



Universiteit
Leiden
The Netherlands

Observational constraints on the evolution of dust in protoplanetary disks

Martins e Oliveira, I.

Citation

Martins e Oliveira, I. (2011, June 7). *Observational constraints on the evolution of dust in protoplanetary disks*. Retrieved from <https://hdl.handle.net/1887/17687>

Version: Corrected Publisher's Version

License: [Licence agreement concerning inclusion of doctoral thesis in the Institutional Repository of the University of Leiden](#)

Downloaded from: <https://hdl.handle.net/1887/17687>

Note: To cite this publication please use the final published version (if applicable).

Resumo em Português

Restrições Observacionais na Evolução da Poeira em Discos Protoplanetários

De acordo com dados do telescópio WMAP (Sonda Wilkinson de Anisotropia no Microondas, na sigla em inglês), o universo veio a existir aproximadamente 13.7 bilhões de anos atrás. A cosmologia moderna sugere que o universo permaneceu um lugar escuro grande parte de seus primeiros bilhões de anos, a “era opaca”. Durante este tempo, o universo consistia de matéria escura, assim como nuvens de gás hidrogênio neutro e pouco mais. As primeiras estrelas não se formaram até centenas de milhões de anos se passarem. No entanto, uma vez que a máquina cósmica de fazer estrelas se iniciou, agitou bolas gigantes de gás em muitas estrelas, que formaram as primeiras galáxias. É estimado que o universo contenha 10^{21} (isto é, um sextilhão) estrelas. Formação estelar é o principal mecanismo que controla a estrutura visível das galáxias, e a formação de elementos pesados no universo com o tempo. Originalmente, os únicos elementos eram hidrogênio, hélio e traços de lítio, berílio e bórão. Elementos mais pesados não existiam ainda.

Estrelas nascem, evoluem, envelhecem, e eventualmente morrem. Em termos simples, elas nascem do colapso de uma nuvem molecular, e podem evoluir diferentemente durante sua vida, dependendo de suas massas. Durante sua evolução, uma estrela queima elementos leves em elementos mais pesados através de fusão nuclear, então produzindo a energia necessária para balancear a pressão gravitacional e manter-se viva. Durante o curso de sua evolução, estrelas mudam de massa (através de acreção ou perda de massa), de tamanho (expansão ou contração) e de luminosidade (por mudanças de reações termonucleares em seus núcleos). Estrelas podem ser sozinhas e isoladas ou, muito comumente, viver em sistemas múltiplos. Quando a estrela esgota seu combustível nuclear, sua pressão de radiação já não pode equilibrar sua gravidade, iniciando uma cadeia de processos irreversíveis que eventualmente conduzem à sua morte. Estrelas de baixa massa ejetam seus envelopes gasosos e tornam-se visíveis as nebulosas planetárias, enquanto estrelas massivas explodem como supernovas. Elementos pesados recém sintetizados (incluindo Si, O, C, Mg and Fe, que compõem as partículas de poeira das quais planetas eventualmente podem formar-se) são portanto lançadas ao espaço, onde se misturarão com o meio interestelar (MI). Este MI enriquecido posteriormente fornece material para as próximas gerações de es-

treelas, eventualmente levando à criação de sistemas planetários onde vida no universo tornou-se possível.

Na nossa Via Láctea, uma teoria bastante popular sugere que a explosão de uma supernova provocou a formação do nosso Sol e seu disco protoplanetário, cerca de 4.6 bilhões de anos atrás. Oito planetas (Mercúrio, Vênus, Terra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano e Netuno) e incontáveis objetos menores (como planetas anões, cometas e asteróides) foram formados a partir do material nesta névoa pré-solar.

Esta tese se concentra na interação entre a estrela jovem e seu disco protoplanetário, na evolução das partículas de poeira que compõem o disco protoplanetário ao redor da estrela jovem e, portanto, nos primeiros estágios da formação de planetas como os que compõem nosso próprio Sistema Solar.

