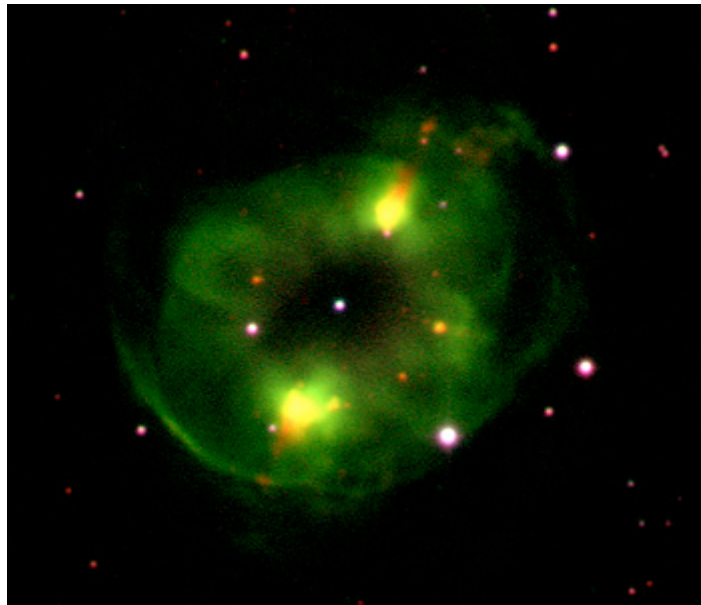


Nebulosas Planetárias: O Belo em Detalhe

Denise Rocha Gonçalves (Departamento de Astronomia - IAG/USP)
email: denise@astro.iag.usp.br



Nebulosa Planetária Wray 17-1. Crédito: adaptada de Corradi et al. (2000)

Foi num artigo publicado em 1785, por Willian Herschel, autor de famosos catálogos de nebulosas planetárias e aglomerados estelares, que as nebulosas planetárias foram assim classificadas pela primeira vez. O nome surgiu porque o seu aspecto recordava os discos esverdeados de alguns planetas e por apresentarem características observacionais distintas dos demais objectos que estudava. Porém, estas não são, em absoluto, planetas nem mesmo nebulosas jovens em processo de condensação para a formação de novas estrelas...

Hoje em dia sabemos que estrelas do tipo solar, no final de suas vidas, desprendem suas camadas mais externas que, pouco a pouco, expandem-se e diluem-se até confundirem-se com o meio interestelar, enquanto o resto da estrela segue a sua evolução até se transformar numa anã branca, ou seja num "cadáver estelar". Enfim, apesar do nome que recebem, nebulosas planetárias representam a última fase da evolução da maioria das estrelas —e também do Sol, dentro de 4.500 milhões de anos.

Ao longo do desenvolvimento deste tema vamos tratar, em cinco capítulos, os seguintes assuntos:

- O que são, como são e porque têm este nome
- Ventos estelares
- Das macro às micro estruturas

- Jatos e outras micro estruturas
- Resultados mais recentes

1. O que são, como são e porque têm este nome

Uma nebulosa planetária compõe-se de gás e poeira, os quais circundam uma estrela do tipo solar quando esta se encontra nas fases finais de sua evolução. Esta estrela, a estrela central da nebulosa planetária, ilumina a nebulosidade ao seu redor, que por sua vez é observada em todas as zonas do espectro eletromagnético, de rádio até raios-X. Comparadas com as estrelas, que emitem numa banda de luz contínua (luz branca), as nebulosas planetárias emitem sua luz em bandas muito mais estreitas, ou seja, em linhas de emissão (luz discreta com diferentes cores). Devido a esta característica as nebulosas planetárias são facilmente identificadas no céu quando se utiliza um telescópio contendo um prisma, sendo visualizadas como um verdadeiro caleidoscópio. As nebulosas planetárias são "intrinsecamente" tão belas, que as suas imagens observadas com o Hubble Space Telescope estão entre as imagens astronômicas mais conhecidas pelo público não especializado.



Figura 1: M27, a Dumbbell Nebula (Nebulosa dos Halteres). Em termos do tamanho projetado no céu, é a maior das nebulosas planetárias, medindo 16 minutos de arco. A cor verde representa a linha de emissão de átomos de oxigênio duas vezes ionizado ($O^{++} = [OIII]$) e o vermelho indica aquela dos átomos de nitrogênio uma vez ionizado ($N^+ = [NII]$) e do hidrogênio ($H\alpha$). Esta imagem foi obtida com o telescópio de 0.82m IAC80 (situado no Observatório del Teide). Crédito: The IAC Morphological Catalog of Northern Galactic Planetary Nebulae (Manchado et al. 1996).

Data de 1764 a primeira vez que observou-se uma nebulosa planetária. O observador, Charles Messier, encontrou um objecto nebuloso que catalogou como M27, hoje

conhecido como Dumbbell Nebula (Nebulosa dos Halteres, Figura 1). Esta observação foi seguida por aquela da Nebulosa do Anel (M57, Figura 2), em 1779, por Antoine Darquier. Este último descreveu a Nebulosa do Anel como "pouco brilhante, mas com contornos bem definidos... é tão grande quanto Júpiter, parecendo-se com um planeta tênue". O termo "nebulosas planetárias" (NPs) foi-lhes atribuído por William Herschel, dadas suas similaridades com os discos esverdeados de planetas como Urânio e Netuno, assim separando-as das nebulosas brancas formadas por estrelas, ou seja, das galáxias.



Figura 2: A Ring Nebula (Nebulosa do Anel, M57), um dos objetos celestes mais fotografados. Suas cascas mais externas definem um tamanho de 3,8 minutos de arco (aqui o azul representa a linha de emissão [OIII] e o vermelho [NII]+H α). Imagem obtida com o telescópio de 2.56m NOT (situado no Observatorio del Roque de los Muchachos). Crédito: The IAC Morphological Catalog of Northern Galactic Planetary Nebulae (Manchado et al. 1996).

