

SOBRE O FUTURO DA FÍSICA SOLAR NO BRASIL

Joaquim E. R. Costa (INPE), Adriana Válio (CRAAM/UPM), C. Guillermo Giménez de Castro (CRAAM/UPM), Paulo J. A. Simões (CRAAM-FAPESP), Fernando Bertoni (CRAAM/UPM), Jean P. Raulin (CRAAM/UPM), Alexandre Andrei (ON), Jucira Penna (ON), Hanumant S. Sawant, Reinaldo R. Rosa (INPE), José R. Cecatto (INPE), Francisco C. R. Fernandez (UNIVAP), Caius L. Selhorst (UNIVAP)

1. Introdução

Devido à combinação da sua extensão territorial e situação geográfica, o Brasil é o terceiro país com maior insolação entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento. Portanto, deter conhecimento da física e atividade solar constitui uma necessidade e vocação natural para o Brasil. É inegável a função vastamente dominante da energia solar nos processos físicos meteorológicos e climáticos, e a significativa importância de utilizar a energia solar para a produção de energia elétrica e motriz. A sinergia entre a física solar e diversas matrizes tecnológicas e agrícolas permitirá compreender e utilizar os dois aspectos citados. Sua importância econômica e sócio-cultural, ao mesmo tempo que é óbvia, pode (e deve) ser muito mais elaborada.

Dentre os maiores investimentos em Astronomia estão três grandes projetos que o Brasil foi pioneiro na sua proposta e execução para a Física Solar: a grande antena do Observatório do Itapetinga (uso parcial para a física solar), o arranjo focal sub-milimétrico solar de El Leoncito (SST) e o arranjo solar interferométrico de 26 antenas (BDA). Os últimos dois telescópios dedicados à pesquisa solar são constituídos por arranjos de receptores únicos em suas bandas de frequência de observação.

Ao longo dessas últimas décadas, centenas de publicações em periódicos indexados foram geradas pelas pesquisas fundamentais para a Física Solar entre estudos do Sol ativo e do Sol quiescente. Vários congressos se realizaram no País e lideranças em cooperações internacionais foram estabelecidas. Experimentos pioneiros na análise de explosões solares observadas com uma antena de 14 m foram realizados pelo Observatório do Itapetinga com resultados sem precedentes publicados pelo conceituado periódico *Nature*. Ferramentas de análise e descrição do ambiente solar com geometrias complexas e fenômenos inéditos resultaram em novos experimentos em altas frequências. Atualmente, as pesquisas concentram-se em um melhor entendimento da atmosfera solar e dos fenômenos transientes. Isso é feito através de estudos teóricos de extrapolação dos campos medidos no nível fotosférico da estrela até níveis cromosféricos e coronais, descrição correta da composição e estrutura da atmosfera solar, além da transferência radiativa e dos mecanismos de emissão. O uso de magnetogramas e análise complementar de imagens obtidas no ultravioleta extremo, visível, raios X, radiação gama (dentre outras bandas) estão inseridos nestas análises.

2. Atividade Solar

Fenômenos solares são em sua maioria manifestações de grande potencial energético que podem produzir perturbações na Terra e seu ambiente próximo. Mantendo o interesse nos fenômenos de pequena escala ou de menor impacto que são pesquisados nesse laboratório de plasma, próximo, a pesquisa solar tem se expandido também aos impactos produzidos no clima espacial. As sociedades tecnológicas, como o Brasil, estão sujeitas a perdas advindas de tempestades solares e outros fenômenos que introduzem erros nos meios de navegação, perdas de comunicação, alteram a segurança de vôo com a presença de cargas de altas energias, entre outros.

Hoje o INPE e o CRAAM contam com uma cobertura espectral muito grande em instrumentos na faixa de rádio dedicados ao Sol. Outros centros de pesquisas tais como ON, Universidade do Paraná e também a UNIVAP contam com pesquisadores realizando estudos importantes do Sol calmo. Além disso, grandes investimentos são feitos na compreensão e previsão de fenômenos geo-efetivos interconectando diversas áreas de pesquisas (aeronomia, geofísica espacial e física solar) num conceito mais geral de heliofísica. Trabalhos de análises de fenômenos transientes e quiescentes do Sol têm gerado publicações importantes para a interpretação e modelagem da nossa estrela.