Formação de Estrelas de Baixa Massa

O tipo mais comum de objectos estelares são estrelas de baixa massa ($\sim 0.5 M_{\odot}$), que dominam em número e massa total. Estrelas de baixa massa formam-se dentro de concentrações relativamente densas de gás e poeira interestelar conhecidas como nuvens moleculares, com a poeira compondo $\sim 1\%$ da massa da nuvem. Acredita-se que esta poeira seja muito pequena em tamanho (menos de 1 micrômetro) e composta de grãos à base de carbono e silicato, quase completamente amorfos. Essas regiões mais densas são opacas à luz visível devido à sua alta extinção, porém translúcidas a comprimentos de onda maiores (por exemplo, infravermelho).

A formação estelar inicia-se quando uma região na nuvem esfria-se e atinge uma densidade de matéria suficientemente alta, começando a desmoronar sob sua própria gravidade. Energia gravitacional é transformada em energia cinética durante a queda, acelerando partículas de gás que se agitam, aumentando então a temperatura da estrela que se forma, e suas imediações. Como resultado, pressão térmica se acumula, o que serve de suporte à estrutura da nuvem, evitando adicionais contrações. Finalmente, o fragmento de nuvem colapsa em um núcleo central rodeado por um disco rotativo de material, ambos envoltos por um envelope gasoso que ainda está contraindo em direção ao centro. Com tempo o envelope se dissipa, tornando a estrela e seu disco visíveis em comprimentos de onda ópticos. Esta fase é conhecida como a fase “T Tauri”. Porque estrelas e discos estão conectados, eles evoluem juntos e vão afetar um ao outro.

Propriedades Estelares

Para estudar a estrutura e evolução de discos protoplanetários, e como estes se conectam à estrela central, é de maior importância ser capaz de determinar propriedades estelares. Uma estrela de determinada temperatura emite radiação aproximadamente como um corpo negro de mesma temperatura. Radiação emitida por estrelas massivas é máxima em comprimentos de onda mais curtos (ultra-violeta/visível) que a radiação emitida por estrelas de baixa massa (visível/infravermelho próximo). Con-

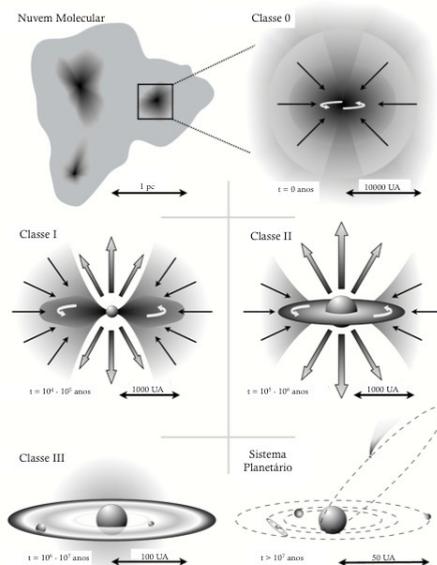


Figura 1 – Ilustração do cenário para a formação de estrelas de baixa massa. A formação de núcleos densos em nuvens moleculares é ilustrada no painel superior esquerdo, enquanto o painel superior direito mostra o colapso do núcleo sob a influência de sua própria gravidade. Ao mesmo tempo que o envelope começa a dissipar-se, a estrela em formação ejeta material por seus pólos removendo momento angular (painel central esquerdo), até que a recém-formada estrela e seus disco protoplanetário tornam-se visíveis (painel central direito). Enquanto o gás que compõe o disco se dissipa, planeta gigantes gasosos, como Júpiter e Saturno, já devem ter se formado (painel inferior esquerdo). No momento em que o disco inteiro se dissipou, o possível sistema planetário ao redor desta estrela deve ter se formado completamente (painel inferior direito).

sequentemente, o regime visível/infravermelho próximo é a faixa de comprimento de onda ideal para observar estrelas de baixa massa, do tipo T Tauri.

