

“WHITE PAPER” encaminhado à Comissão Especial de Astronomia do MCT

Ultra High Accuracy Radial velocity Planet Searcher (U-HARPS-Brasil) e a busca por planetas extra solares de pequena massa

J.R. De Medeiros, J.D. do Nascimento Jr., B.L. Canto-Martins, D.B. De Freitas, E. Janot Pacheco, S. Ferraz-Mello, C. Lage, J.R.P. da Silva, V. Parro, F. Fialho, M. Pereira, P. Pope, C. A. Torres, L. Silva, J. R. De La Reza, G.F. Porto de Mello, A.C. Miranda, C. Chesman
INESPAÇO / Departamento de Física / Universidade Federal do Rio Grande do Norte

S. Udry

Observatoire de Genève

N. Santos

Centro de Astrofísica da Universidade do Porto

C. Melo

European Southern Observatory

A. Silva

Universidade Mackenzie

S.H.P. Alencar

Departamento de Física / Universidade Federal de Minas Gerais.

Resumo

U-HARPS-Brasil é um espectroscópio dedicado essencialmente à procura de planetas extra solares através da técnica de medidas ultra precisas de velocidade radial. O U-HARPS-Brasil será montado em um telescópio da classe 4 a 10 metros. O programa chave será a busca por planetas, caracterização e “follow-up” de missões espaciais tais como CoRoT, PLATO, KEPLER e GAIA. O U-HARPS-Brasil estará disponível à comunidade astronômica brasileira para uma grande variedade de outros programas observacionais em diferentes domínios. Um instrumento deste porte representa uma oportunidade única de transpor os limites da instrumentação existente atualmente e compor uma grande base de dados capaz de testar as novas teorias de formação de planetas em torno das estrelas. Tal proposta traz uma efetiva possibilidade de levar o Brasil a uma situação realmente competitiva no cenário científico e tecnológico internacional.

1 Introdução

Nos últimos anos a comunidade brasileira tem demonstrado uma necessidade crescente de um instrumento capaz de agregar características de alta resolução e grande cobertura espectral. Por outro lado, a busca por sistemas planetários extra solares é um tema que tem recebido crescente atenção internacional, figurando com destaque nos planos decenais americano e europeu para a próxima década (Astro2010 Decadal Survey - http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810 e Astronet - <http://www.astronet-eu.org/>). Atendendo à solicitação da CEA/MCT, estamos propondo a construção no Brasil de um espectroscópio de tipo HARPS, operando porem com uma altíssima (ultra high accuracy) precisão na medida da velocidade radial da ordem de alguns cm/s. Tal projeto terá coordenação e desenvolvimento na UFRN em colaboração com diversas instituições brasileiras (UERN, UFRJ, USP) e parceria com o Observatório de Genebra que é hoje o líder mundial na tecnologia de detecção de exoplanetas através da técnica de medidas ultra precisas de velocidade radial. A principal motivação

deste projeto está baseada no fato que, nos próximos 15 anos, a busca por planetas extra-solares ainda será dominada por instrumentos baseados na técnica de medidas de velocidade radial com alta precisão, sobretudo para a detecção de planetas extra-solares rochosos (isto é, pequenos, com massas menores do que uma dezena de massas terrestres). Estes planetas de baixa massa exigem importante investimento em tempo de telescópio e seu estudo envolverá certamente forte atividade científica na próxima década. Tal proposta traz uma efetiva possibilidade de levar Brasil a uma situação muito competitiva no cenário científico e tecnológico internacional. O U-HARPS-Brasil^a será montado num telescópio de 4 a 10 metros com um número fixo de noites dedicados ao programa principal: a busca por exoplanetas, e a caracterização e follow-up de missões espaciais tais como CoRoT, PLATO, KEPLER e GAIA. O U-HARPS estará também disponível à comunidade astronômica brasileira para uma grande variedade de programas observacionais em diferentes domínios (cf. abaixo). Um instrumento mais evoluído que o HARPS representa uma oportunidade única de transpor os limites atuais da instrumentação e compor uma grande base de dados capaz de testar as novas teorias de formação de sistemas planetários.