Em suma, quando observa-se uma NP com baixa resolução espacial, esta parece redonda e poderia assemelhar-se a um planeta, daí este nome tão equivocado. Por outro lado, quando observada com grande resolução espacial, vê-se claramente que estas constituem-se por muitas estruturas com formas variadas. Estas estruturas (tanto de grande quanto de pequena escala) são o foco do estudo que faremos sobre nebulosas planetárias.

Mas, o que são estas estruturas? A Nebulosa do Olho de Gato, por exemplo, situada na constelação do Dragão, compõe-se de uma grande variedade de estruturas simétricas, as quais incluem: um halo filamentoso extenso; vários anéis concêntricos; um par de jatos e um complexo conjunto de cascas no seu núcleo (NGC 6543, Figura 3).

Em particular, e para que comecemos a ter em mente algumas das características destas nebulosas, o conjunto de cascas nebulares no coração de NGC 6543 tem uns 1.000 anos de idade. Contornando este núcleo encontram-se uma série de anéis concêntricos (em azul); cada um destes anéis está no limite de uma bolha de gás, em expansão, ejetada pela estrela central em intervalos regulares de uns 1.500 anos, sendo que o primeiro ocorreu há uns 18.000 anos atrás. Os filamentos mais externos (verdes) datam, no máximo, de uns 60.000 anos. Acredita-se que a massa do material estelar desta nebulosa deve ser similar à massa do Sol.

Apesar do fato de que especialistas têm dedicado muita atenção às nebulosas

planetárias, e também às suas múltiplas estruturas, a complexidade dos detalhes que encontramos nestes objectos continua surpreendendo. Por exemplo, no caso de NGC 6543, que informação podemos obter dos filamentos externos? Depois de expulsar séries de bolhas de gás, de forma concêntrica, que efeitos provocaram a ejeção do conjunto de cascas do coração da nebulosa? Qual é o mecanismo responsável pelos misteriosos jatos que parecem sair dos dois extremos dos arcos elípticos (amarelo brilhante) que rodeiam as cascas (vermelhas) no núcleo da nebulosa?

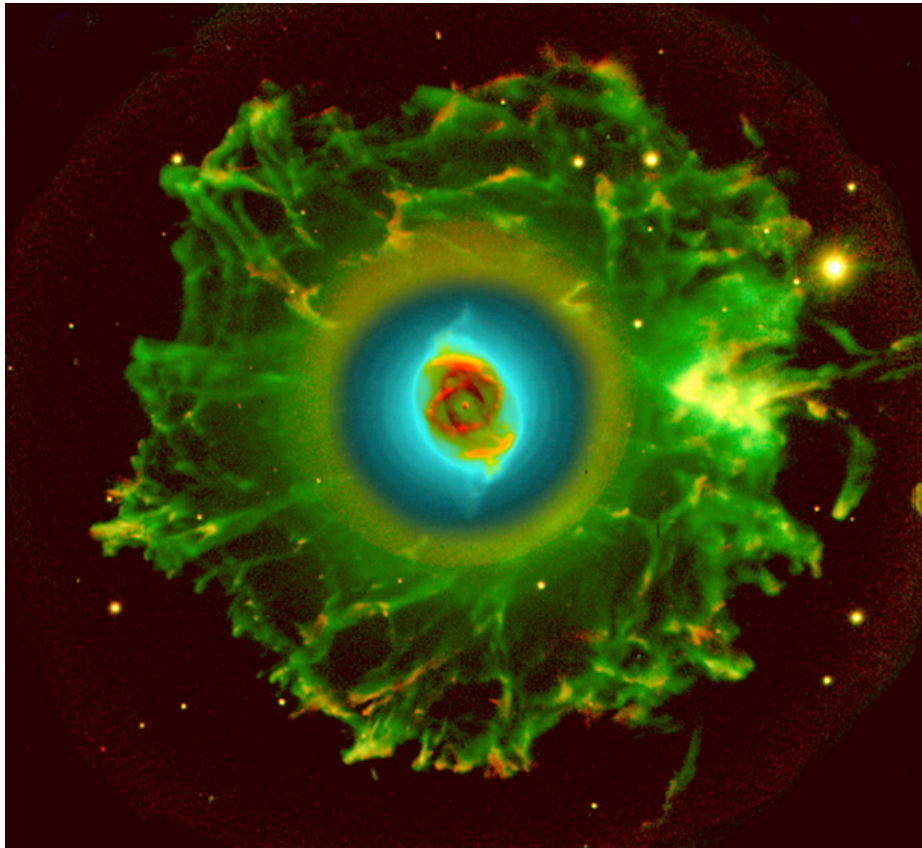


Figura 3: NGC 6543, a Cat's Eye Nebula (Nebulosa do Olho do Gato). Imagem obtida com o telescópio de 2.56m NOT, por R. Corradi e D. R. Gonçalves (em 2002). A imagem, capta a emissão em [NII] (vermelho) e em [OIII] (verde e azul). A dimensão da imagem é de 3,2 x 3 minutos de arco. O processamento da imagem destaca detalhes da parte interna brilhante revelando simultaneamente os tênues anéis concêntricos e o halo repleto de filamentos.

2. Ventos estelares

Já sabemos que as nebulosas planetárias originam-se no final da vida de estrelas com massas similares àquela do Sol. Agora queremos entender seu processo de formação, ou seja: o que faz com que estas estrelas se transformem em nebulosas planetárias?

