



Curvas
de rotação
e matéria
escura

INTRODUÇÃO

A

natureza da matéria escura é uma das questões mais discutidas por astrônomos e cosmólogos nas últimas duas décadas. A quase totalidade dos astrônomos menciona essa matéria como se sua existência fosse perfeitamente estabelecida, tanto do ponto de vista teórico quanto observacional. Quem expressa um pouco de dúvida é considerado tão retrógrado quanto aqueles que na década de 60 ainda resistiam a acreditar na expansão do universo. No entanto, as dúvidas são geradoras de mais pesquisas e de progresso, e vamos examinar aqui por que elas existem.

Lembremos rapidamente as razões teóricas para a existência de material escuro. De acordo com a teoria da relatividade geral, se a constante cosmológica Λ (introduzida por Einstein) for nula, o universo pode ser aberto, plano ou fechado, dependendo do parâmetro Ω , que representa a densidade de matéria (quantidade de matéria por unidade de volume no universo). Esse parâmetro é normalizado em relação à densidade crítica, aquela que corresponde a um universo plano, tomada como $\Omega = 1$. Se a densidade for maior do que 1, a expansão do universo será freada, e passará a haver no futuro uma contração e colapso do universo; se a densidade for inferior a 1, a expansão continuará para sempre, e, se for igual a 1, a expansão tenderá a uma velocidade nula, num tempo infinito.

Por uma questão de elegância da teoria, os teóricos gostariam que a densidade do universo fosse $\Omega = 1$. Basi-

JACQUES LÉPINE
é professor do IAG-USP.

camente, isto é uma previsão da teoria da inflação, e não pretendemos aqui entrar no mérito dessa teoria. As observações da distribuição espacial do fundo de radiação cosmológica, ao que tudo indica, são consistentes com as previsões da teoria da inflação. A quantidade de matéria “visível” que se consegue medir é da ordem de $\Lambda = 0,05$ apenas. Isso significa portanto que o resto, que é $0,95$, teria que ser constituído de matéria não visível. Ou seja, 95% da massa do universo seria matéria escura.

Nos últimos anos surgiu uma novidade que colocou em questão os modelos aceitos. Qualquer que seja o valor de Ω , os modelos acima prevêm que o universo deveria estar numa fase de deceleração. Observações recentes de supernovas situadas a *redshifts* elevados (Wang et al., 2003; Tonry et al., 2003) indicam que a expansão do universo é acelerada. Isso tem levado os cosmólogos a reintroduzir uma constante cosmológica Λ não nula, o que equivale a postular a existência de uma grande quantidade de “energia escura” que explicaria a aceleração. O mínimo que se pode pensar é que isso torna frágeis os argumentos em favor de $\Omega = 1$, que eram baseados na hipótese de Λ nula. Acredita-se hoje que o universo é constituído de 73% de energia escura, 23% de matéria escura e apenas 4% de matéria bariônica. Esses números são revisados com frequência (ver por exemplo: Wang et al., 2003).

Os argumentos observacionais em favor da existência de matéria escura são basicamente as curvas de rotação de galáxias espirais e as massas de aglomerados de galáxias. Nos dois casos o argumento é que as velocidades observadas indicam a presença de massa maior do que a massa visível. No caso dos aglomerados de galáxias, é comum supor que as galáxias estejam “virializadas” para poder estimar a massa do aglomerado. Como essa hipótese não é nada óbvia, não se trata realmente de uma medida da massa. Já as curvas de rotação, que discutiremos com mais detalhe, têm sido consideradas como o argumento mais convincente. É importante ressaltar, no entanto, que as razões cosmológicas para a existência de matéria escura

não implicam que essa matéria deva estar concentrada em galáxias. A matéria escura poderia, por exemplo, estar distribuída uniformemente no espaço. Portanto, questionar se as curvas planas de rotação são devidas à matéria escura não é necessariamente o mesmo que questionar a existência de matéria escura.

CONSPIRAÇÃO CÓSMICA EM CURVAS DE ROTAÇÃO

Existe algo um pouco estranho, como uma conspiração cósmica, nas curvas de rotação de galáxias. Lembremos que, quando falamos de curva de rotação, estamos falando de galáxias espirais, que possuem uma fração importante de sua massa no disco. Nas partes mais internas, a curva é plana devido à contribuição da parte visível da matéria contida no disco. Na parte mais externa, a curva seria plana como resultado da distribuição de matéria escura. A maioria dos autores que produzem modelos de curva de rotação considera que a matéria escura tem uma distribuição esférica, semelhante ao halo. Consegue-se uma curva plana com uma lei de densidade do tipo $\rho \sim r^{-2}$ (ver Binney & Tremaine, 1987, eq. 2-45). Portanto, uma parte da curva é explicada por matéria visível distribuída num disco, e outra, em raios maiores, seria por matéria escura com distribuição esférica. Por que estes dois patamares de velocidade constante ocorrem na mesma velocidade de rotação, se têm causas diferentes e geometrias diferentes? Este é o sentido da “conspiração”. Deveríamos ter curvas de rotação com dois patamares.