2 Por que um HARPS de ultra alta resolução na casa dos cm/s ?

O projeto HARPS[1] foi baseado numa readaptação do design dos instrumentos ELODIE[2] e CORALIE, os quais alcançaram extremo sucesso. O projeto HARPS foi concebido com a idéia de evitar **qualquer risco de desenvolvimento do projeto do ponto de vista técnico-organizacional**. Em geral, foram adotadas soluções conservadoras durante o processo de construção, as quais resultaram numa precisão em termos de velocidades radiais até então não alcançadas. Durante todo o processo de desenvolvimento do instrumento, tentou-se minimizar os modos e funções do instrumento focalizando-se no objetivo científico principal do HARPS (procura por planetas extra solares através da técnica de medidas de velocidades radiais precisas, da ordem de 1 m/s). Tal técnica é atualmente limitada principalmente pelo erros instrumentais e pelo ruído de fótons.

Importantes características do U-HARPS:

- Espectrógrafo echelle de dispersão cruzada, alimentado a fibras
- Grande cobertura spectral no visível (380 a 690 nm)
- Duas fibras, sendo uma para o objeto e outra de referencia, alimentando o espectrógrafo com a luz proveniente do telescópio.
- Mosaico de 4 CCDs, onde são formados dois espectros do tipo echelle.
- Resolução spectral $R=90000$
- Pacote de redução de dados extremamente robusto e eficiente, não necessitando de nenhum modelo do perfil instrumental.
- Redução dos dados completamente online; e resultados disponibilizados logo após as exposições-
- Técnica baseada num sistema de referencia de ThAr capaz de remover qualquer tendência (drifts) instrumental nos dados de velocidade radial.

O U-HARPS-Brasil difere da primeira geração do HARPS principalmente devido ao fato de alcançarmos velocidades radiais de longo período com precisão da ordem de alguns cm/s. De fato o U-HARPS será uma versão Ultra precisa do espectrógrafo HARPS que utilizará o *know-how* da técnica de determinação de velocidades radiais precisas já comprovada na primeira geração do HARPS, sem concorrentes em precisão em velocidades radiais. A literatura [3] estima que centenas de estrelas com planetas da ordem de 1-10 massas terrestres podem ser detectados num período de 5 anos com um instrumento do tipo U-HARPS, propiciando assim um importante teste para os modelos de formação e evolução dos sistemas planetários.

^a O projeto U-HARPS/Brasil é parte das ações estratégicas da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, em Ciência e Tecnologia, para o quinquênio 2010/2015.

3 U-HARPS: Justificativa científica

3.1 A busca por planetas extra-solares e sua caracterização: follow-up da missão PLATO

A busca por planetas tem passado por momentos extraordinários no final dos anos 90. Pode-se citar a descoberta da primeira componente sub-estelar, a anã marrom Gliese229B [4,5], a detecção indireta através de observações a partir do solo de um planeta com a massa de Júpiter orbitando a estrela 51Peg [6], seguido pela descoberta de dois novos planetas gigantes extra-solares pelo grupo do Lick observatory [7,8]. Atualmente, existem mais de 450 planetas extra-solares descobertos (<http://exoplanet.eu/>) os quais, pela grande variedade de propriedades e características [9, 10], oferecem um novo desafio para a ciência moderna. Em geral, **os corpos observados são muito diferentes dos planetas do sistema solar**. Tais descobertas abriram questões inesperadas sobre o processo de formação e evolução planetária. Os planetas descobertos recentemente possuem massas cada vez menores, desde de apenas 1 ordem de grandeza maior que a da Terra [11, 12] até massas semelhantes a do nosso planeta [14, 24, 25]. Por outro lado, alguns desses planetas são gigantes, com massas 15 vezes maiores que a massa de Júpiter [13]. Desde o final dos anos 90, a massa dos planetas descobertos diminuiu de 150 M_{\oplus} em 1995 para 1.9 M_{\oplus} em 2009 (Figura 1). Este impressionante histórico de sucesso está fortemente ligado aos avanços realizados nas técnicas de medida de velocidade radial.

