

Pequenos Corpos do Sistema Solar: Asteróides, Cometas e TNOs.

Processos físicos atuantes e sua relação com a formação planetária

White Paper para a Comissão Especial de Astronomia assinado por (ordem alfabética):

Carlos Henrique Veiga (ON), Daniela Lazzaro (ON), Fernando Roig (ON), Jorge Márcio Carvano (ON), Sylvio Ferraz-Mello (IAG-USP), Tatiana Michtchenko (IAG-USP), Teresinha Rodrigues (ON), Thais Mothé-Diniz (OV-UFRJ)

Resumo

O termo “pequenos corpos” neste documento inclui os asteróides do Cinturão Principal (MBA), os objetos em órbitas próximas da Terra (NEO), os Troianos de Júpiter, os Centauros, os objetos Transnetunianos (TNO) e os cometas. A grande diversidade destas distintas populações de pequenos corpos é sua mais importante característica. Todas representam um reservatório de informação sobre uma grande parte da história, da química, dos processos físicos e da evolução do Sistema Solar. Além disso, por serem muitas vezes remanescentes de colisões catastróficas, esses corpos nos mostram processos que estão escondidos nos planetas tanto pelo tempo, quanto por sua evolução geológica. Desta forma, os estudos das diversas populações dos pequenos corpos permitem ter uma visão de como nosso Sistema Solar se formou e vem evoluindo.

Neste documento são identificadas algumas questões científicas ainda em aberto e, face à capacitação existente na área, são propostas algumas linhas de desenvolvimento.

1. Introdução

Um dos problemas basilares da Astronomia é o entendimento dos processos de formação e evolução do Sistema Solar e, de um modo mais geral, dos sistemas planetários que vêm sendo descobertos ao redor de outras estrelas e de pulsares. As várias missões espaciais, a evolução das técnicas astrofísicas, a descoberta de planetas ao redor de outras estrelas e de pulsares, a descoberta de meteoritos peculiares carregando compostos orgânicos e mesmo possíveis traços de vida, tem evidenciado uma diversidade antes insuspeitada e revelado a complexidade dos fenômenos envolvidos.

A resposta a muitas dessas questões passa pelo estudo dos pequenos objetos do Sistema Solar os quais, devido à pequena massa, foram pouco alterados após sua formação. Corpos maiores, como planetas e grandes satélites exibem traços evidentes de evolução térmica, química e tectônica, devidas principalmente ao calor gerado no processo de sua acreção e por processos radiogênicos. Por outro lado, os cometas, os TNO e os asteróides por terem permanecido pequenos são corpos que devem ter guardado memória dos processos cosmogônicos podendo, portanto, fornecer dados importantes sobre a formação dos planetas e a evolução primordial do nosso Sistema Solar.

Os cometas são objetos que se acredita terem sido formados nas regiões externas do Sistema Solar, alguns permanecendo no que é chamado de *Cinturão Transnetuniano* (entre 40 e 1000 U.A.) e outros na *Nuvem de Oort* a uma distância superior a 10^4 U.A. Estatísticas recentes revelam que a população da Nuvem de Oort deve conter entre 10^{12} e 10^{13} cometas com uma massa total entre 14 e 100 Massas Terrestres. Os *Centauros*, cruzadores das órbitas dos planetas exteriores, seriam objetos em transição entre o Cinturão Transnetuniano e o

Sistema Solar interior. Todos esses objetos, por terem se formado e permanecido a maior parte do tempo nas regiões mais frias do Sistema Solar, são considerados os mais primitivos já que os materiais da formação devem ter se mantido congelados. A observação de cometas é, entretanto, complexa já que enquanto distantes tem brilho muito baixo e, portanto são difíceis de serem observados. Por outro lado, quando se aproximam do Sol seus componentes superficiais são volatilizados aumentando a área de reflexão da luz solar e, conseqüentemente, seu brilho, mas essa coma esconde seu núcleo à observação.

Quanto aos asteróides, são pequenos corpos divididos entre o *Cinturão Principal* (MB), localizado na região entre Marte e Júpiter, os *Near Earth Objects* (NEO), cruzadores das órbitas dos planetas interiores, e os *Troianos*, que estão na mesma órbita de Júpiter. A distribuição dos objetos no Cinturão Principal foi modelada por ressonâncias com Júpiter em regiões de concentrações e lacunas. Além destas estruturas, existem outras concentrações visíveis apenas através de elementos próprios, ou seja, elementos orbitais não afetados pelas perturbações planetárias. Estas concentrações, que seriam resultado da fragmentação de um corpo por uma colisão catastrófica, são chamadas *famílias* exatamente para diferenciá-las dos agrupamentos devidos a outros processos dinâmicos. Por acreditar-se que os asteróides do cinturão principal estão localizados aproximadamente nas regiões de sua formação, seu estudo constitui a base de nosso entendimento das variações espaciais nos estágios finais da formação do Sistema Solar.