O esquema da Figura 4 nos ajudará a responder esta questão. Este diagrama representa a vida das estrelas do tipo solar (proposto por B. Paczynski em 1970). No princípio (canto inferior direito do diagrama) a luminosidade destas estrelas resulta da

queima de hidrogênio no núcleo —o que origina o hélio que também entrará em fusão nuclear. Estas estrelas passam a maior parte de suas vidas nesta fase de queima nuclear de hidrogênio— quase 10 bilhões de anos. Quando se acaba o hidrogênio do núcleo a estrela se expande transformando-se numa gigante vermelha, ao mesmo tempo que o seu núcleo se contrai. Nesta fase a energia da estrela vem da queima do hidrogênio, não no núcleo, mas numa camada mais externa. Como consequência do fato de que o núcleo se contrai ainda mais, o hélio passa a ser queimado no núcleo e a estrela experimenta mais uma fase de expansão nas camadas externas. Quando a estrela entra no ramo assintótico das gigantes (AGB) o seu núcleo já não queima hidrogênio nem hélio, e compõe-se do que sobrou das combustões anteriores, ou seja, de carbono e oxigênio. Nesta fase, e por um período de aproximadamente 1 milhão de anos, a estrela continuará seu processo de expansão, ao mesmo tempo que sua luminosidade crescerá, alcançando valores de umas 1.000 vezes a luminosidade do Sol. Os ventos estelares presentes nesta e nas fases imediatamente posteriores das estrelas do tipo solar (ou seja os ventos que ocorrem numa AGB - culminando na expulsão da nebulosa- e numa pós-AGB, englobando as fases AGB, proto-planetária e nebulosa planetária, ver esquema) gradualmente expulsam o gás de hidrogênio das camadas mais externas, deixando exposto o núcleo quente. O que sobra dos ventos estelares é a própria nebulosa planetária. Assim, aquela que denominamos a estrela central de uma nebulosa planetária é justamente a estrela da qual estivemos "acompanhando" a evolução. Quando cessa a combustão do hidrogênio nas camadas externas, a estrela perde seu brilho e transforma-se em uma anã branca.

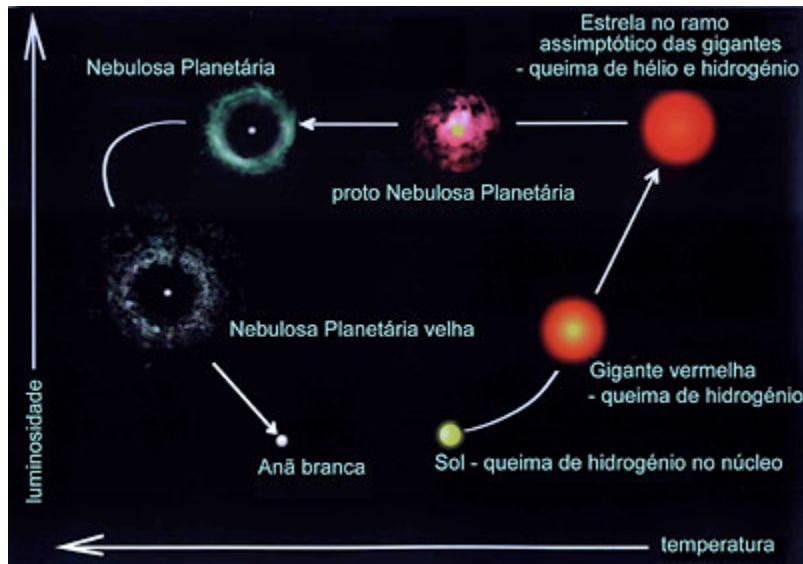


Figura 4: Esquema da vida de uma estrela do tipo solar (adaptação da Figura 7.2 de "Cosmic Butterflies - The Colorful Misteries of Planetary Nebulae" de S. Kwok).

Em síntese, as estrelas do tipo solar, quando chegam às fases finais de suas vidas, expelem grande parte do gás da sua atmosfera, pelo menos em dois episódios distintos de perda de massa. Primeiro, devido ao vento lento de uma estrela no ramo assintótico das gigantes (ou estrela AGB), cuja velocidade típica é da ordem de 10 km/s, com uma taxa de perda de massa de $10^{-5} M_{\text{SOL}}/\text{ano}$. E depois, através do vento rápido, expelido durante a fase imediatamente posterior da estrela central (ou seja, no vento de uma pós-AGB),

caracterizado por $10^{-7} M_{\text{sol}}/\text{ano}$ e que alcança uma velocidade de até 2.000 km/s. Aqui vale ressaltar que a característica mais importante destes ventos é que eles ocorrem durante o último milhão de anos, de estrelas que vivem, tipicamente, 10 bilhões de anos.

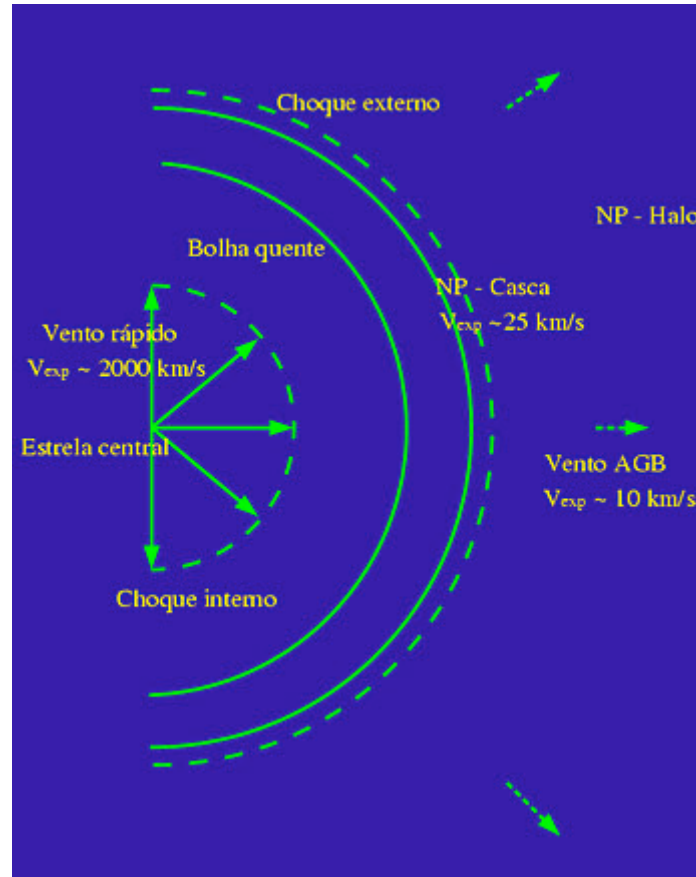


Figura 5: Esquema da interação dos ventos estelares que dão origem às nebulosas planetárias (adaptação da Figura 7 de S. Kwok (1994, PASP, 106, 344)