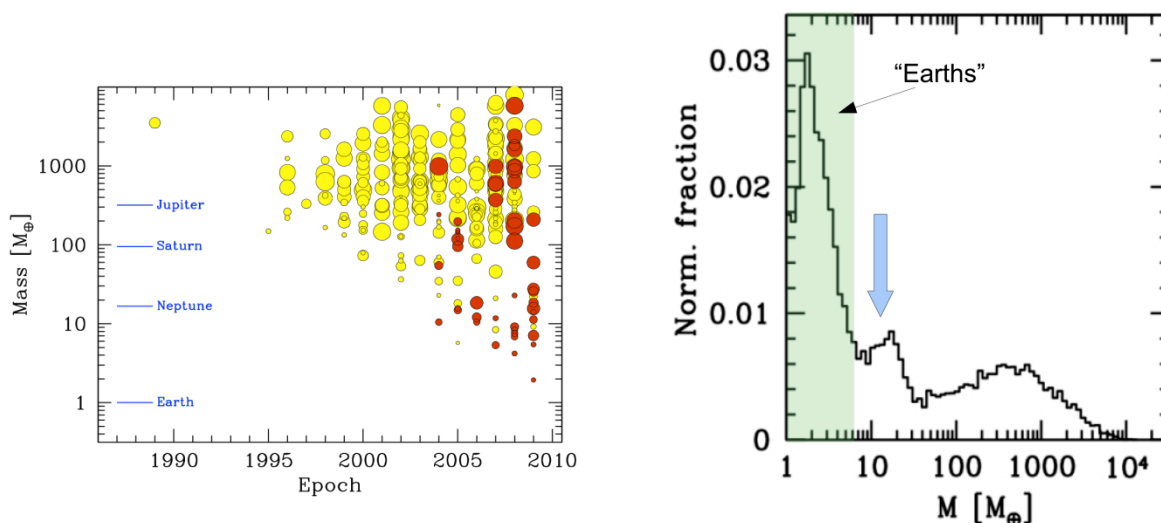


Figura 1(esquerda). Evolução da sensibilidade instrumental na detecção de planetas através do efeito Doppler (velocidade radial precisa) em função do tempo. O tamanho dos círculos é proporcional ao período orbital. A massa dos planetas é conhecida como $m_2 \sin i$. A natureza do objeto detectado em 1989 (HD114762) permanece ainda incerta, porém possui 15 massas de Júpiter. Em vermelho estão indicados os planetas encontrados com o HARPS, última geração de instrumento espectroscópico baseado em técnicas precisas de efeito Doppler [15].

Figura 2 (direita). Predições teóricas das distribuições planetas. A maior parte da formação está concentrada em corpos com massas abaixo de 10 massas terrestres. A instrumentação atual tem explorado somente a região entre 15 e 150 massas terrestres.

O distribuição do período orbital em função da massa indica uma não-completude devido a um viés na detecção dos sistemas com longos períodos e baixa massa. A síntese de população de planetas usando um cenário do tipo acreção (core-accretion cenário) sugere atualmente que, apesar do tremendo avanço técnico conseguido nos últimos tempos, estamos somente sondando a ponta do iceberg das possíveis populações de planetas existentes na Galáxia. (Figura 2 e as referências [16],[17]).

Além de observações do solo, os últimos anos foram marcados por diversas missões espaciais desenvolvidas com o intuito de detectar e caracterizar novos sistemas planetários, dentre as quais podemos destacar as missões CoRoT e KEPLER. Para um futuro próximo são anunciadas as missões PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of

stars), ao qual o Brasil está associado, e GAIA, da qual fazem parte brasileiros.

O Brasil participa formalmente desde o início da missão espacial CoRoT (agora estendida até 2012) e é membro formal do consórcio que está desenvolvendo e irá operar a missão espacial PLATO (o super CoRoT). O PLATO é uma das missões selecionadas até agora pela ESA, dentro de um dos seus programas centrais 'Cosmic Visions', com o objetivo de detectar e caracterizar planetas extra solares através da assinatura de trânsitos e medir oscilações sísmicas das estrelas centrais, com o intuito de compreender as propriedades dos sistemas planetários. PLATO é a grande destaque da próxima geração dos instrumentos especializados na busca por planetas, construído para suceder as missões CoRoT e Kepler. O estudo da evolução dos sistemas planetários não pode ser considerado como algo isolado, sem levar em consideração a evolução estelar. Não podemos igualmente entender como os planetas são formados e como eles evoluem sem o conhecimento da formação e evolução estelares. Não podemos caracterizar bem um sistema planetário sem antes caracterizar precisamente sua estrela central. A filosofia básica por trás da missão PLATO é estudar precisa e completamente o sistema planetário como um todo, i.e., a estrela e o planeta observados com o mesmo instrumento e a mesma técnica. Os principais objetivos desta missão serão:

- Observar uma base significativamente maior de estrelas que as missões anteriores.
- Observar planetas extra solares significativamente menores, orbitando estrelas em fases bem definidas da evolução.

U-HARPS e as observações complementares da missão PLATO: *follow-up*

Tendo em vista a recente aprovação do PLATO na penúltima instância pela ESA, é notório o fato que ainda faltam facilidades observacionais sólidas para o *follow-up* da missão, em particular no campo da espectroscopia de alta resolução. Considerando que uma das metas do PLATO é a busca por planetas do tipo da Terra ou menores, um espectrógrafo com precisão da ordem de poucos centímetros/segundo em velocidade radial passa a ser vital para o sucesso da missão. A espectroscopia infravermelha durante o trânsito secundário também poderá oferecer as condições necessárias para a determinação das características físicas da atmosfera dos referidos planetas. Em suma, para os trânsitos planetários obtidos através de observações no espaço, as observações em solo representam um passo crucial na determinação e esclarecimento da natureza do evento e conseqüentemente na medida precisa da massa do planeta. Um exemplo deste processo pode ser visto na descoberta do sistema planetário Corot-7, ilustração perfeita da sinergia entre as observações no solo (que fornecem as massas) e no espaço (que determinam raios), e que levaram a descoberta do primeiro exoplaneta rochoso, via medida de sua densidade (cf. abaixo).

3.2 Detecção de planetas

Detecção de pequenos planetas rochosos de curto período: Em busca de novas Terras

A detecção de sistemas planetários de pequena massa será um dos esforços observacionais de destaque do U-HARPS-Brasil. A combinação de um espectrógrafo de ultra alta resolução na região do visível e um telescópio de 4 a 10 metros dedicado produzirá resultados consideráveis nesta direção. Além do mais, o estudo da dinâmica de sistemas planetários (atividade desenvolvida atualmente no Brasil) necessita de um acompanhamento a longo prazo associado a novos desenvolvimentos teóricos. Neste sentido, o novo instrumento colocará em evidência os efeitos seculares (p. ex., a excentricidade) podendo também necessitar de medidas dedicadas e pontuais para objetos pré estabelecidos. (para efeitos da circularização).

Além dos desafios técnicos para alcançar e manter durante anos uma precisão abaixo de 1 metro/segundo, o HARPS produziu diversos resultados sobre novas fontes de ruídos intrínsecos na luz emitida pelas estrelas (oscilações estelares, atividade magnética, pulsação e granulação) [20]. Todos esses fenômenos introduzem variabilidade na curva da velocidade de rotação, que depende do tipo espectral, da taxa de rotação e da idade da estrela observada. Uma nova geração de espectrógrafos ultra-estáveis, permitirá atingir-se uma precisão capaz de detectar análogos

terrestres em órbitas menores do que a nossa. O sistema planetário em torno da estrela CoRoT-7 é um exemplo da dificuldade envolvida na detecção dos planetas tipo Terra devido ao grande número de fontes de ruído [24, 25]. Esse sistema é formado de pelo menos dois planetas com massas comparáveis à da Terra: cerca de 5 e 8 massas terrestres para CoRoT-7b (Per. = 20 hs) e 7c (Per. = 3,7d), respectivamente, sendo que a densidade do primeiro é semelhante à terrestre. A medida dessas massas com o HARPS necessitou de 106 observações durante 4 meses, totalizando 70 horas. Ou seja, a detecção de pequenos planetas exige a obtenção de um grande número de observações. Simulações mostram que para detectar planetas da ordem de 1.5 massas terrestres com parâmetros físicos similares ao do sistema solar em torno de estrelas de tipo espectral anãs K, necessitam-se 3 medidas de velocidade radial por noite. O objeto deve ser re-observado a cada três noites. Em seguida, quando o conjunto de dados é integrado sobre 10 noites de observação o movimento orbital do planeta é detectado. No caso clássico de uma observação por noite, apenas o ruído é observado.