Ao estudar os espectros ópticos de estrelas de diferentes temperaturas é possível identificar bandas espectrais que são sensíveis à temperatura das estrelas. A presença ou ausência destas bandas é utilizada para determinar a temperatura efetiva de uma estrela. Além da temperatura, a análise do espectro óptico de uma estrela também permite a determinação de sua gravidade superficial, sua velocidade de rotação, e sua metalicidade (isto é, sua composição química). Essas quantidades, no entanto, são determinadas com exatidão apenas com espectros de média e alta resolução, enquanto temperaturas são facilmente derivadas de espectros de baixa resolução. Se a distância à estrela é conhecida, sua luminosidade pode ser obtida diretamente através de medições de fluxo em diferentes comprimentos de onda. A massa, o raio e a idade de uma estrela podem ser estimadas com base em modelos de evolução estelar. A derivação de parâmetros estelares é o tema de dois capítulos desta tese.

Discos Protoplanetários e Formação de Planetas

A origem de planetas está naturalmente ligada à evolução dos discos protoplanetários a partir dos quais os planetas se formam. No entanto, os detalhes de como exatamente os discos evoluem, a partir de sua composição inicial de pequenos grãos de poeira acoplados ao gás em sistemas planetários complexos, ainda não são compreendidos. Embora praticamente todas as estrelas jovens possuam discos protoplanetários, a maioria das estrelas mais velhas (que estão na sequência principal) não mostram nenhum sinal de estarem rodeadas por discos. Esta restrição implica que os discos devem evoluir, seja pela dispersão da poeira e do gás, seja pela construção de corpos maiores como planetas.

Propriedades de Discos

O material sólido que compõe um disco protoplanetário é exposto à radiação da estrela no centro do disco. A poeira, além de absorver parte da radiação, também re-processa e re-emite parte dela. Na verdade, a principal indicação observacional da existência de discos protoplanetários é a observação de um excesso de radiação (emitida pela poeira no disco) que não poderia ser atribuídos à estrela somente. Fazendo uso dos telescópios disponíveis hoje, só é possível observar diretamente (obter uma imagem) os discos ao redor de estrelas bem próximas. Portanto, a existência de discos é frequentemente inferida indiretamente a partir da existência de um excesso de radiação infravermelha (grão pequenos de poeira como os que compõe discos protoplanetários emitem mais eficientemente no infravermelho) em uma estrela.

A atmosfera terrestre absorve a maior parte da luz no regime infravermelho (felizmente para nós humanos), e então observações neste regime são quase impossíveis para telescópios na Terra. Por esta razão, muito esforço foi colocado no lançamento de telescópios espaciais no regime infravermelho. A grande maioria dos dados apresentados nesta tese foram obtidos utilizando o *Telescópio Espacial Spitzer*. *Spitzer* foi lançado em 2003 e operou em plena capacidade até o meio de 2009, quando sua missão criogênica (isto é, em baixa temperatura) terminou. Ao gastar todo o gás de hélio que mantinha o telescópio refrigerado, *Spitzer* continua a produzir dados em sua “missão morna”, embora somente em dois filtros. Originalmente, o telescópio é composto de três instrumentos: duas câmaras de imagem, IRAC (com 4 filtros) e MIPS (com 3 filtros), e um espectrógrafo, IRS. Os comprimentos de onda no infravermelho em que *Spitzer* observa são utilizados para investigar regiões distintas dos discos protoplanetários, dando indicações da estrutura e composição dos discos desde bastante perto da estrela, até aproximadamente metade de sua extensão. Para obter informação sobre as regiões do disco mais distantes da estrela central é preciso estudá-los em comprimento de ondas ainda mais longos (milímetro e radio).

