a escala de tamanho do disco. A densidade (8) é conhecida como modelo de Kuzmin.² No plano da galáxia, o campo gravitacional associado a essa distribuição de massa aponta para o centro do disco e seu módulo é $GMr/(r^2 + R^2)^{3/2}$ (uma demonstração disso está em [18]). Para uma órbita circular nesse campo temos, então, que

$$\frac{GMr}{(r^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{v^2}{r}, \quad (9)$$

de modo que a curva de rotação prevista pelo modelo de Kuzmin é

$$v = \frac{\sqrt{GM} r}{(r^2 + R^2)^{3/4}}. \quad (10)$$

Como esperado, a grandes distâncias essa curva de rotação tende ao resultado kepleriano,

$$v(r) \xrightarrow{r \gg R} \sqrt{\frac{GM}{r}}. \quad (11)$$

Próximo ao centro da galáxia, o modelo apresenta o mesmo comportamento que já havíamos encontrado no

² Esse é apenas um – o mais simples – de muitos modelos para a distribuição de massa em uma galáxia. Modelos mais elaborados são descritos em [18].

caso da esfera homogênea,

$$v(r) \xrightarrow{r \ll R} \sqrt{\frac{GM}{R^3}} r. \quad (12)$$

Para distâncias intermediárias o modelo de Kuzmin produz uma curva de rotação que conecta suavemente os limites dados pelas equações (11) e (12).

Gráficos da curva de rotação (10) estão na Figura 6, calculados para as mesmas galáxias discutidas anteriormente. A massa M e o raio R foram ajustados para que o máximo da curva teórica coincidissem com o ponto de maior velocidade dos resultados experimentais. O limite kepleriano (11) está representado pelas linhas tracejadas. Vemos que a concordância entre o cálculo e os dados é boa na região central da galáxia. Para a região mais distante do centro, entretanto, a diminuição da velocidade prevista pela terceira lei de Kepler (e pelo modelo de Kuzmin) contrasta radicalmente com o valor praticamente constante apresentado pelos dados. Na próxima seção veremos como isso nos leva à ideia de matéria escura.

5. Matéria Escura

Vimos na seção anterior que as curvas de rotação de galáxias apresentam um comportamento diferente daquele previsto pela terceira lei de Kepler. As estrelas e o gás que estão na periferia das galáxias têm velocidade orbital praticamente independente da distância ao centro galáctico, enquanto a terceira lei prevê que a velocidade deveria diminuir com o aumento da distância. Como mostrado na Figura 6, o desacordo permanece mesmo após a introdução na lei de Kepler de correções para levar em conta que a galáxia não é um objeto pontual.

Uma forma de compreender esse desacordo é supor que nas galáxias existe muito mais matéria que aquela visível aos telescópios. Se essa “matéria escura” se estender para muito além dos limites visíveis da galáxia, a atração gravitacional extra produzida por ela seria a causa das altas velocidades orbitais observadas a grandes distâncias do centro galáctico.

Para analisar essa possibilidade, vamos imaginar que a distribuição da matéria escura em uma galáxia tenha simetria esférica. Nesse caso, já vimos que a velocidade orbital está relacionada à “massa acumulada” $M(r)$ – a massa no interior de uma esfera de raio r concêntrica à galáxia – que pode ser calculada a partir da equação (4):

$$M(r) = \frac{rv(r)^2}{G}. \quad (13)$$

Com essa relação é possível estimar a massa $M(r)$ a partir das curvas de rotação observadas experimentalmente. O resultado para as galáxias NGC 6503 e NGC 7331, cujas curvas de rotação discutimos anteriormente, está na Figura 7. Vemos que, nas duas galáxias

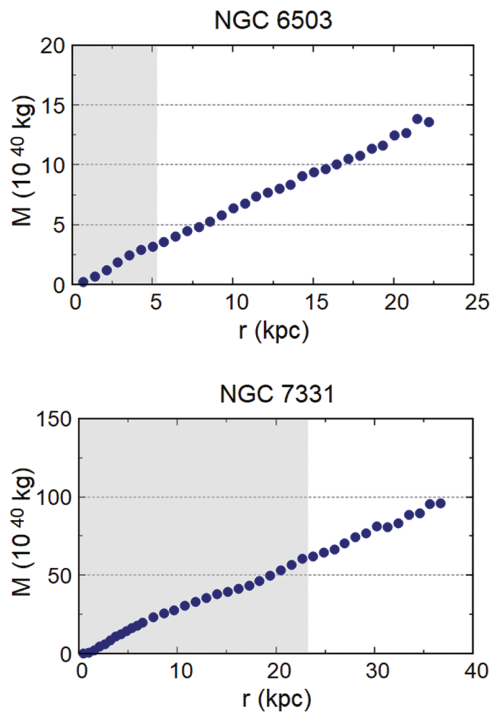


Figura 7: Massa $M(r)$ em um volume de raio r nas galáxias NGC 6503 e NGC 7331, obtidas com a eq. (13) a partir das curvas de rotação medidas. A faixa sombreada identifica a parte oticamente visível de cada galáxia, onde estão praticamente todas as estrelas.