3. Desenvolvimentos alcançados e Propostas

3.1) Emissão Quiescente

Faixa rádio

O espectro de emissão no contínuo em rádio da atmosfera solar é de natureza térmica e está associado a temperaturas desde 10^3 K a 10^6 K nos comprimentos de onda desde 1 mm até 1m, respectivamente. A região do mínimo de temperatura da cromosfera e a região de transição (RT) estão inclusas nas interpretações da origem da emissão na banda rádio. A observação em rádio do limbo solar tem contribuído, historicamente, para a compreensão da existência da região de transição ou ainda do crescimento da temperatura da cromosfera para a coroa solar através da análise do contínuo da emissão livre-livre. Nota-se uma interessante discrepância entre as distribuições em função da altura da temperatura e da densidade da atmosfera solar, principalmente a região onde a RT ocorre. Há referências ao contínuo de emissão em rádio provenientes de alturas superiores aquela resultante do modelo de atmosfera com base em linhas e contínuo.

O Brasil tem contribuído com observações em rádio completando os modelos da atmosfera solar com observações de 1,4 a 400 GHz. Além disso, as observações em 48 GHz obtidas pelo rádio observatório do Itapetinga (ROI) mostraram que a constante solar tem uma variação correlacionada com o raio solar nessa frequência. Tal variação do raio em rádio apresenta uma melhor correlação com o fluxo de emissão de explosões medidas em raios X moles (satélite GOES) do que com o número de manchas de Wolf. Variações no sol calmo associadas ao ciclo de atividade solar têm sido reportadas e acompanhadas nas frequências de observação do Observatório do Itapetinga em 22 e 48 GHz. Embora baseado em observações realizadas no Japão em 17 GHz, um modelo de atmosfera solar foi desenvolvido por um grupo brasileiro.

A cobertura espectral em rádio de alguns MHz até THz é muito importante para a análise da atmosfera solar. O rádio observatório do Itapetinga (ROI), o Telescópio Sub-milimétrico Solar (SST) e o Arranjo Decimétrico Brasileiro (BDA) são experimentos com resolução espacial suficientes para as análises da atmosfera solar. De grande importância para a manutenção da liderança brasileira nestas áreas de pesquisa hoje é a canalização de esforços e recursos.

Faixa visível

No Brasil, grande parte do estudo da fotosfera tem se dado através do cada vez menos controverso acompanhamento das variações temporais e heliográficas do diâmetro solar, na casa da dezena de mili-segundo de arco. Recuperar e promover uma ampla discussão das duas longas séries brasileiras se afigura como um objetivo a ser atingido. Por exemplo, que fatores, instrumentais, geográficos, climáticos, ou de tratamento de dados, fazem com que nessas séries as amplitudes sejam menores por uma ou duas ordens de magnitude às de outras séries? Por outro lado, dar continuidade a estas séries, que combinadas já acompanham dois ciclos solares, também se afigura como um objetivo pertinente. Sobretudo na entrada de um ciclo solar que se mostra como extremamente brando, bem como com o início das observações heliométricas que são mais simples (mais baratas) e, em princípio, mais precisas e versáteis que aquelas que utilizam o método das alturas iguais.

3.2) Emissão Transiente

Explosões solares em rádio

Explosões solares são os fenômenos mais energéticos do Sistema Solar e seu impacto no ambiente terrestre pode ser diretamente sentido na forma de radiação e perturbação do campo magnético em escalas globais. Para tentar minimizar seus efeitos em nossa sociedade cada vez mais dependente de satélites é fundamental um melhor entendimento dessas explosões a fim de prever sua ocorrência.



Figura 1 – Antena de 13,7 m do Rádio Observatório de Itapetinga (ROI) em Atibaia, SP

Uma explosão solar emite radiação no espectro eletromagnético inteiro, desde os raios gama de altíssimas energias até a emissão na faixa de rádio. Talvez por um fator histórico, as pesquisas de explosões solares no Brasil têm se concentrado na faixa rádio. Recentemente, uma nova componente espectral inédita das explosões solares foi caracterizada por experimentos brasileiros em frequências maiores que 100 GHz, primeiramente no ROI (Figura 1) e depois no SST (Figura 2), a qual apresenta espectro com emissão crescente mesmo acima de 400 GHz. A componente Terahertz das explosões solares ficou bem caracterizada a partir da construção do arranjo de receptores SST em El Leoncito e se trata de um excesso de emissão na banda mm em rádio cuja origem ainda está deficitária de uma explicação bem aceita. Estes resultados trouxeram um cenário completamente novo na interpretação das explosões solares.



