

SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO PARA APLICAÇÕES ESPACIAIS

MIGUEL C. BRITO

Departamento de Física das Atmosferas, Oceanos e Planetas
Universidade de Oxford — Reino Unido

A observação no infravermelho pode revelar informação essencial e única para a compreensão dos processos físicos da atmosfera da Terra e dos restantes planetas do Sistema Solar, a temperatura dos oceanos ou a história de longínquas galáxias activas. A crescente necessidade de melhor resolução espacial e espectral levou ao desenvolvimento de detectores cada vez mais sofisticados. Com a presente tecnologia estes instrumentos precisam de funcionar num ambiente de temperaturas criogénicas. Neste artigo discutem-se os requisitos destes sistemas de refrigeração para aplicações espaciais descrevendo-se ainda algumas das soluções entretanto encontradas.

Introdução

A zona infravermelha do espectro foi alvo nas últimas décadas de um espantoso desenvolvimento científico e tecnológico. As suas aplicações à observação da superfície terrestre, ao estudo da atmosfera, não só da Terra mas também dos restantes planetas do Sistema Solar, e à astronomia, vieram revolucionar as ideias que tínhamos sobre estes objectos. Exemplos famosos são a descoberta do buraco do ozono sobre a Antárctida ou a confirmação das flutuações na radiação cósmica de fundo.

A observação da superfície da Terra a partir de plataformas em órbita tem que ser feita em comprimentos de onda para os quais a atmosfera é transparente. Duas destas bandas transparentes encontram-se entre 0.3-2 μm (utilizada para medir radiação solar reflectida pela superfície) e 8-14 μm (utilizada para medir radiação emitida pela própria superfície). Detectores de infravermelhos (IV) sensíveis a estes comprimentos de onda tem que funcionar imersos em ambientes de temperaturas muito baixas de modo a reduzir o ruído térmico. Algumas das aplicações podem exigir o arrefecimento não só do detector em si mas também de parte da componente óptica do instrumento.

Já o estudo da atmosfera tem que ser feito a frequências para as quais a

atmosfera não é transparente. A sua emissão térmica (que se estende até ao longínquo IV 5-100 μm) revela a abundância relativa das diferentes espécies (por exemplo 8 μm para o vapor de água e 9.6 μm para o ozono) e pode ainda indicar ventos, perfis de temperatura ou distribuições verticais e espaciais dos diferentes gases contribuindo deste modo para a compreensão dos processos físicos que governam a atmosfera, tais como a dinâmica de larga escala, a fotoquímica ou a meteorologia.

Também em astronomia o IV é uma banda do espectro particularmente importante. Os primeiros estádios da evolução das estrelas, as flutuações na radiação cósmica de fundo e o estudo de cometas são alguns dos muitos exemplos onde observações no IV trouxeram alterações fundamentais à nossa compreensão da física destes astros.

Se, como vimos, a atmosfera da Terra absorve e emite radiação nestes comprimentos de onda, a astronomia dos IV deve assentar naturalmente em observações a partir de plataformas espaciais. Para este tipo de observação onde o ruído de fundo é a principal limitação, todo o telescópio tem que ser arrefecido de modo a atenuar a radiação térmica emitida pelas diferentes componentes do instrumento.

Refrigeração espacial

Sistemas passivos

Sistemas de He líquido

Refrigeradores mecânicos

O Infrared Astronomical Satellite (IRAS) foi o primeiro dos grandes telescópios a orbitar a Terra e em 1983 surpreendeu a comunidade astronómica com a descoberta de fortes emissões galácticas no IV. O sistema de refrigeração consistia num tanque com 540 litros de hélio superfluido construído pela Ball Aerospace Division. A missão teve uma duração de 10 meses e foi considerada um sucesso.

Dois anos mais tarde foi a vez do Cosmic Background Explorer (COBE) que, com um sistema de refrigeração idêntico, estudou as flutuações na radiação cósmica de fundo.

Desde então foram muitas as missões com telescópios de IV. A Tabela 1 resume as principais características dos sistemas de arrefecimento das diferentes missões.