A teoria mais aceita para a formação das nebulosas planetárias (NP) é ainda mais recente, proposta por S. Kwok, C. Purton e P. Fitzgerald em 1978 (ver Figura 5). Esta teoria diz que estas são o resultado da interação dos dois ventos estelares que estamos discutindo: da AGB e da pós-AGB. Seguindo o raciocínio do parágrafo anterior –na fase em que o núcleo da estrela fica exposto– o vento estelar rápido, procedente deste núcleo quente e compacto, varre o material expelido previamente, dando forma à nebulosa. O invólucro desta nebulosa, sua casca, expande-se a uma velocidade de aproximadamente 25 km/s (velocidade esta intermediária entre aquelas dos ventos que dão origem à NP), é mais denso do que estes ventos estelares, tem temperaturas da ordem de 10.000 K e dura mais ou menos 30.000 anos.

Esquemáticamente, na Figura 5, vê-se claramente como se dá este processo de formação. Ou seja, o gás do vento rápido (pós-AGB), ao expandir-se sobre o material do vento lento (AGB), forma uma frente de choque. Na região mais interna o limite desta frente de choque é o próprio vento rápido, enquanto que o choque externo está delimitado

por uma casca densa (devido à acumulação do material varrido pelo vento rápido) que, quando observada no óptico, é a componente mais brilhante de uma nebulosa planetária. Entre os choques interno e externo, encontra-se a bolha quente (somente observável em raios-X). E, por último, o halo compõe-se pelo que resta do vento da AGB, e devido à sua baixa densidade quando comparado com a casca, é o componente menos brilhante das NPs nas imagens ópticas (ver Figuras 1, 2 e 3).

Toda a explicação do parágrafo anterior diz respeito aos aspectos dinâmicos da formação das NPs. Mas, qual é a fonte de sua energia, ou equivalentemente, qual é a fonte do seu brilho? As nebulosas planetárias brilham porque os fótons energéticos (fótons ultravioleta) da estrela central "iluminam" suas cascas e halos, fazendo com que o gás, inicialmente neutro, se ionize e emita a radiação que observamos.

As idéias expostas acima são capazes de explicar satisfatoriamente a formação das NPs, não só daquelas esféricas, mas também daquelas cuja casca tem forma elíptica, bipolar, ou com simetria de ponto. Tais idéias também dão conta das propriedades físicas (temperaturas e densidades) e cinemáticas das NPs, pelo menos no que diz respeito às suas macro-estruturas (cascas e halos). Há, por outro lado, outras componentes das NPs que não entendemos tão bem —as micro-estruturas— cujas características, quando comparadas àquelas das macro-estruturas, serão estudadas nos próximos capítulos.

3. Das macro- às micro-estruturas

Quanto tentamos identificar as estruturas das nebulosas planetárias vemos que aquelas de maior escala são os halos, que em geral são arredondados. Depois, em escalas intermediárias, aparecem as cascas, que podem ser redondas, elípticas, bipolares, com simetria de ponto ou irregulares. Em escalas muito menores, existe uma série de micro-estruturas que apresentam morfologias tão variadas como nódulos, filamentos e jatos. A Figura 6 apresenta um esquema das várias estruturas (componentes) das nebulosas planetárias —tanto em grande quanto em pequena escala— e na Figura 7 apresentamos algumas imagens de NPs que contêm micro-estruturas.

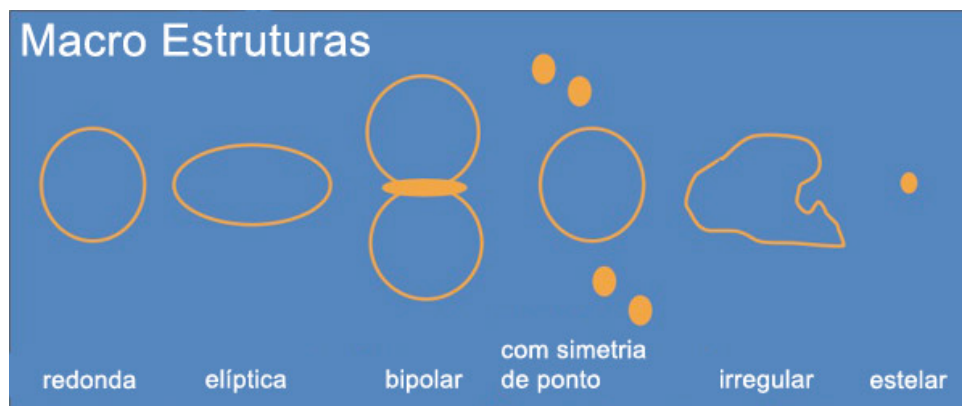


Figura 6a: Classificação morfológica das cascas das nebulosas planetárias.

Como mencionado anteriormente, as cascas das NPs têm origem na interação dos ventos estelares. Os halos, por outro lado, provavelmente são compostos pelo gás expulso durante

as fases ativas da evolução estelar anteriores à compressão da nebulosa (ou seja, por restos do vento lento da AGB). Este gás está, agora, sendo iluminado pelos fótons altamente energéticos da estrela quente, ou seja, da estrela central da nebulosa planetária.