Figura 2 – Telescópio Sub-milimétrico Solar (SST)

Dentro do enfoque moderno de construção de arranjos focais com aplicações inéditas na pesquisa solar inteiramente idealizadas no CRAAM/INPE a partir do projeto MRS-48 do Observatório do Itapetinga foram concebidos os receptores em 212 GHz e 405 GHz do Telescópio Sub-milimétrico Solar (SST), os quais estão instalados no Observatório de El Leoncito na Argentina.

Os experimentos multi-receptores com a utilização de arranjos focais tal como MRS-48 (Multi-Receptor Solar do Itapetinga) tiveram um potencial explorador grande como demonstram os resultados publicados. Investimentos em arranjos focais similares em frequências de 50 a 100 GHz e também de 400-1000 GHz são importantes para a caracterização da dinâmica da região emissora

durante as explosões.

Em 2002 foi idealizado o primeiro arranjo de antenas sem coerência de fase para monitoramento de explosões solares em 12 GHz denominado SPUA (Solar Patrol Un-phased Array, Figura 3). O SPUA é um experimento de apoio à comunidade com apresentação em tempo real do fenômeno e com localização simultânea da região ativa produtora da explosão.



Figura 3 - Telescópio robotizado solar em 12 GHz - SPUA (Solar Patrol Un-phased Array) à frente e ao fundo o Rádio Telescópio do Itapetinga

Dentro do programa do clima espacial do INPE um novo espectrômetro de banda larga solar para operar de 1-40 GHz está sendo construído, denominado SPECMM (Figura 4). O SPECMM está projetado para cobrir a banda típica da emissão em rádio das explosões solares (onde o espectro tem seu máximo) e também incluiu o fluxo de 2.8 GHz que é adotado como um traçador dos níveis de atividade solar.



Figura 4 - Espectrômetro solar de banda larga em 1-40 GHz, SPECMM

A motivação mais ampla de se compreender o mecanismo das explosões é a sua considerável importância para a física do plasma solar além das aplicações práticas nos estudos da previsão das atividades solares e clima espacial. Um grande esforço está sendo empregado numa descrição com detalhes espaço-temporais da emissão em rádio das cargas aceleradas e o transporte desta energia injetada aos estágios mais tardios num projeto CRAAM/INPE com outras instituições. Esta nova frente de pesquisa está sendo empreendida por Giménez de Castro e Paulo Simões (e colegas

INPE/CRAAM) para prover uma descrição tri-dimensional de explosões solares com aplicações a explosões observadas pelo RHESSI e NoRH. Investimentos em computação rápida são necessárias.

O Brazilian Decimetric Array (BDA, Figura 5), instalado em Cachoeira Paulista, SP, é um interferômetro de 26 antenas operando na faixa de 1.2 - 1.7, 2.8 e 5.6 GHz, ainda em fase de construção. O investimento atual de R\$10M ainda necessita de investimentos para o total de 38 antenas. Quando finalizado produzirá imagens de alta resolução temporal de fontes de rádio com alto contraste. O BDA fornecerá imagens de rádio solar na parte baixa da corona, onde a liberação de energia de uma explosão solar ocorre. Sua análise levará a uma melhor compreensão dos problemas fundamentais da física solar e também será utilizado em uma técnica de tomografia espectral a ser desenvolvido para aplicação em previsão do tempo no espaço interplanetário. Além das observações solares, o BDA será muito útil para observações galácticas e extra-galácticas investigando o céu do hemisfério sul não acessíveis ao grande interferômetro americano VLA.



Figura 5 – Brazilian Decimetric Array (BDA)

O Espectrômetro Solar Brasileiro (BSS, Figura 6), localizado em Cachoeira Paulista, é um experimento solar dedicado que varre a banda de frequência de 1 – 2.5 GHz medindo e intensidade e polarização da emissão explosiva solar.



Figura 6 – Brazilian Solar Spectrometer (BSS)

Callisto é um espectrômetro de baixas frequências (40MHz – 960MHz) que faz parte de uma resolução do IHY 2007 (Ano Internacional Heliofísico). Uma campanha de medidas de espectro solar está sendo realizada em diferentes locais no mundo. Os resultados preliminares no laboratório

do campus do INPE em São José dos Campos foram obtidos no final de Outubro de 2009. O espectrômetro Callisto foi projetado e construído no Instituto ETH de Zurique. Esse instrumento ainda necessita de investimentos para uma antena de montagem polar de maior área coletora para monitorar os eventos associados às grandes tempestades solares conhecidas como ejeção de massa coronal.



Figura 7 - Callisto