A morna superfície do disco e o aro interior (que interceptam a radiação estelar diretamente) são responsáveis pela emissão de radiação nos comprimentos de onda mais curtos do infravermelho. As camadas mais profundas (uma população mais fria por não interceptar radiação estelar diretamente) emitem radiação mais eficientemente em

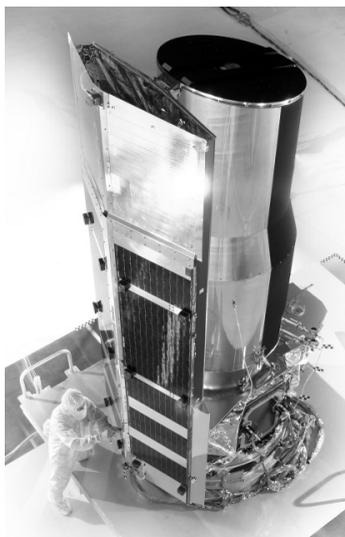


Figura 2 – O Telescópio Espacial Spitzer, antes de seu lançamento (crédito: NASA).

comprimentos de onda mais longos. A partir desta compreensão básica, torna-se claro quais seriam os resultados de suprimir ou aumentar qualquer um desses componentes. Por exemplo, um disco composto de muita poeira em toda sua extensão vai emitir muito excesso de radiação. Um disco empobrecido de poeira e gás (que foi acrescido à estrela, foi expelido por sua radiação, ou coagulou para formar corpos maiores) vai apresentar pouco ou nenhum excesso de radiação sobre a radiação estelar. Além disso, a presença de um buraco no disco produz uma assinatura bastante peculiar na radiação emitida pelo sistema (estrela + disco), por não apresentar a radiação que seria emitida pela poeira que não está presente no buraco. Ademais, a poeira emite bandas específicas no infravermelho como hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HAPs) e silicatos (centrados em 10 e 20 μm). Esses silicatos são bastante proeminentes e são usados em dois capítulos desta tese para investigar os processos químicos e físicos que afetam a poeira nas camadas superficiais do disco.

• Processos que Afetam Discos

A evolução de discos protoplanetários é uma combinação de fatores externos e internos. Sendo a principal fonte de radiação do sistema, a estrela central afeta a dispersão do disco diretamente. Ventos estelares podem varrer e remover parte do material do disco. Além disso, os fótons de raios ultra-violeta e raios-X emitidos pela estrela central (ou por uma estrela massiva nas proximidades) esquentam a superfície do disco e podem causar uma pressão térmica que pode remover massa do disco. Esse processo é chamado *fotoevaporação* e, em combinação com a evolução viscosa do disco, tem sido demonstrado ser um mecanismo muito eficaz para a dispersão de

discos. Ao mesmo tempo em que material é expelido do disco, acreção de material do disco para a estrela continua. A parte interna do disco é interrompida pelo campo magnético da estrela, resultando em acreção através da magnetosfera estelar, na qual material do disco é canalizado ao longo das linhas do campo magnético para dentro da estrela. Esse transporte de material produz excesso de emissão de contínuo nos regimes óptico e ultra-violeta e intensas linhas de emissão, a mais forte delas é $H\alpha$.

Além dos processos externos descritos acima, estudos teóricos, observacionais e laboratoriais apontam para processos que afetam a poeira dentro dos discos e, consequentemente, também a estrutura do disco. A alta densidade do disco facilita colisões entre partículas de poeira, que podem coagular em partículas maiores. À medida que as partículas crescem, gravidade as puxa em direção ao plano médio do disco, tornando-o um ambiente ainda mais denso e, portanto, mais propenso a um maior crescimento das partículas em corpos de tamanhos de até alguns quilômetros. Esses corpos são chamados *planetesimais*. Essas etapas são os estágios iniciais da formação de um planeta. Observacionalmente, coagulação de partículas é equivalente à remoção do componente ‘poeira’, manifestando-se como um achatamento do disco e uma diminuição do excesso de radiação infravermelha de um disco.

Discos de detritos (debris em inglês), compostos por planetesimais, grandes rochas e uma população de poeira que é produzida por colisões de planetesimais, têm sido encontrados ao redor de estrelas jovens e evoluídas. É entendido que esta fase siga a fase de disco protoplanetário, quando o gás não está mais presente.



Figura 3 – O processo de formação planetária significa uma imensa modificação da matéria: de pequena e amorfa poeira (esquerda) a objetos que compõem um sistema planetário como o Sistema Solar, milhares de quilômetros em diâmetro e extremamente complexos (direita).