consideradas, a massa encerrada numa esfera de raio r aumenta proporcionalmente a esse raio. A região de matéria luminosa em cada galáxia está marcada por uma faixa sombreada. É fácil ver que a maior parte da massa da galáxia está distribuída em uma região que vai bem além da parte visível. A matéria associada a essa enorme quantidade de massa não pode ser vista e por isso é chamada de *matéria escura*. Ela não emite ou absorve qualquer tipo de radiação eletromagnética mas é capaz de interagir gravitacionalmente, alterando as curvas de rotação.

As massas encontradas a partir das curvas de rotação dessas galáxias são muito maiores que as massas estimada pelo brilho das estrelas e do gás interestelar. O brilho por unidade de massa de uma galáxia típica é da ordem de 0,3 vezes o brilho por unidade de massa do Sol [19, p. 127]. Como sabemos que a massa do Sol é $M_{Sol} = 2,0 \times 10^{30}$ kg, conhecendo o brilho de uma galáxia podemos estimar sua massa visível. As massas das galáxias da Figura 7, obtidas a partir de seu brilho, são $M_{6503} = 2,1 \times 10^{40}$ kg e $M_{7331} = 31 \times 10^{40}$ kg[13]. Vemos que todos esses resultados são muito inferiores aos valores máximos encontrados na Figura 7. A massa total encontrada a partir das curvas de rotação é cerca de 7 vezes maior que a massa visível no caso da NGC 6503 e 4 vezes maior para a NGC 7331.

Nossa imagem da distribuição de massa em uma galáxia espiral fica profundamente alterada por esses



Figura 8: Halo de matéria escura de uma galáxia.

resultados. Além do disco e bojo que concentram a matéria luminosa, parece haver também um enorme halo de matéria escura que envolve as regiões visíveis e se estende a grandes distâncias, como ilustrado na Figura 8. A maior parte da massa da galáxia está nesse halo e não é detetável por telescópios operando em qualquer faixa do espectro eletromagnético. É por isso que as curvas de rotação não seguem a terceira lei de Kepler, mesmo na periferia da parte visível da galáxia. A galáxia não termina ali! Há uma grande massa de matéria escura que se estende para muito além, de modo que os emissores de luz da galáxia ainda estão no interior do objeto que orbitam e, portanto, não têm que obedecer à lei de Kepler.

Embora a matéria escura seja a explicação mais aceita para o comportamento das curvas de rotação de galáxias, é importante assinalar que hipóteses alternativas têm sido propostas. Uma delas, a “dinâmica newtoniana modificada” [20], conhecida como MOND (do inglês *modified Newtonian dynamics*), descreve extremamente bem as curvas de rotação e outras observações astronômicas. Infelizmente não temos espaço para discutir aqui essa proposta, que fornece um ótimo exemplo como a diversidade de modelos faz parte do processo evolutivo da ciência. Apresentações didáticas da MOND, como as encontradas em [4, sec. 5.2] e [21], são um complemento proveitoso ao que apresentamos neste artigo.

6. Aplicação no Ensino Médio

A abordagem da matéria escura descrita neste artigo foi aplicada diversas vezes no ensino médio, em escolas das redes privada e pública. Algumas dessas aplicações ocorreram durante a fase mais aguda da pandemia de Covid-19 e foram realizadas em formato remoto. As aulas seguiram a sequência detalhada no artigo e tiveram em média duração de 50 minutos. De maneira geral, durante as aulas os alunos demonstraram interesse pelo tema e manifestaram surpresa com o que as curvas de rotação das galáxias mostravam.

Após a aula os alunos comentaram por escrito suas impressões a respeito do conteúdo apresentado. Sobre se havia compreendido os fatores que indicam a presença da matéria escura, um aluno respondeu:

“Sim. Estrelas e galáxias se movimentando rápido demais em proporção à sua massa [...], o que indica que há matéria que não conseguimos detectar, denominada matéria escura.”