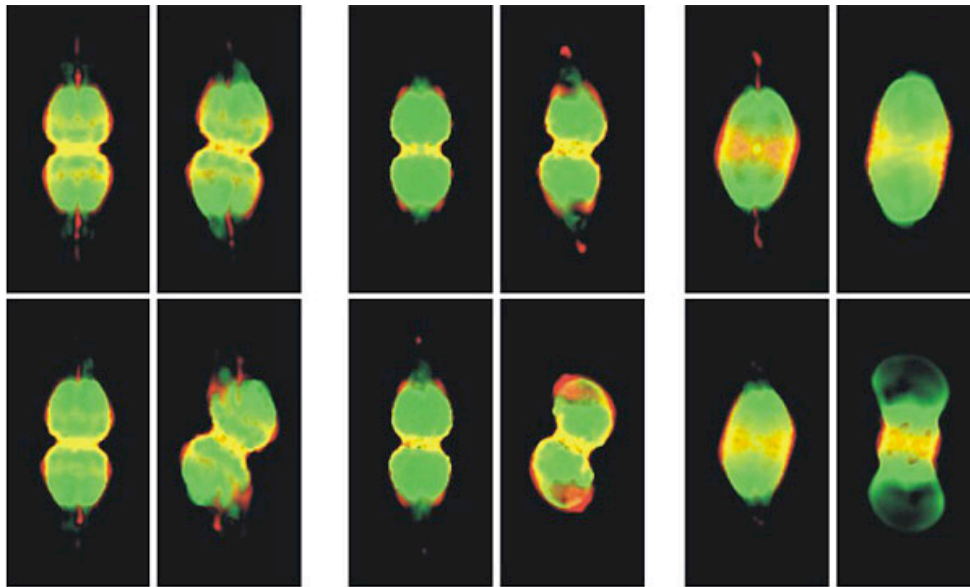


Figura 6b: Simulações numéricas de García-Segura e López (2000), mostrando os diferentes tipos morfológicos de nebulosas planetárias, em alguns casos contendo micro-estruturas. Em verde vemos a emissão fotoionizada e em vermelho aquela excitada por choques



Figura 6c: Esquema dos diferentes tipos de micro-estruturas, vistas em pares simétricos ou isoladas com respeito à estrela central.

Muitas micro-estruturas estão sendo descobertas graças ao uso de telescópios capazes de obter imagens de alta resolução espacial. Por exemplo, as estruturas de pequena escala podem ser mais facilmente estudadas com o *Hubble Space Telescope*. Porém outras micro-estruturas, como os "ansae" de NGC 7009 (ver Figura 7), são conhecidos já há muito tempo (descobertos por L. Aller em 1936). Recentemente, tais estruturas foram batizadas com acrônimos como FLIERS (fast, low-ionization emission regions: regiões de emissão de baixa ionização e rápidas), por Balick e colaboradores em 1993; ou BRETs (bipolar, rotating, episodic jets: jatos bipolares episódicos e em rotação); por López e colaboradores em 1995. O interessante deste tipo de acrônimos reside no fato de que são capazes de descrever algumas das características físicas destas estruturas.

As micro-estruturas têm uma grande variedade de formas e, além disso, podem deslocar-se com a mesma velocidade do meio que as circunda ou viajar de forma peculiar, ou seja, com velocidades diferenciadas daquela do ambiente. Há quatro anos desenvolvemos uma classificação detalhada das estruturas de pequena escala das nebulosas planetárias (Gonçalves et al. 2001). Neste trabalho relacionamos, pela primeira vez, todas as nebulosas planetárias (umas 50) com micro-estruturas, considerando seus tipos morfológicos e cinemáticos, bem como os processos físicos propostos para sua formação (ver <http://www.astro.iag.usp.br/~denise/> onde encontra-se, atualizada, a lista completa destas NPs).

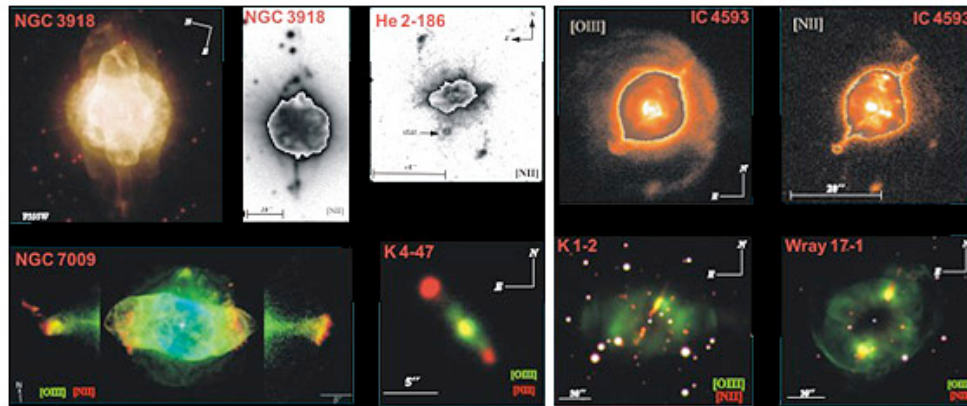


Figura 7a: Pares de jatos (à esquerda) e pares de estruturas similares a jatos (à direita). Créditos: NGC 3918, com o filtro F555W, obtida do arquivo do Hubble Space Telescope; NGC 7009, Balick et al. (1998); o restante são imagens adaptadas de uma série de artigos publicados por Corradi et al. entre 1997 e 2000, como resultado dos estudos do Grupo de Nebulosas Bipolares do Instituto de Astrofísica de Canárias. Estas foram obtidas em diferentes telescópios, e majoritariamente com a luz do oxigênio duas vezes ionizado ([OIII]) e do nitrogênio uma vez ionizado ([NII]).