Formação Planetária

O crescimento além de planetesimais para formar planetas ainda não é bem entendido. Para tornar as coisas ainda mais complicadas, objetos com tamanhos entre centímetro e alguns milhares de metros em diâmetro não podem ser observados diretamente. Dois modelos diferentes foram introduzidos na literatura para explicar a formação de planetas (milhares de quilômetros em diâmetro). O modelo de *acreção de núcleo* sugere que o crescimento para diâmetros acima de quilômetro acontece de maneira semelhante a como a coagulação funciona para partículas pequenas. Planetesimais

interagem gravitacionalmente, aglutinando-se para formar um núcleo de elementos pesados (como o núcleo da Terra). Uma vez que esse núcleo é grande e massivo o suficiente, seu campo gravitacional captura gás presente no disco protoplanetário para formar um planeta gigante gasoso (como Júpiter). Alternativamente, o modelo de *instabilidade do disco* sugere que partes mais densas se formam pela fragmentação do disco. Estes aglomerados contraem-se gravitacionalmente para formar planetas, da mesma maneira que estrelas se formam pelo colapso de um núcleo denso numa nuvem molecular (como descrito na página 204). Embora o modelo de acreção de núcleo seja favorecido pela maioria dos teóricos, ambos os modelos tem vantagens e problemas. Simulações de formação de planetas e observações ainda não são suficientes para determinar exatamente como planetas se formam.

O Sistema Solar e Exo-planetas

Observações de um número crescente de estrelas têm demonstrado que o Sistema Solar não é único, e que planetas e sistemas planetários vêm em uma variedade de formas. A origem desta variedade ainda é incerta, mas deve estar ligada ao processo de formação destes sistemas. Planetas e sistemas planetários parecem ser um resultado bastante comum da evolução de discos, uma vez que planetas já foram observados ao redor de centenas de estrelas além do Sol. A formação de planetas, no entanto, não parece ser o único resultado da evolução do disco. A maioria das estrelas mais evoluídas não mostram sinais de serem rodeadas por planetas ou corpos menores, dentro das atuais limitações observacionais. Isso significa que os discos ao redor dessas estrelas quando elas eram jovens se dissiparam completamente, sem deixar nem uma poeirinha para contar a estória.

Desde a descoberta do primeiro planeta ao redor de uma estrela além do Sol, a estrela *51 Peg*, cerca de 15 anos atrás, os aproximadamente 500 exo-planetes (planetas fora do Sistema Solar) já descobertos formam um poderoso banco de dados desse possível produto final da evolução de discos protoplanetários. A distribuição de massas desses planetas, além de suas posições em relação às suas estrelas centrais oferecem restrições observacionais adicionais para os modelos de formação planetária.

Adicionalmente, apenas um sistema planetário (o nosso próprio Sistema Solar) pode ser estudado ao nível de detalhe necessário para fornecer informações confiáveis sobre a dinâmica e a composição de seus constituintes. Notavelmente, nosso Sistema Solar contém uma coleção de objetos que preservaram de forma praticamente inalterada o material que compôs o Sistema Solar primitivo mais de 4.5 bilhões de anos atrás. Análises de meteoritos e partículas de poeira interplanetária, assim como observações de cometas, revelaram sua estrutura e mineralogia, apontando para importantes processos físicos e químicos que ocorreram durante a evolução inicial do disco protoplanetário em torno do jovem Sol. A procura por pistas sobre como e quando tais alterações ocorrem na fase inicial de discos protoplanetários, quando os planetas ainda estão se formando, é um campo de pesquisa muito ativo, e assunto do capítulo 6 desta tese.

Diversidade e Evolução de Discos

O lançamento do telescópio *Spitzer* representou um passo importante no estudo de discos protoplanetários. Embora muitos discos tenham sido observados com sucesso por telescópios terrestres e espaciais (por exemplo, o *Observatório Espacial no Infravermelho*, ISO na sigla em inglês), a sensibilidade para detectar objetos pouco brilhantes e a capacidade de mapear muitos objetos do telescópio *Spitzer* permitiu a observação de um número extremamente grande de sistemas. Graças às amostras de discos estatisticamente relevantes observadas por *Spitzer* (complementadas por dados em outros regimes como ultra-violeta e óptico), uma variedade até então desconhecida de estruturas e tempo de vida de discos foi revelada.