Tabela 1 — Sistemas de refrigeração para telescópios de IV em órbita

Missão	Data	Agência	Duração	Comentário
IRAS Infrared Astronomical Satellite	1983	NASA	10 meses	540 litros, hélio superfluido, 1.8 K
COBE Cosmic Background Explorer	1985	NASA	18 meses	versão mais sofisticada do IRAS
IRTS IR Telescope in Space	1995	NASDA	20 dias	10 litros, hélio superfluido, 1.8 K
ISO Infrared European Observatory	1995	ESA	18 meses	2100 litros, hélio superfluido, 1.8 K
STIRF Space IR Telescope Facility	2001	NASA	2.5 anos	540 litros, hélio superfluido, 1.8 K
FIRE Far IR Explorer	2003	NASA	5 anos	versão mais sofisticada do COBE

Requisitos especiais para funcionamento no Espaço

A obtenção de baixas temperaturas no espaço levanta problemas tecnológicos muito diferentes dos dos sistemas de refrigeração que se usam em laboratórios e telescópios à superfície da Terra.

A primeira grande diferença entre um sistema a bordo de uma nave espacial ou de um satélite e um sistema terrestre é o tempo de vida. Na superfície, se alguma coisa corre mal interrompe-se a observação, chama-se o técnico da manutenção e corrige-se o problema. No espaço, onde a manutenção é impossível¹ e uma falha um desastre completo, a fiabilidade do sistema é o mais crucial dos requisitos.

Outras das limitações destes sistemas espaciais são, por exemplo, o consumo de energia, as dimensões e peso do sistema, o ruído (um sistema mecânico de refrigeração que provoque vibrações no detector pode limitar seriamente a qualidade de imagem do telescópio) e a robustez (não nos podemos esquecer que o sistema tem que sobreviver às duras condições do lançamento).

A solução de todos estes problemas é uma missão difícil, mas que tem progredido formidavelmente nos últimos trinta anos, desde os primeiros passos da Era do Espaço quando eram os sistemas criogénicos que limitavam o tempo de observação a alguns dias ou por vezes apenas algumas horas, até aos dias de hoje onde se assiste a missões que mantêm temperaturas de -220°C durante anos de funcionamento contínuo.

Sistemas Passivos

Todos sabemos que a temperatura do espaço é apenas 4 K. Pergunta-se então: qual é a necessidade de arrefecer um sistema num ambiente já por si tão frio?

De facto, um dos mais eficientes processos de refrigeração no espaço consiste precisamente num disco preto, chamado **radiador**, orientado para a gelada escuridão interstelar, radiando o calor produzido pelos diferentes sistemas da nave ou satélite. Um dos problemas deste tipo de sistemas reside na necessidade de restringir a orientação da nave de modo a evitar que o disco receba luz do Sol, directamente ou reflectida na Terra ou na Lua.

Outra limitação dos radiadores é a sua dimensão que se torna proibitiva para temperaturas muito baixas (o diâmetro é inversamente proporcional ao quadrado da temperatura absoluta).

Os sistemas radiativos são ainda particularmente sensíveis à contaminação. Um ambiente com poeiras, por exemplo a cauda de um cometa, poderia danificar o disco preto degradando o comportamento de todo o instrumento.

Apesar de todas estas limitações e constrangimentos, sistemas radiativos têm sido utilizados com regularidade em aplicações espaciais, desde o tempo dos satélites meteorológicos NOAM -7 até aos dias de hoje. Um exemplo recente é o do CIRS² a bordo da missão Cassini, iniciada em Setembro de 1997, que refrigera um espectrómetro que pretende analisar em detalhe a atmosfera de Saturno.

Sistemas de hélio líquido

Outro modo óbvio de manter temperaturas baixas é o uso de materiais naturalmente muito frios, por exemplo **hélio líquido**. A ideia é usar um grande tanque cheio de

¹ A excepção é o Hubble Space Telescope, um caso único da história do Espaço que prevê uma série de missões de *upgrade* e manutenção. Durante a próxima visita, em Dezembro de 1999, os astronautas irão instalar um refrigerador mecânico que substituirá os 100 kg de azoto líquido para arrefecer o NICMOS (Near IR Camera Multi Object Spectrometer) que entre tanto evaporaram (New Scientist, 18 Maio 1997, pp 12).