O estudo dos cometas, dos TNO e dos asteróides torna-se, portanto, a base para se determinar algumas das condições de contorno necessárias para os modelos teóricos de formação do Sistema Solar. Entre as condições de contorno que podem ser obtidas do estudo dos pequenos corpos podemos citar: gradientes de temperatura, processos térmicos ocorridos ao longo de 4.5 bilhões de anos (tempo de vida do Sistema Solar), extensão dos processos colisionais na região entre 2.5 e 5 UA e tempos necessários entre a formação objetos completamente diferenciados como Vesta e sua desintegração por colisão catastrófica.

2. Principais questões científicas em aberto

O estudo das várias populações de pequenos corpos do Sistema Solar visa entender os processos físicos básicos ocorridos desde sua formação. Tenta-se abordar o problema em seus diversos aspectos: o estudo observacional destes corpos, sua classificação tanto do ponto de vista dinâmico quanto físico-químico e, finalmente, a definição do papel dos diferentes processos físicos, tais como térmicos, gravitacionais e colisionais para sua formação e evolução. Entre as principais questões científicas que precisam ser respondidas podemos mencionar:

- *Qual o gradiente de composições no Cinturão Principal nos estágios iniciais da formação planetária?*
 - Quais as propriedades físicas dos asteróides? Como os processos que modificam suas superfícies interferem em nossa capacidade de determinar sua composição? Qual o tamanho da população e sua distribuição de composições? É possível obter os gradientes térmicos do Sistema Solar primordial a partir da composição dos asteróides? Como a dinâmica e as colisões modificaram essa estrutura primordial? É possível que TNO tenham sido “implantados” na parte externa do cinturão e que os asteróides diferenciados tenham vindo da parte mais interna do Sistema Solar?
- *Quais os asteróides que se originaram de um mesmo corpo progenitor e qual a distribuição original desses progenitores?*
 - Quantas famílias existem e quais seus membros do ponto de vista dinâmico? Quais desses membros dinâmicos também possuem uma geoquímica compatível com uma origem única? Quais famílias de asteróides estão localizadas em locais

- favoráveis ao transporte de fragmentos para a Terra? Quais dessas famílias estão representadas em nossas coleções de meteoritos?
- *Quais informações sobre os estágios iniciais da formação planetária podem ser obtidas dos asteróides?*
 - Qual a composição e estrutura dos proto-planetos que sobreviveram no Cinturão Principal? Qual sua distribuição original no Cinturão Principal primordial? Que informação sobre a formação e evolução desses corpos é fornecida pelos meteoritos? Quais meteoritos são representativos da população primordial?
 - *Quais as principais características individuais dos asteróides?*
 - Como funcionam os processos térmicos tais como a diferenciação, o magnetismo, o vulcanismo e a alteração aquosa? Quais as características dos asteróides ricos em água ou hidratados? Quais as características dos asteróides basálticos? Quais as similaridades e diferenças entre os MBA e os NEO de mesmo tamanho? Os NEO podem ser considerados representativos de todos os MBA pequenos? Quais as densidades dos grandes asteróides e dos membros das famílias? Quais os principais processos que atuam na superfície dos pequenos corpos? Como esses processos variam com a composição, a gravidade e a distância ao Sol?
 - *Qual é a distribuição de composições entre os NEO?*
 - A distribuição de composições da coleção de meteoritos na Terra é similar a dos NEO? Como levar em conta os efeitos de seleção na amostra? Como o interperismo espacial pode mudar a distribuição observada?
 - *Qual o intervalo de variação das propriedades físicas dos NEO e como eles evoluem?*
 - Qual a distribuição de tamanhos da população? Qual a distribuição de períodos e direções de rotação? A estrutura interna dos NEO é de fragmentos reacumulados ou monolíticos?
 - *De quais regiões específicas se originam os NEO e qual é seu destino final?*
 - A maioria dos NEO tem origem no Cinturão Principal? De sua região mais interna ou de todo o Cinturão? Qual a probabilidade de colisão com a Terra e os planetas interiores?
 - *Quais as principais propriedades físicas dos TNO?*
 - Qual a distribuição de tamanhos e como esta muda para tamanhos menores? Quais processos físicos dominam essa distribuição? Quais as massas e densidades dos TNO? Grandes colisões podem ter modificado a estrutura interna e rotação desses objetos? Quantos TNO estão em sistemas múltiplos e como estes se formaram? Como e quando a atividade cometária se inicia nos Centauros e como esta difere daquela observada em cometas no Sistema Solar interior?
 - *Qual a composição dos TNO?*
 - Qual a principal composição dos TNO e como os materiais observados em suas superfícies refletem essa composição? Quais as cores e albedo destes objetos? Qual a abundância relativa de voláteis e de gelo de água? Como a composição muda em função de outras propriedades dos objetos? Como o material rochoso e os gelos se misturam no interior dos corpos e a qual profundidade? Como os diferentes gelos se misturam? Porque os TNO da população clássica fria aparentemente se diferenciam dos demais? Como os gradientes de composição na nebulosa solar e no disco proto-planetário influenciaram as propriedades finais dos TNO?
 - *Que processos físico-químico afetaram os TNO e como?*
 - Quanto a composição original influenciou as cores e espectros que observamos atualmente? Quais os processos dominantes que teriam mudado essas variáveis? Diferenças na luz refletida podem nos indicar diferentes histórias evolutivas? O que causa variações de cor entre objetos de um mesmo subgrupo dinâmico? Onde