AVALIANDO A CONTRIBUIÇÃO DO HIDROGÊNIO

Por outro lado, se conseguirmos medir a curva de rotação a grande distância do cen-

tro, é porque ainda existe matéria “visível”, por exemplo, hidrogênio neutro (HI), emitindo na linha de 21 cm. Os mapeamentos na linha de 21 cm do hidrogênio neutro (HI) de galáxias espirais geralmente mostram que a distribuição de HI se estende bastante além da parte visível, em média um raio um fator 1,8 maior (ver por exemplo: Swaters et al., 2002). Para sustentar a existência de matéria escura, é necessário provar que a quantidade de HI (incluindo o hélio) existente na periferia da galáxia, que é suficiente para ser detectada, não tem massa suficiente para explicar a curva de rotação. Note-se que, caso o hidrogênio fosse o responsável pela região plana externa das curvas de rotação, o problema da conspiração discutido acima seria facilmente resolvido. Estaríamos falando apenas de matéria concentrada no disco. Poderia ter havido no início da vida da galáxia uma única distribuição de matéria no disco; posteriormente, nas regiões internas, parte do gás teria se transformado em estrelas, mas a distribuição espacial em termos de massa teria continuado a mesma.

Os dados observacionais de HI consistem em espectros, ou gráficos da “temperatura de brilho” em função da frequência. Estimar, a partir dos espectros obtidos em 21 cm, a massa do hidrogênio existente nas partes externas de galáxias implica adotar algumas hipóteses como a de que o gás é opticamente fino, e supor que a temperatura do gás é da mesma ordem que se estima para as partes mais internas da galáxia, ou seja, cerca de 100 K. Alterando de forma perfeitamente razoável as hipóteses sobre a espessura óptica e sobre a temperatura, que provavelmente é menor nas regiões distantes, é possível variar consideravelmente a quantidade de HI necessária para explicar os espectros (tese de Eraldo M. Rangel, sob orientação de Roberto Ortiz, Ufes).

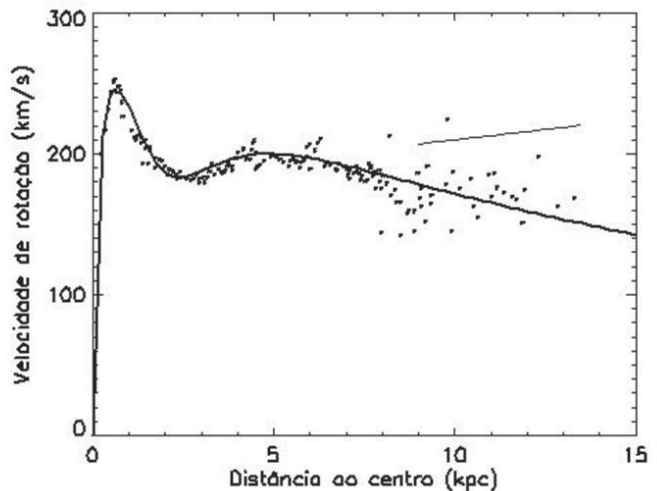
Uma outra hipótese que existe na literatura é que o hidrogênio das partes externas das galáxias se encontra na forma molecular (H_2). Essa molécula não possui dipolo elétrico, e não emite na região rádio do espectro. Para emitir no infravermelho, requer

temperatura de excitação relativamente alta. Para todos os efeitos, não seria detectável em baixas temperaturas, mas não deixaria de ser matéria bariônica.. Françoise Combes (Combes & Pfenniger, 1997) tem argumentado em favor dessa possibilidade.

A CURVA DE ROTAÇÃO DE NOSSA GALÁXIA CRESCE NAS REGIÕES EXTERNAS?

A curva de rotação de nossa galáxia é até mais difícil de se obter que a de galáxias externas, e mais incerta, pelo fato de estarmos tentando medi-la a partir de um ponto que se encontra ele mesmo em rotação. Apesar disso, é importante analisar todos os detalhes dessa curva, porque em nossa galáxia temos uma avaliação precisa da quantidade de matéria “visível”, e temos condições de quantificar a necessidade de matéria escura.