Então, classificamos as micro-estruturas como: i) nódulos ou filamentos em pares simétricos; ii) pares de jatos; iii) pares de estruturas similares a jatos; e iv) nódulos ou filamentos isolados. Os pares de nódulos ou filamentos e aqueles isolados, podem viajar com velocidades maiores ou iguais às velocidades do meio no qual estão inseridos. Em particular, a característica que diferencia os jatos das estruturas similares a jatos é o fato de que os de jatos expandem-se supersonicamente, ou seja com velocidades maiores do que aquela do meio. Ao contrário, os pares de estruturas similares a jatos deslocam-se com a mesma velocidade que o meio –ver Figura 7 onde encontram-se exemplos de todas as classes de micro-estruturas. Além de outros resultados que obtivemos deste estudo, e que estudaremos na próximo capítulo, demonstramos, que as micro-estruturas aparecem indistintamente em todos as diferentes classes morfológicas das NPs, o que sugere que os processos que culminam na formação das micro-estruturas não estão, necessariamente, relacionados àqueles que dão origem às distintas morfologias das nebulosas planetárias.

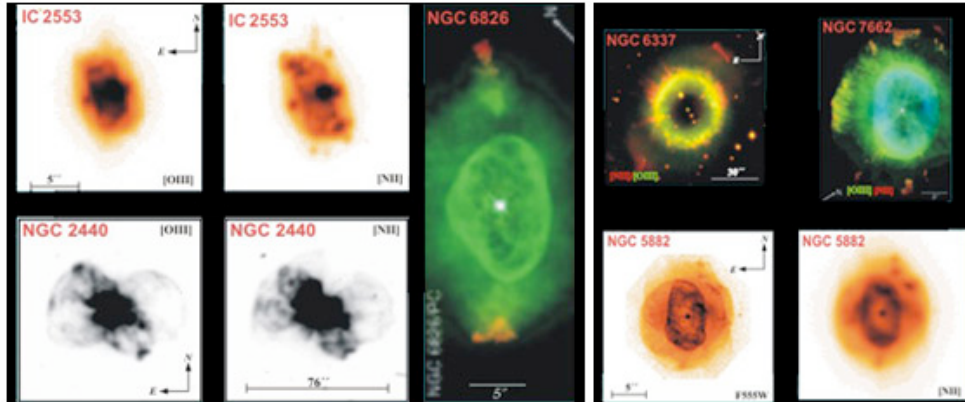


Figura 7b: Nódulos ou filamentos em pares (à esquerda) e nódulos ou filamentos isolados (à direita). Créditos: NGC 5882, com o filtro F555W, obtida do arquivo do Hubble Space Telescope; NGC 6826 e NGC 7662, Balick et al. (1998); NGC 2440 López et al. (1998); o restante são imagens adaptadas de uma série de artigos publicados por Corradi et al. entre 1997 e 2000, como resultado dos estudos do Grupo de Nebulosas Bipolares do Instituto de Astrofísica de Canárias. Estas foram obtidas em diferentes telescópios, e majoritariamente com a luz do oxigênio duas vezes ionizado ([OIII]) e do nitrogênio uma vez ionizado ([NII]).

4. Jatos e outras micro-estruturas

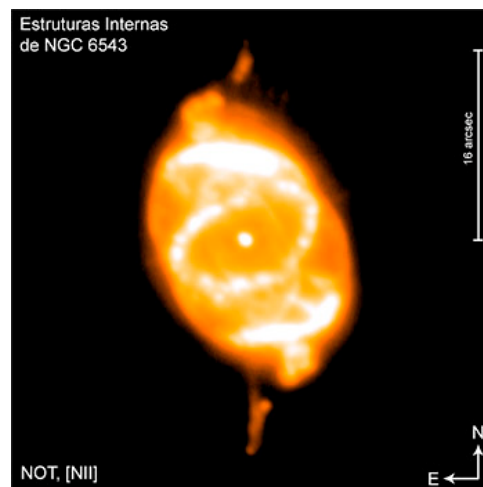


Figura 8: Parte interna de NGC 6543. Aqui vemos uma imagem em nitrogênio uma vez ionizado das estruturas internas da nebulosa. O par de jatos é a estrutura mais externa da imagem, que está orientada na direção Norte-Sul. Crédito: R. Corradi & D.R. Gonçalves (2002).

Analisando a parte central da nebulosa do Olho do Gato (NGC 6543) - vide Figuras 3 e 8 - vemos claramente que os jatos constituem uma entidade separada do núcleo da nebulosa. De fato, as micro-estruturas das nebulosas planetárias habitualmente mostram-se como entidades bem diferenciadas do resto das componentes da nebulosa, não só do ponto de vista morfológico, mas também em termos da luz que emitem. As cascas e os halos brilham, principalmente, na linha de emissão do oxigênio duas vezes ionizado ([OIII], verde e azul na Figura 3), enquanto que as micro-estruturas são muito mais brilhantes na linha de

emissão do nitrogênio uma vez ionizado ([NII], vermelho na Figura 3) e do oxigênio uma vez ionizado ([OII]). Devido a esta propriedade, as micro-estruturas também são conhecidas como estruturas de baixa-ionização (LIS, “low-ionization structures”. Ver exemplos nas Figuras 7a e 7b).

Conforme comentamos no capítulo anterior, todas as nebulosas planetárias com micro-estruturas foram reunidas e, pela primeira vez, classificadas, num trabalho que publicamos há alguns anos, Gonçalves et al. (2001). Nele consideramos tanto os aspectos morfológicos quanto os cinemáticos destas, em contraste com os mesmos aspectos observacionais das nebulosas hospedeiras. Além disto, e nisto reside o principal objetivo desta compilação de dados, contrastamos as previsões de todos os modelos teóricos propostos para a formação das estruturas de pequena escala em NPs, com suas características observacionais.

Esta detalhada análise das micro-estruturas permitiu-nos descartar claramente alguns dos mecanismos propostos para explicar a origem de diferentes tipos de LIS. Demonstramos que tanto as velocidades observadas quanto a localização das estruturas isoladas podem ser razoavelmente bem explicadas por condensações originadas no vento lento - ou seja, prévias à compressão da nebulosa propriamente dita - ou por instabilidades locais.