estão os orgânicos nos TNO? Porque orgânicos são observados em algumas superfícies e não em outras? Essa diferença é primordial? Como a exposição aos raios cósmicos pode mudar as misturas originais de gelos e orgânicos? Como as colisões atuam? Existe uma origem comum para todo o material extremamente avermelhado no Sistema Solar?

- *Qual a estrutura dinâmica na região dos TNO?*
 - Qual o tamanho relativo das populações dos objetos ressonantes, dos objetos clássicos frios e quentes e dos objetos espalhados? Como evoluem as orbitas dos TNO? Como a migração planetária afetou a massa inicialmente presente na região? Quais os caminhos dinâmicos para os TNO se tornarem Centauros e cometas da família de Júpiter? Qual a eficiência desses caminhos? Qual a frequência de captura de Centauros pelos planetas gigantes? As colisões podem ter mudado a estrutura da região?
- *Como o Sistema Solar se formou a partir da nuvem proto-planetária?*
 - Quais as condições físico-químico na nebulosa e qual a natureza do material sólido presente? Qual o papel da mistura de materiais na formação planetária? Os núcleos cometários se formaram como uma aglomeração de gelo amorfo de água e poeira? Este gelo ainda existe no interior de um cometa que entra no Sistema Solar interior? Este gelo é o responsável pela atividade cometária observada? Qual o papel dos processos de fragmentação e colisão na formação dos núcleos cometários?
- *Qual a história dos componentes voláteis e orgânicos no Sistema Solar?*
 - O gelo amorfo de água pode ter sido o responsável pela captura de voláteis nos gelos cometários?
- *Os cometas podem ter sido os responsáveis pela presença de água nos planetas?*
 - Qual o papel dos cometas no transporte de água até os planetas? Como isso pode ser extrapolado para entender a evolução de planetas habitáveis em sistemas extrasolares?
- *Como a química observada nos cometas pode ser relacionada ao local de formação ou ao processamento posterior?*
 - Qual o papel desempenhado pelos diversos processos evolutivos? Qual a estrutura física detalhada dos cometas? Como esta se relaciona com os mecanismos de atividade cometária?

3. Necessidades da área

A comunidade da área de ciências planetárias tem requisitos específicos de instrumentação e operação de telescópios na Terra os quais são distintos daqueles para a astrofísica estelar e extragaláctica. A distribuição de energia espectral e a composição molecular dos alvos do Sistema Solar requerem observações nas janelas do infravermelho próximo e médio. A variabilidade temporal das propriedades físicas dos objetos do Sistema Solar, incluindo fenômenos imprevisíveis e não-repetíveis, tais como ocultações estelares, atividade de nuvens, “outbursts” cometários, impactos planetários e pequenos corpos passando próximos da Terra, necessitam capacidade de uma resposta operacional rápida e a capacidade para observar fenômenos numa ampla faixa do espectro eletromagnético. Atualmente no mundo existe apenas um telescópio, o NASA Infrared Telescope Facility (IRTF), desenvolvido e operado de forma a atender as necessidades das pesquisas em ciências planetárias.