A aula incluía, ao final, imagens de lentes gravitacionais que fornecem evidências adicionais sobre a matéria escura. Curiosamente, de todas as evidências apresentadas na aula essa foi a mais lembrada pelos alunos em seus comentários, talvez pela beleza das imagens, embora, nas palavras deles, fosse a mais difícil de se entender. Quanto à inclusão de tópicos atuais nas aulas de física, um aluno escreveu:

“Acho importante, porque a convivência com dilemas atuais da ciência estimula os alunos a se voltarem para ela, com a vontade de entender melhor o que ainda não sabemos. Muitos alunos sentem que não tem mais o que contribuir para a ciência, ou que a inserção dele nesse contexto não fará diferença, e ensinar temas atuais nos mostrou como ainda não sabemos muita coisa. Estimula a humildade e o ceticismo. Todo mundo ganha.”

Por fim, em todos os comentários foi possível identificar um sentimento comum nos alunos: motivação para saber mais sobre a matéria escura e outros conceitos trazidos pela física contemporânea.

7. Comentários Finais

Como vimos neste artigo, é possível apresentar evidências sobre a existência da matéria escura a alunos de cursos introdutórios de física. Em particular, as curvas de rotação de galáxias, um dos indícios mais sólidos e antigos da matéria escura, podem ser discutidas a partir de conceitos familiares a estudantes e professores do ensino médio, como a dinâmica do movimento circular, a terceira lei de Kepler e a gravitação newtoniana. A experiência adquirida no desenvolvimento e aplicação da sequência didática sobre a matéria escura mostrou que é fundamental, ao se abordar esse ou qualquer outro tópico da física moderna no ensino médio, ter em mente duas concepções importantes e relacionadas entre si:

- Não basta apresentar as novas ideias trazidas pela física moderna; é essencial discutir com os estudantes as razões pelas quais acreditamos nessas ideias.
- Tópicos de física moderna devem ser tratados em conexão com os temas de física clássica tradicionalmente abordados nos currículos. As novas

ideias não devem ser apresentadas como um corpo estranho, cuja relação com as antigas teorias não é clara e às vezes sequer é exposta.

Tomando os devidos cuidados para que essas características sejam observadas, tópicos de física atuais podem ser um bom objeto de trabalho no ensino médio, seja por ampliar a visão de mundo dos estudantes, por tornar as aulas mais interessantes, ou por apresentar a ciência que está sendo feita hoje, com questões que ainda não estão completamente compreendidas. Isso ajuda a fazer da escola um espaço gerador de perguntas, não apenas um repositório de respostas.

Referências

- [1] J.O. Bennett, M. Donahue, N.O. Schneider e M. Voit, *The Essential Cosmic Perspective* (Benjamin Cummings, Londres, 2010).
- [2] V.C. Rubin e W.K. Ford Jr., *The Astrophysical Journal* **159**, 379 (1970).
- [3] V.C. Rubin, W.K. Ford e N. Thonnard, *Astrophysical Journal* **238**, 471 (1980).
- [4] S.J.C. Ximenes, *A matéria escura no ensino médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (2016).
- [5] A.B. Arons, *American Journal of Physics* **57**, 681 (1989).
- [6] E. Merzbacher, *American Journal of Physics* **58**, 717 (1990).
- [7] F. Ostermann e M.A. Moreira, *Investigações em Ensino de Ciências* **5**, 23 (2000).
- [8] J. Barojas, *Cooperative networks in physics education* (American Institute of Physics, Maryland, 1988).
- [9] A.B. Arons, *Teaching Introductory Physics* (Wiley, Nova Jersey, 1997).
- [10] D. Gil Pérez e J. Solbes, *International Journal of Science Education* **15**, 255 (1993).
- [11] <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/>
- [12] http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/jovian_satisfact.html
- [13] K. Begeman, *HI rotation curves of spiral galaxies*. Tese de Doutorado, Universidade de Groningen, Groninga (2006).
- [14] <https://esahubble.org/images/heic1513a/>
- [15] <http://apod.nasa.gov/apod/ap140301.html>
- [16] P.G. Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2002).
- [17] H.M. Nussenzweig, *Curso de Física Básica I – Mecânica* (Blücher, São Paulo, 2013).
- [18] J. Binney e S. Tremaine, *Galactic Dynamics* (Princeton U.P., Nova Jersey, 2008).
- [19] B. Ryden, *Introduction to Cosmology* (Addison-Wesley, Londres, 2002).
- [20] M. Milgrom, *Astrophysical Journal* **270**, 365 (1983).
- [21] R.H. Sanders, *The Dark Matter Problem – A Historical Perspective* (Cambridge U. P., Cambridge, 2010).