

Gestações turbulentas

Simulações esclarecem como forças magnéticas complicam o nascimento de estrelas e planetas

Mal dá para reparar nas porções mais escuras da imagem da nebulosa Cabeça de Macaco (NGC 2174), distante 6.400 anos-luz da Terra. Ofuscada pelo brilho das estrelas jovens e das plumas de gás incandescente, essas áreas escuras abrigam algumas das muitas regiões de formação estelar de nossa galáxia. É precisamente nesses bolsões obscurecidos pela poeira do meio interestelar que muitos astrônomos estão interessados. É ali, nas chamadas nuvens moleculares, que o gás da nebulosa esfria o suficiente para desencadear um processo de gestação que, alguns milhões de anos depois, dará origem a novas estrelas.

Os telescópios atuais estão apenas começando a ter resolução suficiente para vislumbrar os detalhes desse processo, que envolve um cabo de guerra turbulento entre forças gravitacionais e magnéticas. De um lado, a gravidade tende a adensar o gás, o que permitirá que os átomos no centro das regiões mais densas da nuvem sejam comprimidos até liberarem energia por meio de reações de fusão nuclear, acendendo novas estrelas. De outro, os campos magnéticos da nuvem tendem a fazer força no sentido contrário ao da gravidade. Todo mundo sabe que a gravidade vence no final, mas ninguém entende muito bem os detalhes do conflito.

Para resolver esse problema, uma equipe liderada pela astrofísica Elisabete de Gouveia Dal Pino, da Universidade de São Paulo, e pelo astrofísico

Alexander Lazarian, da Universidade de Wisconsin, em Madison, Estados Unidos, vêm realizando simulações do comportamento do gás e dos campos magnéticos nas nuvens moleculares. Os resultados de suas simulações mais recentes resolvem contradições entre a teoria e o que já foi observado, dando apoio a uma nova ideia de como os campos magnéticos atrapalham, mas não chegam a impedir, o surgimento de novas estrelas. Essa mesma ideia pode explicar por que os discos de gás e poeira em torno de estrelas recém-nascidas – e que mais tarde podem originar um sistema de planetas – não desaparecem pela ação de campos magnéticos.

As nuvens moleculares são regiões muito pequenas e particulares do meio interestelar, que permeia as galáxias. Essas nuvens são bolsões de gás e poeira muito mais frios do que o meio interestelar em volta. Enquanto nas nuvens de gás interestelar a temperatura chega a milhares de graus Celsius, mantendo os elétrons separados dos núcleos atômicos e formando o plasma (gás eletricamente carregado), nas nuvens moleculares a temperatura média é da ordem de -173 graus Celsius. Por essa razão, as nuvens moleculares são compostas em sua maior parte de átomos neutros que se combinaram em moléculas – daí o nome molecular. Mas mesmo as nuvens moleculares abrigam uma pequena porção de plasma, suficiente para que linhas do campo magnético da nebulosa se liguem ao movimento do gás.



NEBULOSA

**Dezenas de anos-luz
de diâmetro**

NUVEM MOLECULAR

**Alguns anos-luz
de diâmetro**

DISCO DE ACREÇÃO

**Centenas de minutos-luz
de diâmetro**



Cabeça de Macaco (NGC 2174):
imagem obtida pelo telescópio
Hubble de nebulosa contendo
estrelas jovens (*pontos brilhantes*),
nuvens de plasma e nuvens
moleculares (*regiões escuras*)

Campos em guerra

Força magnética e gravitacional se contrapõem na formação de estrelas

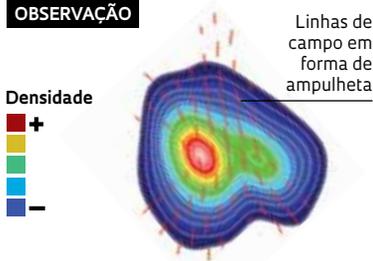
PROBLEMA



Porções mais densas de nuvens moleculares entram em colapso pela força gravitacional de sua própria massa

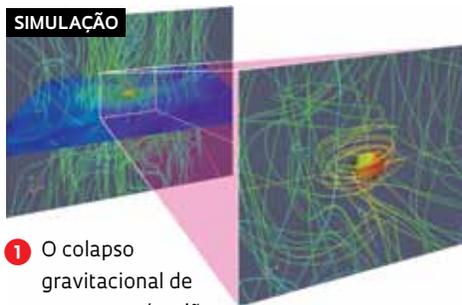
Sem levar em conta a turbulência, as linhas do campo magnético se concentrariam mais que o observado

OBSERVAÇÃO



Em 2006, astrônomos observaram um campo magnético em forma de ampulheta em torno de estrelas em formação

SIMULAÇÃO



1 O colapso gravitacional de um caroço (região central) sob a ação de campos magnéticos (linhas verdes)

2 A turbulência do gás transporta a maior das linhas de campo magnético para fora do caroço

FONTE J. GIRART (CSIC-IEEC), R. RAO (ASIAA) AND D. MARRONE (CFA) / LEÃO, M.R.M. ET AL. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 2013