Os modelos para a formação de jatos, propostos até então (interação dos ventos estudados no cap. 2, com ou sem a inclusão de efeitos magnéticos, e considerando a estrela central única ou parte de um sistema binário), nem sempre são capazes de explicar algumas propriedades básicas dos jatos observados, como suas idades cinemáticas e o ângulo entre o jato e o eixo de simetria da nebulosa planetária.

Verificamos, também, que os pares de estruturas similares a jatos, caracterizados por velocidades de expansão relativamente baixas (parecidas àquelas do meio no qual se encontram, ou seja, as cascas e os halos) não podem ser explicadas por nenhum dos modelos existentes.

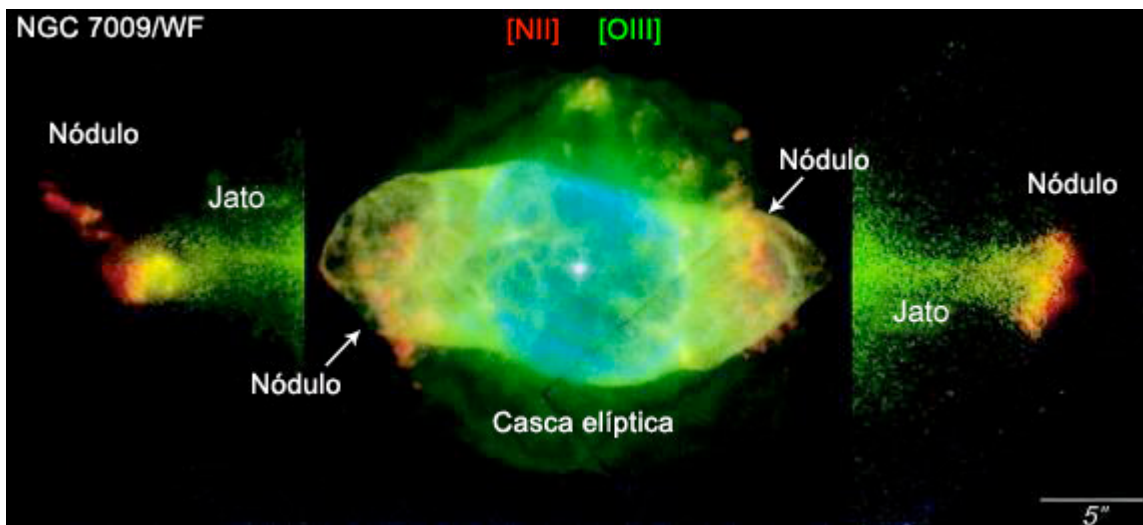


Figura 9: NGC 7009, a Nebulosa de Saturno (Balick et al. 1998). Este é um protótipo de nebulosa planetária com jatos. Note que esta NP está subdividida em muitas e diferentes estruturas: uma casca elíptica grosseiramente orientada na direção leste-oeste; dois pares de nódulos, um interno e outro externo; e um par de jatos.

Os nódulos que aparecem em pares simétricos e opostos, e com baixas velocidades, poderiam ser entendidos como resultando da sobrevivência de condensações (simétricas) formadas no vento lento (fase AGB da estrela central), ou como estruturas que antes tiveram altas velocidades, mas que foram sendo consideravelmente freadas pelo meio circundante.

Mais recentemente (Gonçalves et al. 2003) finalizamos a análise das densidades, temperaturas, excitação e composição química de NGC 7009 cujos jatos representam o protótipo de pares de jatos em NPs (ver Figura 9). Surpreendentemente, os nossos dados observacionais para os jatos e pares de nódulos desta nebulosa não confirmam as densidades, excitações e composições químicas previstas pelos modelos teóricos.

Estes são resultados robustos, e sua importância baseia-se no fato de que nos dizem que não entendemos, em detalhe, nem mesmo as micro-estruturas ora estudadas. Talvez estejamos interpretando erroneamente a informação procedente dos dados observacionais (com respeito às suas formas, velocidades, graus de excitação, composições químicas, etc) ou, talvez, estejamos equivocando-nos quanto aos processos físicos que poderiam explicar sua formação. No entanto, dado que estes processos físicos são basicamente os mesmos que dão origem a outros tipos de jatos astrofísicos (àqueles dos objetos estelares jovens, os jatos extragalácticos, etc) e dado que o tipo de análise observacional que empregamos para as micro-estruturas é aquela usualmente utilizado para as nebulosas planetárias, é óbvio que enfrentamos fenômenos bastante complexos. Enfim, compreender como se formam e evoluem as micro-estruturas é muito relevante para o completo entendimento da evolução das estrelas similares ao Sol que —como veremos no último capítulo deste estudo— constituem quase a totalidade das estrelas.

5. Resultados mais recentes

Conforme discutimos no capítulo anterior, o nosso estudo sobre as micro-estruturas das nebulosas planetárias considera os aspectos morfológicos e cinemáticos (ver, por exemplo, Gonçalves et al. 2001) e também aqueles que dizem respeito aos parâmetros físico-químicos e de excitação (Gonçalves et al. 2003, 2005). No entanto ainda existem dúvidas importantes a respeito da época e dos mecanismos que resultam na formação das LIS. No último ano estudamos os jatos de NGC 7009 (Figura 9) e de K 4-47 (Figura 10; Gonçalves et al. 2004). Da comparação entre as propriedades observadas nestas duas NPs que contêm jatos -entre várias outras para as quais a análise completa continua em andamento- acreditamos que outros aspectos da sua origem, além daqueles estudados no capítulo "Jatos e outras micro-estruturas", começam a perfilar-se.