Os problemas envolvidos no estudo de pequenos corpos incluem a detecção de objetos ainda não conhecidos (e conseqüente aumento da completeza das diferentes populações), a determinação e refinamento das órbitas destes objetos, a determinação de suas propriedades

físicas e composição, o estudo da evolução dinâmica de seus parâmetros orbitais assim como o estudo de objetos específicos. No que segue esses pontos são comentados.

a) Detecção, refinamento de parâmetros orbitais e propriedades físicas

No Brasil, dentro do projeto IMPACTON, está em fase final de instalação o primeiro telescópio dedicado ao estudo das propriedades físicas de pequenos corpos do Sistema Solar. Este telescópio, projetado para trabalhar primeiramente no modo remoto e posteriormente automático, tem como objetivo principal realizar o seguimento e a caracterização das propriedades físicas de objetos potencialmente perigosos para a Terra e de pequenos corpos em geral. Três aspectos inovadores do telescópio deste projeto merecem ser destacados: 1) é o primeiro no Brasil dedicado a um projeto científico específico, 2) é o primeiro do porte de 1 metro, totalmente automatizado e que vai operar de forma remota, 3) é o primeiro no Hemisfério Sul a realizar monitoramento e caracterização física de asteróides potencialmente perigosos para a Terra. O projeto contou com financiamento (através de chamada pública) da FINEP, CNPQ e FAPERJ, além de recursos do MCT e do Governo do Estado de Pernambuco. A instalação do telescópio no semi-árido brasileiro (Itacuruba, Pernambuco) tem como principal vantagem a grande quantidade de noites abertas possibilitando observações contínuas praticamente o ano todo. Por outro lado, a relativamente pequena abertura do espelho principal (1m) vai permitir realizar apenas observações fotométricas. Essas serão utilizadas tanto para a determinação da órbita dos objetos quanto para a determinação de suas propriedades rotacionais. As propriedades superficiais, por outro lado, serão obtidas da análise de imagens em diversos filtros. Por este motivo o telescópio deverá também servir para selecionar alvos interessantes para serem observados espectroscopicamente em telescópios de maior porte, como o SOAR e o Gemini. Ao mesmo tempo, será possível realizar observações simultâneas quando das observações em outros telescópios o que é de fundamental importância para os estudos composicionais.

b) Determinação de Composição

A questão da determinação de composições de pequenos corpos é peculiar, em relação a problemas semelhantes em astrofísica, porque as bandas de absorção geradas pela interação da luz solar com gelos e silicatos são em geral muito largas (da ordem de 0.2 microns ou maiores). Outro complicador é que as bandas diagnósticas de composição das espécies minerais mais comuns se encontram altamente sobrepostas. Por fim, o comportamento do contínuo também é um fator relevante na determinação da composição. Como resultado da combinação destes fatores, a determinação remota da mineralogia dos pequenos corpos requer espectros de baixa dispersão que cubram de forma contínua uma faixa que vai do visível ao infra-vermelho próximo. Dos instrumentos (atualmente disponíveis ou previstos) dos telescópios Gemini e SOAR, nenhum é capaz de realizar este tipo de observação. A falta de um instrumento com tal capacidade instalado em telescópios acessíveis à comunidade brasileira limita seriamente as possibilidades de pesquisa nesta área.

Uma maneira de preencher esta lacuna seria a construção de um instrumento que contemplasse este modo de observação. Tal instrumento seria particularmente adequado para o SOAR, para o qual, até o momento, não há previsão de espectrógrafos no NIR entre os instrumentos de segunda geração, e atenderia também as necessidades de outras áreas, como a astronomia estelar e extra-galáctica. Este instrumento poderia ser inicialmente proposto como instrumento visitante. Os instrumentos mais adequados a este tipo de estudos, atualmente em operação no mundo, são o SPeX, operando do telescópio de 3 m da NASA Infrared Telescope Facility (IRTF), no Havaí, e o NICS/Amici, instalado no Telescópio Nazionale Galileo (3.6 m) nas Ilhas Canárias. Portanto, um instrumento com tal capacidade seria único no hemisfério Sul, contribuindo também para a capacidade de barganha da comunidade brasileira como um todo, estimulando a cooperação internacional e intercâmbio de pesquisadores. Um primeiro passo

para a construção de um instrumento semelhante seria o comissionamento de um estudo de viabilidade.

c) Evolução dinâmica e colisional

A compreensão dos fenômenos físicos e da história evolutiva dos pequenos corpos do Sistema Solar não estaria completa se não fossem levados em conta também os processos dinâmicos e colisionais que afetaram e afetam a estes corpos. Estudos dinâmicos servem de subsídio aos outros tipos de estudos pois permitem entender como as diversas populações de pequenos corpos se redistribuem ou migram entre as diferentes regiões do Sistema Solar. Já os estudos colisionais são relevantes para entender a distribuição de tamanhos dos corpos e, principalmente, a sua estrutura interna e a forma em que eles se quebram.