“O plasma ali flui de maneira muito turbulenta”, diz o astrofísico Reinaldo Santos de Lima, que concluiu seu doutorado na USP sob supervisão de Elisabete e atualmente faz parte de seu pós-doutorado na Universidade de Wisconsin. Ele explica que o plasma da galáxia é constantemente remexido pelas ondas de choque de explosões de estrelas gigantes no fim de suas vidas, as supernovas. Uma das consequências dessa turbulência é que o movimento das cargas elétricas do plasma amplifica os campos magnéticos muito fracos que permeiam o espaço, originados no início do Universo. Esses campos mais intensos, de até 0,003 gauss (cem vezes menores que o da superfície da Terra), acabam afetando as nuvens moleculares.

COLARES MAGNÉTICOS

Para explicar o fenômeno em suas aulas, Elisabete usa uma analogia. As partículas do plasma estariam ligadas às linhas do

campo magnético como as contas de um colar estão presas ao seu cordão. “Se o gás se move para um lado, ele arrasta as linhas do campo consigo”, diz Lima. “Isso leva a um problema para a formação estelar.”

À medida que uma região mais densa – um caroço – dentro da nuvem se contrai pela atração gravitacional de sua própria massa, essa contração comprime as linhas do campo magnético. O resultado é um campo em forma de ampulheta (ver figura acima) que exerce uma força repulsiva, contra a gravitacional. Essa força, contudo, age apenas na direção perpendicular às linhas do campos magnético. Assim, a massa continua a se acumular no centro do caroço percorrendo os caminhos ao longo das linhas, até que a força gravitacional supera a magnética e a estrela se forma.

Imaginava-se que a nova estrela herdasse o campo magnético do caroço que a originou. Mas, ao observar estrelas recém-formadas, os astrônomos medem

um campo magnético em sua superfície 10 mil vezes menor que o esperado.

Essa discrepância entre a teoria e as observações sugere que algum fenômeno desconhecido desliga as linhas do campo magnético do movimento do gás durante a sua contração. Assim, as linhas não se comprimiriam tanto no centro dos caroços e a estrela resultante teria um campo magnético menor. O candidato favorito dos astrofísicos para explicar os campos magnéticos menos intensos era, até pouco tempo atrás, um fenômeno conhecido como difusão ambipolar. “Conforme a nuvem colapsa, o plasma perde calor por irradiação e seus elétrons se recombinam com seus núcleos atômicos”, explica Lima. “Esse material neutro continua a colapsar sem arrastar as linhas de campo.”

Estudos vêm confirmando, entretanto, que para a difusão ambipolar conseguir afastar as linhas de campo magnético do centro do caroço de maneira eficiente, o tamanho dos grãos de poeira formados nas nuvens moleculares precisaria ser diferente do estimado. O fenômeno também não explica a distribuição dos campos magnéticos medidos pelos astrônomos.

Em 2005, Lazarian propôs uma alternativa à difusão ambipolar, que tinha a vantagem de não depender do tamanho dos grãos das nuvens moleculares. Sua ideia se baseia no fenômeno da reconexão magnética. Ela acontece quando duas porções de plasma, cada uma carregando linhas de campo magnético em direções paralelas mas com sentidos opostos, são forçadas a colidir uma contra a outra. Num plasma turbulento, esse processo ocorre de modo rápido, como demonstraram Lazarian e Ethan Vishniac em 1999. Durante a colisão explosiva, as linhas de campo são recortadas e coladas em uma nova configuração de direção e sentido.

A reconexão magnética ocorre com bastante frequência e violência na superfície do Sol, ejetando massa solar para o espaço durante tempestades magnéticas na superfície da estrela. A reconexão explica outros processos astrofísicos, como a aceleração de raios cósmicos ultraenergéticos (ver Pesquisa FAPESP nº 200). Pensava-se, porém, que ela ocorresse raramente nas nuvens moleculares. Lazarian, no entanto, propôs que a turbulência do gás nas nuvens seria capaz de acelerar o processo.

Pequenos redemoinhos turbulentos criariam as condições para que a reco-

nexão magnética acontecesse por toda a nuvem. Em 2009, Lazarian e o astrofísico Grzegorz Kowal, atualmente na USP, realizaram simulações em computador demonstrando que a reconexão magnética induzida pela turbulência realmente funcionava. Usando a analogia de Elisabete, a turbulência do gás seria capaz de cortar e reconectar os cordões dos colares, libertando as contas e afastando o excesso de cordões para fora do centro dos caroços nas nuvens moleculares.

Quando passou uns meses em 2009 em Wisconsin, trabalhando com Lazarian, Lima usou o código computacional escrito por Kowal para criar um modelo simplificado do colapso de um caroço em uma nuvem molecular. As simulações, publicadas no *Astrophysical Journal* em 2010, indicaram que a turbulência do gás mantinha as linhas do campo magnético afastadas do caroço, permitindo o seu colapso por ação da gravidade.