Antes de *Spitzer*, a compreensão global da evolução de discos era bastante baseada em evidências de um pequeno número de objetos. Assim, os modelos de evolução de discos e de formação planetária eram derivados de: i) extrapolação das características dos discos mais brilhantes como universais; ii) evidência do nosso Sistema Solar, e da ‘névoa solar’ a partir do qual se originou; iii) evidências observacionais de que discos se dissipam em alguns milhões de anos. A visão pré-*Spitzer* dominante era de que discos evoluíam constantemente com o tempo, com material caindo em direção à estrela, sendo dissipado pela radiação estelar ou coagulando em partículas maiores e maiores, que são atraídas gravitacionalmente para o plano médio do disco.

Um dos parâmetros mais importantes para a formação de planetas gigantes é o tempo de vida do disco gasoso. No entanto, como poeira pequena se acopla bem ao gás (como minúsculas partículas de tabaco se acoplam bem à fumaça do cigarro) e uma vez que a poeira é muito mais fácil de ser observada, o tempo de vida do disco geralmente se refere ao tempo em que se observa uma estrela possuir excesso de radiação no infravermelho (atribuído à presença de poeira). O relógio de discos é a idade da estrela central, uma vez que estrelas e discos nasceram juntos. Utilizando a idade média de um bando de estrelas e medindo o excesso de radiação infravermelha das estrelas do bando, diversos cientistas mostraram que a fração de estrelas rodeadas por discos diminui progressivamente com a idade média, concluindo que o tempo é um parâmetro essencial na evolução de discos: em 6 – 8 milhões de anos menos de 10% das estrelas ainda possuem discos em um certo bando. Embora este fato apresente o tempo como um parâmetro importante, ele não é o único. Dentro um bando de determinada idade (seja um bando jovem, de 1 milhão de anos, ou um bando velho, de 7 milhões de anos), uma grande diversidade em excesso de radiação infravermelha (e portanto de quantidade de poeira ainda presente no disco) é observado. Ainda não está claro porque alguns discos se dissipam completamente em 1 ou 2 milhões de anos, enquanto outros podem viver até 10 milhões de anos.

Têm sido sugerido que muitos outros parâmetros podem desempenhar um papel importante na evolução de discos. Por exemplo, há evidências de tempos de vida diferentes para estrelas de diferentes massas (com mais rápida dispersão de discos ao redor de estrelas massivas). Uma diversidade de temperaturas, luminosidades e massas estelares é conhecida e estudada há décadas. De fato, uma vez que estrelas

e discos são conectados, é bastante improvável que diferenças nas fontes centrais não sejam refletidas na matéria que as envolve. No entanto, até hoje nenhuma forte evidência foi encontrada a respeito de que processos são determinantes na definição da escala de tempo em que um disco vai se dissipar.

Como o local de nascimento de planetas, os discos protoplanetários ricos em gás têm o potencial para responder muitas das questões relacionadas com a formação planetária. Amostragens estatísticas de discos protoplanetários são necessários para identificar as condições ambientais e iniciais dos discos, bem como os principais processos que afetam a evolução da poeira e controlam o resultado da evolução de discos. Tornou-se claro que nem todos os discos evoluem da mesma maneira, porém quais caminhos diferentes são possíveis, e por que, ainda é um mistério.