Existe um grande número de planetas no intervalo massa-período abaixo de 5-10 massas terrestres (cf. Figura 2) que somente agora começam a ser descobertos pelos novos instrumentos. Encontrar e caracterizar planetas pequenos é uma tarefa titânica, que requer: i) alcançar estabilidade instrumental a níveis de poucos cm/s; e ii) encontrar estratégias para tratar eficientemente os ruídos fotométricos e estelares. Ambos podem ser alcançados montando um espectrógrafo estável do tipo U-HARPS-Brasil em telescópios de porte médio a grande (4 – 10 metros) onde uma quantidade considerável de tempo observacional possa ser destinada. Tipicamente, uma campanha para procurar planetas do tipo terrestre requer aproximadamente 150 noites por ano.

Deteção de planetas em torno de estrelas em diferentes tipos e estados evolutivos.

Tendo em vista a maior precisão do U-HARPS-Brasil em relação ao HARPS nas medidas de velocidade radial, várias aplicações complementares podem ser desenvolvidas com tal instrumento. Desde a detecção de planetas em torno de estrelas gigantes até a busca de planetas em estrelas anãs marrons e estrelas anãs massivas. No que concerne a busca de planetas em torno de estrelas evoluídas, o grupo de Natal tem apresentado importantes resultados nos últimos anos [22,23]

Follow-up com velocidade radial das estrelas candidatas a transitos.

A observação contínua (follow-up) com a técnica de medidas de velocidades radiais de objetos candidatos a mostrarem transitos planetários tem se mostrado uma importante aplicação atualmente, e que se encontra em plena expansão. Os programas de busca de planetas a partir dos telescópios terrestres necessitam de follow-up intensivo. Os programas deste tipo certamente se desenvolverão muito mais num futuro próximo, com os dados produzidos por CoRoT, KEPLER e PLATO, e o U-HARPS atenderá a esta demanda.

3.2 Projeto complementares:

Vários projetos científicos complementares e desenvolvidos em torno da ciência da busca por planetas tornam-se cada vez mais importantes, como por exemplo o efeito Rossiter-McLaughlin, cuja detecção é fortemente favorecida por observações espectroscópicas com um instrumento do tipo U-HARPS-Brasil, bem como a análise detalhada da rotação de PMS no contexto da formação planetária.

Outros estudos importantes sobre exoplanetas se beneficiarão fortemente da utilização de um espectro echelle de altíssima resolução, que permita obter medidas extremamente precisas de velocidade radial.

3.3 Outras aplicações astrofísicas inéditas: alguns exemplos

- Asterossismologia de alta precisão: estudos velocimétricos de baixa amplitude e consequente sismologia com precisão solar; determinação com precisão inédita de parâmetros fundamentais (Teff, abundâncias) de alvos sismológicos do CoRoT, KEPLER e PLATO; determinação precisa de idades estelares
- Follow-up dos objetos da base de dados do GAIA: determinação de parâmetros físicos
- Análise química ultra precisa de estrelas, inclusive com determinação de razões isotópicas
- Estudo detalhado da estrutura de bandas interestelares
- Estudos detalhados de velocidades radiais e da rotação estelar: evolução na MS e suas consequências em termos da física interna; determinação precisa de massas em binárias cerradas, rotação e formação planetária; calibração precisa da relação PxD de Cefeidas e o avanço na compreensão da estrutura e dinâmica da Galáxia; rotação e atividade estelar
- Tomografia Doppler de altíssima resolução de binárias e de estrelas ativas: atividade estelar

4 Conclusões

Devido à grande necessidade de tempo de telescópio, a procura por planetas do tipo terrestre é atualmente limitada, num telescópio da classe de 4 metros, e uma pequena amostra de 20 a 50 objetos composta por estrelas com baixa variabilidade (quiet stars). Na prática, uma equipe ou consórcio é principalmente limitado pela quantidade de tempo de telescópio disponível. A construção de um instrumento do tipo U-HARPS-Brasil e sua montagem num instrumento de 4-10 metros, permitirá uma grande quantidade de tempo de observação dedicado a procura de pequenos planetas.