A principal limitação destes estudos é que eles só podem ser desenvolvidos através de modelos que requerem, na maioria dos casos, de recursos computacionais avançados ou sofisticados. Os modelos de evolução orbital comumente envolvem a interação gravitacional direta de dezenas de milhares de corpos que só podem ser tratados com algoritmos de computação distribuída em “clusters” de várias centenas de processadores. Soma-se a isto o fato de que os intervalos de tempo típicos destas simulações podem variar de milhões a bilhões de anos, com a conseqüente demanda de tempo de cômputo. Os modelos colisionais combinam algoritmos hidrodinâmicos envolvendo milhões de partículas com sofisticados códigos de árvore para o tratamento das interações gravitacionais, e a sua implementação requer de códigos paralelizados rodando também em “clusters”.

Assim, os desafios nesta área implicam por um lado obter o acesso aos recursos tecnológicos necessários, que ainda são incipientes no Brasil, e por outro a capacitação de recursos humanos para desenvolver modelos mais eficientes e seus respectivos algoritmos.

d) Observações “In Situ”

Paralelamente às observações terrestres com instrumentos específicos para a determinação da mineralogia superficial dos pequenos corpos, nos últimos anos tem sido crescente o desenvolvimento da pesquisa “in situ” destes objetos, através do envio de naves espaciais equipadas de instrumentos para observação/medição dos mais diversos parâmetros físicos, e determinação de características individuais, abordando diversas das questões científicas em aberto acima citadas. Estas missões espaciais têm avançado em sofisticação em têm almejado, além das medidas físicas, também o retorno de amostras para análise em laboratório. A participação da comunidade brasileira de Ciências Planetárias em tais missões iniciou-se com uma participação na escolha dos asteróides da missão Rosetta, que atualmente se encontra a caminho do cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, passando antes pelos asteróides Lutetia e Steins. Seguimos com parcerias científicas na missão Dawn, cujos alvos são dois asteróides do cinturão principal, a saber, Ceres e Vesta, realizando observações de suporte para a missão. Finalmente, recentemente temos mostrado nosso interesse na participação na missão Marco Polo cujo objetivo é visitar um asteróide primitivo trazendo de volta para a Terra amostras do mesmo.

Entretanto, a participação brasileira em missões espaciais não deve continuar apenas no âmbito da análise final dos dados, mas almejamos a participação no planejamento de missões em colaboração com as agências espaciais NASA, ESA e JAXA. Isso deve ser possível tornando-nos parceiros diretos nos consórcios para envio de futuras naves e assim influenciando na tomada inicial de decisões, escolha de alvos e instrumentação, e eventualmente, na construção dos próprios instrumentos. Acima de tudo, a participação brasileira nas missões espaciais para corpos do sistema solar favorecerá a formação de recursos humanos no setor tecnológico-espacial, ampliando o atual leque que está restrito ao controle de satélites artificiais.

4. Conclusões

Um esforço sistemático para a consecução de projetos dedicados aos tópicos de estudos detalhados no item anterior exige não só a formação de grupos de pesquisa sólidos, capazes de produzir um referencial teórico para o trabalho e os programas de análise necessários, como também pressupõe a ampliação das instalações disponíveis para as observações. Serão os resultados desse trabalho contínuo que permitirão ampliar a participação futura nas observações *in situ* e na interpretação dos dados das missões espaciais.

O estabelecimento de um plano de trabalho de longo prazo para o estudo de pequenos corpos deve estar pautado em dois eixos prioritários. O primeiro diz respeito à continuidade e consolidação das linhas de pesquisa atualmente em curso, visando a massa crítica necessária para a abordagem dos desafios científicos da área. O segundo, vislumbra as oportunidades de participação em programas internacionais e missões espaciais.

Essencialmente, a prioridade deve estar centrada na estabilidade dos programas, na garantia de atendimento e permanência dos investimentos:

- na formação e ampliação de grupos de pesquisa, através de concursos públicos e de bolsas de pesquisa e de pós-graduação. Treinamentos específicos e visitas técnicas também devem ser atendidos por meio de auxílios de curta-duração;
- em tempo e instrumentos para observações. Isso é fundamental para consolidar os estudos atuais de propriedades físicas dos pequenos corpos e investir em planos de trabalhos que se debrucem sobre as questões específicas ainda em aberto nas ciências planetárias;
- em programas de parcerias para construção de instrumentos e participação em missões espaciais.