Esta Tese

Esta tese apresenta estudos imparciais de estrelas jovens de baixa massa e seus discos de poeira nas regiões de formação estelar mais próximas, usando telescópios nos regimes óptico e infravermelho para investigar a evolução da poeira em discos protoplanetários. A tese aborda o sistema estrela-disco completo: as características estelares e seus efeitos sobre a evolução, bem como as mudanças que ocorrem na poeira, fazendo uso de amostras estatisticamente relevantes. A estrutura desta tese é a seguinte:

Capítulo 2 – Neste capítulo um levantamento espectroscópico óptico concebido para caracterizar a nova população estelar jovem descoberta na Nuvem Molecular Serpens é apresentado. Tipos espectrais, e portanto temperaturas efetivas, são derivados dos espectros. Combinando com fotometria óptica e infravermelha, luminosidades estelares são calculadas, o que permite a colocação destas estrelas no diagrama H-R. Uma alta contaminação (25%) de objetos de fundo (estrelas e galáxias) é encontrada, elevando o cuidado ao usar cores infravermelhas para identificar objetos estelares jovens em nuvens de baixa latitude. Auxiliado por modelos de evolução estelar, idades na faixa de 2 – 6 milhões de anos e massas de 0.2 – 1.2 massas solares são inferidos para as estrelas pertencentes à nuvem, se a distância de 259 pc é considerada. Além disso, as taxas de acreção de massa em direção às estrelas são estimadas a partir da largura a 10% da intensidade do pico da linha de emissão H α , mostrando que um pouco mais da metade da amostra (57%) mostra acreção ativa.

Capítulo 3 – Aqui nós relatamos um programa de espectroscopia óptica semelhante ao do capítulo 2, mas realizado nas Nuvens Lúpus. Uma amostra de estrelas jovens previamente selecionadas é investigada, e tipos espectrais são determinados. A amostra é constituída principalmente de estrelas mais frias, de tipo M (90%). De acordo com modelos evolucionários teóricos sobrepostos ao diagrama H-R constituído para a amostra, a população tem aproximadamente 2 milhões de anos, com uma massa média de apenas 0.2 massas solares. A linha de emissão H α indica uma distribuição de taxas de acreção de massa típicas de estrelas T Tauri.

Capítulo 4 – Este capítulo apresenta uma amostra completa, limitada por fluxo, de espectros *Spitzer* IRS no infravermelho médio (5–35 μ m) da população estelar

jovem de Serpens, como estudada no capítulo 2. Os espectros são apresentados e classificados. Em concordância com as conclusões do capítulo 2, a população de fundo é caracterizada como estrelas de fundo (devido à inclinação espectral e bandas de silicato em absorção), galáxias de fundo (com HAPs transladados para o vermelho) e um objeto de alta ionização de natureza desconhecida. Os verdadeiros objetos estelares jovens somam em 115, incluindo estrelas ainda cercadas por um envelope (classe I, 18%) e discos (classes II e III, 82%). A geometria da parte interna do disco é inferida a partir da taxa de fluxo entre 30 and 13 micrômetros. As bandas de silicato em 10 e 20 micrômetros são fortemente afetadas pelo tamanho da poeira que as emite e, portanto, são usadas para identificar o tamanho da poeira. Uma população de poeira pequena nas camadas superficiais dos disco é observada sempre, independente da geometria, ou de a estrela estar numa região mais populosa ou mais isolada. Além disso, os resultados em Serpens são comparados com os da população jovem na região de Taurus, a região de formação estelar mais bem estudada até hoje, e com os resultados da amostra c2d IRS, que contém estrelas em distintas regiões. Os resultados em Serpens são bastante similares aos resultados destas duas populações de idades médias e ambientes diferentes. Este resultado implica que a população de poeira na superfície dos discos é o resultado de um equilíbrio entre a coagulação de partículas e sua fragmentação, independente do ambiente. Este equilíbrio é mantido enquanto os discos existem.

Capítulo 5 – O objeto de alta ionização descoberto no capítulo 4, OL17, é estudado aqui. Espectros adicionais foram obtidos com o novo instrumento X-shooter, que fica no Very Large Telescope (VLT, no Chile). A ampla gama de comprimento de onda alcançada pelos três braços deste instrumento (no ultra-violeta, visível, e infravermelho) abrange várias importantes linha de emissão que são usadas para determinar a natureza do objeto. Estreitas linha de emissão, combinadas com baixas razões das linhas $[N II]/H\alpha$ e $[S II]/H\alpha$, mostram que o objeto é uma nova nebulosa planetária.