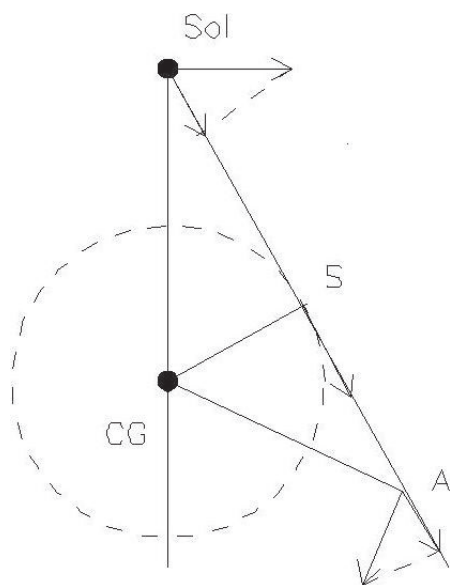
Figura 1



Curva de rotação da galáxia baseada nos dados de Clemens (1985), reinterpretados para $R_0 = 7,5$ kpc. O traço fino indica aproximadamente qual seria a tendência da curva de Brand e Blitz discutida no texto.

Supondo que o raio R_0 da órbita solar em torno do centro galáctico seja 7,5 kpc, um valor bastante aceito hoje, a curva de rotação até esse raio pode ser obtida de observações radioastronômicas do gás, por exemplo, a linha de CO em 115 GHz ou a de H em 21 cm. A particularidade do gás é que não sabemos sua distância, como acontece com estrelas; só sabemos a sua velocidade. Mas a velocidade mais alta observada num espectro, obtido numa direção dentro do plano galáctico, corresponde a um raio galáctico bem definido: é a velocidade no ponto onde a linha de visada passa mais perto do centro, como ilustra a Figura 2 (ponto S na figura).

Figura 2



Velocidades observadas ao longo de uma linha que une o Sol a um ponto A qualquer dentro do plano galáctico. A posição do centro galáctico é indicada pelas letras CG. A velocidade observada é maior para o ponto S, porque nesse ponto a direção da velocidade coincide com a direção de observação. Ao contrário, para o ponto A, só observaremos uma fração da velocidade de rotação. O ângulo entre a linha de visada e a direção do centro é a longitude galáctica.

Dessa forma é possível associar a velocidade observada a um raio galáctico. Variando-se a longitude galáctica, constrói-se a curva, ponto a ponto. Essa maneira de se obter a curva de rotação só funciona para as partes internas. Para as regiões situadas a mais de 7,5 kpc do centro (longitudes galácticas maiores que 90°), não existe esse ponto S, e não é possível obter a curva de rotação a partir do gás. É por isso que os pontos parecem mais espalhados, para raios maiores que 7,5 kpc, na Figura 1. Para raios galácticos maiores que R_0 , utilizam-se objetos como regiões HII, cuja distância pode ser estimada devido à presença de estrelas excitadoras. Faz-se a hipótese de que o objeto se encontra numa órbita circular, e que a velocidade observada é a componente dessa velocidade orbital na direção da linha de visada.

Na década de 90, Blitz e Brand obtiveram de suas observações uma curva de rotação que difere bastante da curva da Figura 1, no sentido de que a curva cresce nas regiões externas, alcançando velocidades da ordem de 260 km/s para raios da ordem de 15 kpc. Esse resultado, para muitos, era mais uma prova da existência da matéria escura. No entanto, hoje não se acredita na curva ascendente de rotação de Blitz e Brand. Acontece que, para um mesmo conjunto de velocidades observadas, pode-se obter uma curva de rotação que cresce ou decresce nas regiões externas. O resultado depende da velocidade que se supõe para o Padrão Local de Repouso (LSR em inglês), que é a velocidade com a qual estamos girando em torno do centro galáctico (vetor indicado “Sol” na Figura 2). É fácil entender que, como as velocidades observadas são medidas com relação a nós (LSR), as velocidades absolutas de rotação aumentam ou diminuem com a velocidade adotada do LSR. O próprio artigo de Blitz e Brand alerta que, se a velocidade do LSR fosse de 180 km/s em vez de 220 km/s que eles adotaram, a curva de rotação decresceria. A velocidade de 180 km/s hoje parece ser a mais razoável. A curva deve ser ligeiramente decrescente ou, no máximo, plana.

HÁ NECESSIDADE DE MATÉRIA ESCURA EM NOSSA GALÁXIA?