Outra estudante de doutorado de Elisabete, Márcia Leão, atualmente pós-doutoranda na Unicamp, realizou simulações ainda mais realistas do processo. Em um artigo publicado em novembro de 2013 na revista *The Astrophysical Journal*, os pesquisadores compararam os resultados dessas simulações com observações de caroços em nuvens moleculares feitas pelo astrônomo Richard Crutcher, da Universidade de Illinois em Urbana-Champaign, Estados Unidos. As simulações de Márcia conseguiram explicar as distribuições de densidade do gás e de seu campo magnético medidas por Crutcher melhor do que seria esperado pela teoria da difusão ambipolar.

MANTENDO O GIRO

Milhões de anos após o início do colapso, o gás e a poeira do caroço da nuvem molecular, que antes ocupava um volume com alguns anos-luz de extensão, aca-

bam concentrados em um espaço mais ou menos do tamanho do sistema solar, com centenas de minutos-luz, formando uma estrela cercada por um disco de acreção, que pode gerar um sistema planetário (ver figura abaixo). Cálculos sugerem, porém, que o campo magnético da nuvem molecular impediria a formação desses discos. As linhas do campo freariam a rotação do material do disco, que acabaria caindo na protoestrela.

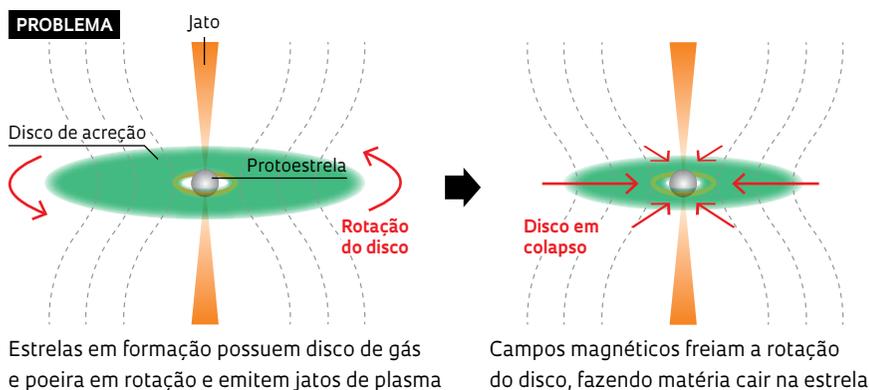
Simulações publicadas em 2012 e 2013 pela equipe de Elisabete sugerem que esse problema também é resolvido pela reconexão magnética induzida pela turbulência, que transporta o excesso de linhas magnéticas para fora do disco. A equipe espera publicar este ano um estudo com Gustavo Guerrero, da Universidade Federal de Minas Gerais, com valores mais precisos desse transporte magnético, para comparar melhor essa explicação com outras alternativas.

“As previsões teóricas estão mais adiantadas do que as observações”, comenta o astrônomo Gabriel Franco, da UFMG, que trabalha com dados sobre o campo magnético de uma nuvem molecular obtidos por um instrumento montado no telescópio Apex, no Chile. “Para se ter uma ideia, o campo em forma de ampolheta, previsto há décadas, foi observado pela primeira vez em 2006.”

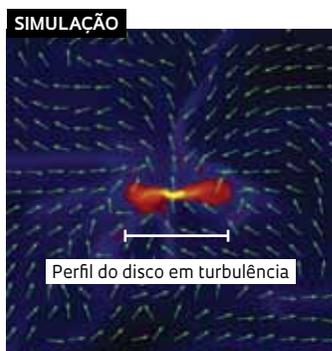
A antena do Apex é o protótipo das 66 antenas do observatório Alma, inaugurado em 2013, que também terá um instrumento capaz de medir campos magnéticos de caroços e protoestrelas. Mas, para observar todos os detalhes, Elisabete aguarda outra rede de radiotelescópios em construção na Argentina, a Llama. “É possível”, ela diz, “que consigamos testar nossas teorias com observações de altíssima resolução com a interferometria combinando antenas do Alma e Llama”. ■ Igor Zolnerkevic

Efeito protetor

Turbulência do gás evita colapso do disco de acreção



Jato e disco em torno da protoestrela HH-30, obtida pelo telescópio Hubble em 1995



Perfil do disco de acreção formado em simulação com reconexão magnética induzida pela turbulência do gás. A turbulência impediu o colapso do disco

Linhas de campo
 Densidade
 +
 -

Projeto

Investigation of high energy nvestigation of high energy and plasma astrophysics phenomena: theory, observation, and numerical simulations (nº 2006/50654-3); Modalidade Projeto Temático; Pesquisadora responsável Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino; Investimento R\$ 366.341,75 (FAPESP).

Artigos científicos

LEÃO, M.R.M. *et al.* The collapse of turbulent cores and reconnection diffusion. *The Astrophysical Journal*. v. 777, n.1. nov. 2013.
 SANTOS-LIMA, R. *et al.* Disc formation in turbulent cloud cores: is magnetic flux loss necessary to stop the magnetic braking catastrophe or not? *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. mar. 2013.