Capítulo 6 – Este capítulo apresenta a mineralogia dos grãos de poeira na superfície do disco para quatro grupos para os quais existem estudos completos com espectros IRS: os jovens Serpens e Taurus apresentados no capítulo 4, bem como as regiões mais velhas Upper Scorpius e η Chamaeleontis. A análise dos dados foi feita com as mesmas técnicas, permitindo a comparação direta dos resultados. Uma distribuição similar de tamanhos médios de grão e frações de cristalinidade é observada para as quatro regiões, apesar de idades médias diferentes e distintas frações de disco. A ampla diferença em idades médias ($\sim 1-8$ milhões de anos) e geometrias de disco, sem acompanhamento da evolução das propriedades da poeira na superfície do disco, aponta para uma rápida mudança acontecendo (≤ 1 milhão de anos), e que um equilíbrio é mantido de tal forma que as propriedades dos discos são estatisticamente as mesmas até a dissipação dos mesmos.

Capítulo 7 – Este capítulo faz uso das características das estrelas e discos derivados nos capítulos anteriores na construção de distribuições espectrais de energia (SED na sigla em inglês) para as estrelas jovens com discos em Serpens. As SEDs permitem

uma correta separação entre a radiação emitida pela estrela e aquela re-emitida pelo disco. Tendo em conta a nova distância à Serpens (415 pc), uma distribuição etária mais jovem é encontrada para a nuvem, concentrada entre 1 e 3 milhões de anos. A distribuição de luminosidades fracionárias de disco (i.e., luminosidade do disco em relação à luminosidade estelar) da população de Serpens se assemelha àquela da jovem Taurus, com a maioria dos discos compatíveis com discos passivamente irradiados. Em termos de geometria, não há separação clara em luminosidade fracionária de disco entre discos grandes e discos quase já dissipados, como é o caso dos discos ao redor de estrelas mais massivas, chamadas Herbig Ae/Be. Além disso, a mineralogia da poeira na superfície dos discos não parece correlacionar diretamente com quaisquer parâmetros estelares ou de disco para a grande amostra estudada.

Cada capítulo termina apresentando suas conclusões, deduzidas a partir dos dados ali apresentados. Em geral, as principais conclusões desta tese são:

- Separando a contaminação de fontes de fundo, Serpens e Lúpus são regiões jovens, com idades entre 1.5 – 3 milhões de anos (considerando a distância à Serpens sendo 415 ao invés de 259 pc). Embora a distribuição de idades seja muito semelhante, a distribuição de massas não é. Serpens é composta majoritariamente de estrelas de tipo K e M, espalhando-se entre 0.2 e 1.2 massas solares, com valor médio em torno de 0.7 massas solares. Esta distribuição é muito semelhante à da população de estrelas jovens em Taurus. Lúpus, no entanto, é quase totalmente composta de estrelas de muito baixa massa, de tipo M, com a maioria das estrelas tendo massa de 0.2 massas solares. Esta distribuição é bastante semelhante à das regiões de formação de estrelas jovens Chamaeleon I e IC 348. Essa diferença na distribuição de massas sugere alguns pequenos desvios de uma possível função de massa inicial universal.
- Para qualquer determinada região, seja ela uma região jovem de 1 milhão de anos ou velha, de 7 – 8 milhões de anos, a distribuição dos tamanhos de poeira dominantes na superfície dos discos é estatisticamente a mesma. Isto implica que, além de coagulação e do crescimento, esta poeira também é o resultado de processos colisionais destrutivos. Um equilíbrio desses dois processos deve ser mantido por milhões de anos, enquanto o disco existe, para explicar a mesma distribuição observada.
- A composição mineralógica da poeira é em média a mesma para todas as regiões estudadas. Um nível considerável de cristalinidade ($\sim 10 - 20\%$) deve ser estabelecido na superfície do disco no início de sua evolução (≤ 1 milhão de anos), alcançando um equilíbrio que é independente do que possa estar acontecendo no plano médio do disco, onde planetas pode estar se formando.