Para responder a essa pergunta, é necessário conhecer exatamente a curva de rotação, e exatamente a distribuição de matéria conhecida. A avaliação da densidade de matéria passa pela contagem de estrelas. As estrelas de pequena massa só são detectadas quando estão muito próximas (até 30 pc, por exemplo). Com uma amostra de estrelas próximas, estuda-se a “função de massa” das estrelas. Por outro lado, por meio de estrelas mais brilhantes, ajustam-se os parâmetros que descrevem a geometria do disco. O disco galáctico pode ser descrito por uma lei exponencial de densidade decrescente com o raio galáctico, com escala de distância da ordem de 3 kpc, e por uma lei exponencial decrescente também em função da distância ao plano galáctico, com escala de espessura da ordem de 100 pc. Percebe-se que a diminuição da densidade de estrelas com a altura em relação ao plano galáctico, na realidade, é mais bem descrita por duas exponenciais do que por uma; por isso fala-se do disco fino e do disco espesso, que possuem composição distinta em termos de população estelar. Esses estudos são mais bem conduzidos usando contagens de estrelas no infravermelho, em parte porque a extinção da radiação pela poeira interestelar é menor, e em parte porque as estrelas frias ou estrelas com envelope de poeira só emitem no infravermelho e podem ser totalmente não-detectáveis, no visível.

As comparações dos modelos de contagem de estrelas com as observações podem ter duas abordagens distintas: ou se comparam diretamente as contagens de estrelas, ou o brilho médio do céu resultante da presença de uma grande densidade de estrelas. A vantagem de se trabalhar com o brilho é que ele inclui as estrelas fracas, que existem em grande número, mas que não são contabilizadas na contagem direta de estrelas porque estas estão individualmente abaixo do fluxo-limite de detecção.

Os dois métodos foram utilizados por nós (Ortiz & Lépine, 1993; Lépine & Leroy, 2000) com resultados que basicamente concordam. Somando-se a massa das estrelas que resultam desses modelos com a do gás interestelar, chega-se à densidade de matéria conhecida da ordem de 60 massas solares por pc² (densidade superficial do disco, na vizinhança solar), o que é suficiente para explicar a curva de rotação. Se quiséssemos colocar matéria escura, ela teria que ser limitada à barra de erro dos modelos, e certamente não poderia ser igual a várias vezes a matéria visível. Esse resultado, que vale para a vizinhança solar, deveria incomodar os defensores de uma distribuição esférica de matéria escura, cuja contribuição em princípio cresce lentamente até assumir a totalidade da responsabilidade pela curva de rotação. Por que em R₀ a contribuição da matéria escura ainda é desprezível?

QUAL A CAUSA DO MÍNIMO NA CURVA DE ROTAÇÃO EM 8,5 KPC?

Podemos notar um mínimo relativamente estreito na curva de rotação, a cerca de 8,5 kpc do centro. Esse mínimo aparece nos dados de Clemens, representados na Figura 1, e também nos de Blitz e Brand e de outros autores, sendo portanto real. Poderíamos ser tentados a interpretá-lo como sendo uma espécie de fronteira entre o local onde termina a contribuição da matéria visível à curva de rotação, o que causaria um decréscimo, e o início da região dominada pela matéria escura, o que causaria novo aumento. No entanto, esse mínimo é estreito demais (da ordem de 1 kpc) para que esta explicação seja razoável. Um decréscimo lento da contribuição da matéria visível, assim como um crescimento lento da contribuição da matéria escura, como seria esperado, só poderia produzir um mínimo bastante alargado. A explicação que temos para esse mínimo é outra; trata-se do raio galáctico onde ocorre a co-rotat-

ção, isto é, onde os braços espirais giram com a mesma velocidade que o gás da galáxia (dada pela curva de rotação). Por que esta circunstância pode produzir um mínimo na curva de rotação é uma questão que não deve ser discutida aqui, por ser irrelevante para o tema deste texto.

WARPS E OUTROS PROBLEMAS

Praticamente todas as galáxias espirais apresentam um *warp*, que é uma distorção do plano galáctico, parecida com a aba de um chapéu, normalmente dobrado para baixo na frente e para cima atrás. É como se o plano da galáxia fosse um outro, quando se consideram as regiões externas. Isso tem conseqüências na curva de rotação que não são normalmente levadas em conta.

Supondo que o eixo de rotação de uma galáxia e o plano do céu apresentem entre si um ângulo θ , a velocidade observada de rotação é a velocidade de rotação projetada na linha de visada, ou seja, a velocidade verdadeira multiplicada por $\cos(\theta)$. A velocidade de rotação é obtida dividindo a velocidade observada por $\cos(\theta)$. Por exemplo, para uma galáxia vista exatamente de frente, a rotação produz velocidade observável zero, já que o movimento é perpendicular à linha de visada. Ao contrário, para uma galáxia observada pela borda, a velocidade de aproximação de um lado e de afastamento do outro nos dá diretamente a rotação. O fator de correção para obter a velocidade de rotação – o inverso de $\cos(\theta)$ – pode ser grande.