O U-HARPS-Brasil será portanto um importante legado que colocará a comunidade brasileira em posição de destaque num campo muito importante e competitivo da ciência internacional. Um estudo detalhado sobre a exequibilidade do U-HARPS está sendo desenvolvido com financiamentos da UFRN, FAPERN e INESPAÇO. O U-HARPS representa um projeto estratégico da Universidade Federal do Rio Grande do Norte para os próximos cinco anos, no contexto de consolidação e ampliação do seu programa de pós-graduação em astronomia e do desenvolvimento de atividades em mecatrônica, computação e óptica fina.

Apêndice

O programa U-HARPS-Brasil, a ser desenvolvido pela UFRN, em colaboração com a Universidade de Genebra e uma rede de universidades brasileiras, consiste no desenvolvimento de um espectrógrafo, com custo estimado em R\$ 8 milhões e de um telescópio de cerca de 6m de diâmetro, projetado e dedicado unicamente para o experimento U-HARPS-Brasil, com custo estimado em R\$ 10 milhões. Três possibilidades estão sendo estudadas para a construção do observatório que abrigará o referido experimento:

- 1) Um dos picos da região serrana de Rio Grande do Norte, com altitudes de ~ 800m.
- 2) Um dos picos das regiões serranas de Pernambuco, Ceará e Bahia, com altitudes de ~ 1300m.
- 3) Em regiões do Chile onde já existem observatórios astronômicos, incluindo ESO, CTIO e Las Campanas. Neste caso, uma instituição chilena está sendo convidada a analisar a proposta do U-HARPS-Brasil.

Agradecimento

Agradecemos a José Ivonildo do Rego (Reitor, UFRN., reitor da UFRN, pelo fundamental apoio ao U-HARPS Brazil. Agradecemos também a Dra. Lynn Rothschild (Astrobiologia/AMES-NASA/USA), Dra. Annie Baglin (Astrofísica/Observatoire de Paris-Meudon/France), Prof. Nigel J. Mason (Astrobiologia/Open University/England) Dr. Daniel Winterhalter (Exoplanetologia/JPL-NASA/USA), Dr. Claude Catala (Astrofísica/Observatoire de Paris-Meudon/France), Prof. Michel Mayor (Exoplanetologia/Observatoire de Geneve/Suisse) membros do conselho consultivo do INESPACO.

- [1] Pepe, J. et al. 2000, SPIE Proceedings 4008, 582
- [2] Baranne, A. et al. 1996, A&A Supp. Series 119, 373
- [3] Rayner, J. 2007 AAS/AAPT Joint Meeting, American Astronomical Society Meeting 209, Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 38, p.1168
- [4] Oppenheimer et al 1995, Science, 270, 1478
- [5] Nakajima et al. 1995, Nature, 378, 463
- [6] Mayor & Queloz 1995, Nature, 378, 355
- [7] Marcy & Butler 1996, ApJ, 464, L151
- [8] Butler & Marcy 1996, ApJ, 464, L153
- [9] Santos et al. 2005, Science 310, 251
- [10] Udry & Santos 2007, ARAA 45, 397
- [11] Santos et al. 2004, A&A 426, L29
- [12] Udry et al. 2007, 469, L43
- [13] Udry et al. 2002, A&A 390, 267
- [14] Mayor, M. et al. 2009, A&A, em preparação
- [15] Mayor & Queloz 2009, Icarus em preparação
- [16] Benz, W. et al. 2008, Physica Scripta, 130, 4022
- [17] Lovis, C. et al. 2008, IAU Symposium, 253, 502
- [18] Queloz et al. 2009, submetido ao A&A
- [19] Leger et al. 2009, submetido ao A&A
- [20] Mayor, M. et al 2005, The Messenger, 114, 20
- [21] Queloz et al. 2009, A&A, 506, 303
- [22] de Medeiros, J. R. et al., 2009, A&A, 504, 617
- [23] Setiawan, J. et al., 2005, A&A, 437, 31
- [24] Leger, A. et al. A&A 506, 287, 2009