O fato de que os jatos se deslocam com velocidades supersônicas (consideravelmente superiores àquelas do meio que os circunda) implica que a luz que emitem deve ser produzida por excitação devida a choques. De fato isto ocorre com os jatos de outros objetos astronômicos como os jatos extragalácticos, os quais são observados em quasares, rádio galáxias etc, e também nos jatos dos objetos estelares jovens, conhecidos como objetos Herbig-Haro. No caso das nebulosas planetárias, a principal fonte de energia não é a excitação por choques e sim a radiação oriunda da estrela central. Em outras palavras, quando dizemos que a luz oriunda dos jatos é excitada por choques, nos referimos ao fato de que esta tem origem, principalmente, na interação de dois gases cuja velocidade relativa

é supersônica. Por outro lado, quando a luz que observamos tem origem na interação entre a radiação (nas NPs, fótons energéticos da estrela central) e o gás que a rodeia, dizemos que esta emissão foi produzida por radiação, ou seja, luz fotoionizada. Esta é a razão da diferenciação, em termos de cores, das nebulosas simuladas por García-Segura & López (2000) na Figura 6b. Nesta Figura vê-se claramente que as micro-estruturas devem emitir luz por excitação devida a choques.

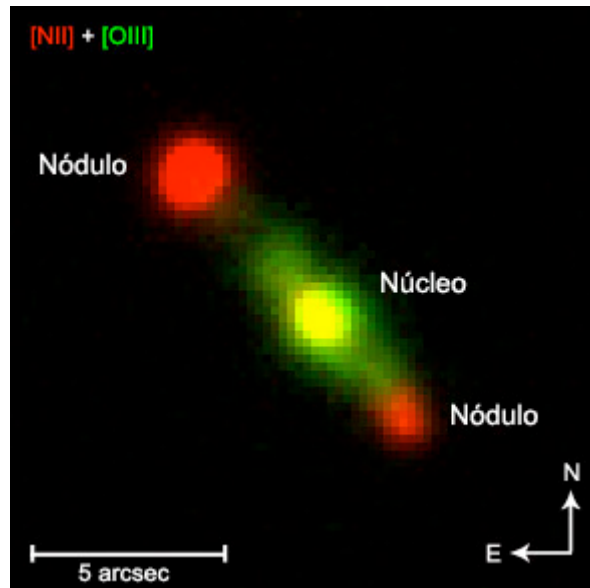


Figura 10: Nebulosa planetária K 4-47. Imagem obtida com o Telescópio NOT (ver Corradi et al. 2000).

Neste aspecto reside a principal diferença entre os jatos e pares de nódulos de NGC 7009 e de K 4-47. Na primeira jatos e nódulos possuem emissão fotoionizada e, na segunda, estes são excitados por choques. Assim, pelo menos em princípio, os resultados observacionais de NGC 7009 contrariam os estudos teóricos, enquanto que K 4-47 ratifica estes mesmos estudos. Como entender esta aparente contradição? Numa revisão sobre micro-estruturas em NPs (Gonçalves 2003) sugerimos que a solução para este impasse possa estar relacionada com a fase de evolução (idade) destas nebulosas. Conforme visto anteriormente uma nebulosa planetária nasce da interação dos ventos da estrela progenitora, AGB e pós-AGB. A partir da fase entre aquela na qual a estrela se encontra no Ramo Assintótico das Gigantes e da nebulosa planetária propriamente dita – conhecida como Proto Nebulosa Planetária – e até que a nebulosa desapareça (dissolva-se no meio interestelar) passam-se mais ou menos 30.000 anos. No início da fase nebulosa planetária, quando parte das suas estruturas ainda não foram atingidas pelos fótons UV da estrela central, a probabilidade de observar estruturas essencialmente excitadas por choques é muito mais alta. Dado que as velocidades relativas entre os jatos e o meio circundante numa nebulosa planetária (tipicamente entre 50 e 150 km/s) nunca são tão altas como aquelas de jatos extragalácticos (entre poucos milhares de km/s e aproximadamente a velocidade da luz), os choques nas NPs não são muito extremos, e por isto deixam de ser a principal fonte de excitação da emissão observada a partir do momento em são atingidos pela radiação (ultravioleta, ou seja, composta por fótons altamente energéticos) da estrela central.

Esta ideia não é completamente nova, já que outros autores como Dopita (1997) e Miranda et al. (2000) também discutiram a possível relação idade versus principal mecanismo de excitação em NPs. A novidade é que estamos comparando várias nebulosas com LIS numa tentativa de provar se esta relação realmente existe ou não. Além do fato de os jatos/nódulos de NGC 7009 e de K 4-47 serem opostos em termos de excitação, a primeira destas nebulosas parece ser mais evoluída do que a segunda (vide Gonçalves 2003). Enfim, há evidências de que os estudos teóricos estejam corretos ao predizer que jatos e nódulos de alta velocidade devem emitir luz produzida por excitação devido a choques, o que efetivamente se observa em nebulosas como K 4-47. Por outro lado, estes estudos não consideram a completa evolução das nebulosas com LIS, e por isto não incluem a ação da radiação da estrela central nas estruturas previamente excitadas por choques. Tudo indica que caso se considerassem, simultaneamente, estes dois tipos de excitação nos modelos teóricos, o resultado seria que nebulosas mais jovens teriam jatos essencialmente excitados por choques e que nebulosas mais evoluídas teriam jatos principalmente fotoionizados, como no caso de NGC 7009.

Somente muito recentemente, nos últimos 5 anos, este e outros aspectos básicos da origem e evolução das micro-estruturas começaram a ser entendidos. Ou seja, conhecemos –relativamente bem– as principais características e mecanismos de formação e evolução das nebulosas planetárias. No entanto o nosso conhecimento sobre os detalhes destas belas criaturas –as micro estruturas– é ainda muito precário. Sabemos que 95% de todas as estrelas converter-se-ão em nebulosas planetárias, o que equivale a dizer que nebulosas planetárias são o destino final da maioria das estrelas. Justifica-se, assim, todo o esforço que vem sendo empregado em "descobrir" em detalhe os processos físicos "escondidos" nestas fabulosas estruturas.