Normalmente, o que é feito é determinar a inclinação da galáxia com relação ao céu, usando a parte visível da mesma, e partindo da hipótese (também um pouco questionável) de que, se ela fosse vista de frente, teria uma forma circular. Em seguida, supõe-se que esse ângulo θ assim determinado vale também para as partes externas da galáxia, e aplica-se o mesmo fator às observações de HI. Essa hipótese tem toda probabilidade de estar errada, já que uma porcentagem elevada das galáxias espirais

apresenta *warp*, que é justamente uma mudança na orientação do plano com a distância ao centro. Sergio Scarano Jr. mostrou, em sua tese de mestrado (IAG, 2003), que esse efeito não tende a produzir sistematicamente (ou estatisticamente) curvas planas. Mas, por outro lado, não autoriza que se deduza a quantidade de matéria escura quando a curva de rotação observada difere da esperada com base na quantidade de matéria visível. Alguns casos aparentemente bem estudados, com “muita” matéria escura, como por exemplo NGC 247 (Carignan & Puche, 1990), poderiam ser explicados por um *warp* tal que as partes externas apresentam uma inclinação com relação ao plano do céu que produz uma velocidade observada maior.

COLISÕES DE GALÁXIAS

A existência de halos escuros mais extensos do que as partes visíveis das galáxias poderia ter efeitos estranhos, no caso de colisão de galáxias. A matéria escura seria a primeira a colidir, e deveria ser deformada ou mesmo arrancada. Poderiam resultar concentrações de matéria escura separadas das galáxias visíveis, e posteriormente poderiam ocorrer colisões de galáxias visíveis com essas bolhas de matéria escura. Nada disso é observado. As simulações de colisões de galáxias que existiam antes do advento da hipótese de matéria escura, como aquelas que eram feitas por Toomre e Toomre, na década de 70, conseguiam explicar as observações de galáxias interagentes, de forma muito satisfatória.

CONCLUSÃO

A interpretação habitual de que as curvas de rotação planas refletem a presença de matéria escura é precipitada, embora não possa ser excluída. A cosmologia não impõe que a matéria escura, se existir, deva estar concentrada nas galáxias. Em muitos

casos, é possível explicar as curvas planas como sendo devidas à massa do hidrogênio que normalmente circunda as galáxias espirais, bastando para isso considerar profundidades ópticas maiores e temperaturas menores. O hidrogênio molecular não pode ser facilmente descartado. Nos casos em que a curva de rotação, em vez de ser plana, cresce para os raios galácticos externos, talvez a quantidade de hidrogênio neutro necessária para explicar a curva seja alta

demais. Mas nesses casos podemos imaginar outros efeitos indo na mesma direção, como um *warp*. Além destas explicações de natureza totalmente clássica, não podemos deixar de mencionar a existência de explicação para as curvas planas de galáxias, baseada numa teoria um pouco exótica que altera a lei da atração gravitacional (teoria de Mond – Modified Newtonian Dynamics; ver por exemplo Sanders & McGaugh, 2002).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BINNEY, J. & TREMAINE, S. *Galactic Dynamics*, Princeton series in Astrophysics (1987).
- BLITZ, L. & BRAND, J. *Astron. Astrophys.* 275, 67 (1993).
- CARIGNAN, C. & PUCHE, D. *Astron. J.* 100(3), 641 (1990).
- CLEMENS, D. P. *ApJ* 295, 422 (1985).
- COMBES, F. & PFENNIGER, D. *Astron. Astrophys.* 327, 453 (1997).
- LÉPINE, J. R. D. & LEROY, P. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 313, 263 (2000).
- ORTIZ, R. & LÉPINE, J. R. D. *Astron. Astrophys.* 279, 90 (1993).
- SANDERS, R. H. & MCGAUGH, S. S. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 40, 263 (2002).
- SWATERS, R. A.; VAN ALBADA, T. S.; VAN DER HULST, J. M. & SANCISI, R. *A&A* 390, 829 (2002).
- TONRY, J. L. et al. *ApJ* 594, 1 (2003).
- TOOMRE, A. & TOOMRE, J. *ApJ* 178, 623 (1972).
- WANG, L.; GOLDGHABER, G.; ALDERING, G. & PERLMUTTER, S. *ApJ* 590, 944 (2003).
- WANG, X. et al. *Phys. Rev. D*, vol 68, issue 12, id 123001 (2003).