² Composite Infrared Spectrometer.

hélio líquido que está em permanente contacto com os detectores. A temperatura assim obtida é inferior a 4.2 K, preferencialmente inferior a 2.2 K para minimizar a taxa de evaporação do hélio líquido e dura enquanto o criogene não evaporar completamente.

A grande vantagem deste sistema é a sua fiabilidade mas o peso e as dimensões do tanque podem tornar-se incomportáveis para missões de longa duração.

Outro problema com os tanques de hélio líquido é o chamado problema da separação das fases. Num laboratório à superfície, devido à gravidade, a componente líquida fica no fundo do tanque e a componente gasosa, por ser menos densa, fica por cima. Se o detector estiver em contacto com o fundo do tanque não há problema em manter a sua temperatura sobre controle.

No espaço o caso muda de figura. Num ambiente de microgravidade, não há razão para o líquido ficar por baixo e por isso torna-se necessário introduzir um complicado sistema de vasos capilares para conduzir a componente líquida (i.e. fria) do criogene para a zona em contacto com o detector.

Sistemas como este foram desenvolvidos nos anos 1970 pelos militares norte americanos mas nunca foram utilizados em aplicações espaciais, civis ou científicas.

Uma alternativa que resolve o problema da separação das fases é o recurso a **hélio superfluido insaturado**, isto é, hélio líquido armazenado a pressões superiores à pressão de saturação, pressão à qual o hélio líquido se encontra em equilíbrio com o seu vapor. Resolve-se o problema da separação das fases com o custo da massa e peso adicionais para reforçar os tanques de modo a suportar pressões tão elevadas.

Telescópios no infravermelho a bordo de satélites como o COBE ou o ISO³ utilizaram com sucesso sistemas de hélio superfluido (c.f. Tabela 1).

Refrigeradores Mecânicos

Existe uma terceira categoria de sistemas de refrigeração para aplicações espaciais chamados Refrigeradores Mecânicos que consistem essencialmente em diferentes configurações de pistões que sucessivamente comprimem e expandem o gás (geralmente hélio) convertendo calor em trabalho. O resultado final é a transferência de calor da zona fria (onde se monta o detector) para a zona quente, geralmente um pequeno radiador que re-irradia esse calor para o espaço.

Os refrigeradores mecânicos podem arrefecer instrumentos a uma grande variedade de temperaturas e com uma grande variedade de eficiências. De um modo geral estas máquinas são pequenas e leves, de baixo custo e versáteis. As desvantagens relativamente aos radiadores e aos sistemas de hélio líquido são o consumo de energia e a dificuldade em controlar as vibrações.

De entre os vários refrigeradores desenvolvidos, os baseados no ciclo de Stirling revelaram-se os mais efi-

cientes tendo sido os únicos que foram usados em sistemas de refrigeração em órbita.

Essencialmente, o refrigerador baseado no ciclo de Stirling é constituído por dois pistões e um permutador. O permutador é uma espécie de esponja térmica que mantém um gradiente de temperatura entre a região fria e a região de compressão: o permutador absorve calor quando o fluido quente o atravessa a caminho da zona fria; o fluido recupera esse calor quando, na segunda fase do ciclo, o fluido frio atravessa o permutador no sentido contrário.

O princípio de funcionamento do refrigerador Stirling consiste numa sucessão de compressões e expansões a temperaturas diferentes, resultando numa transferência de calor de T_E para T_C (c.f. Figura 1). O ciclo termodinâmico consiste em 4 fases distintas. No início do ciclo, o pistão compressor aproxima-se do permutador enquanto o pistão de expansão se mantém estacionário. Durante esta fase o fluido é comprimido, a pressão aumenta mas a temperatura mantém-se pois o calor gerado é transferido para o exterior. Em seguida, os dois pistões movem-se simultaneamente de modo a que o volume entre os dois pistões se mantém constante. O fluido atravessa a permutador e por isso arrefece. A redução de temperatura provoca a redução de pressão. Segue-se o processo de expansão. O volume aumenta e a pressão diminui mas a temperatura mantém-se constante pois o refrigerador está a absorver calor do exterior. Finalmente, para encerrar o ciclo, os dois pistões movem-se simultaneamente, transferindo o fluido do espaço de expansão para a zona de compressão. O fluido atravessa o permutador e re-absorve o calor que aí deixara na segunda fase do ciclo.

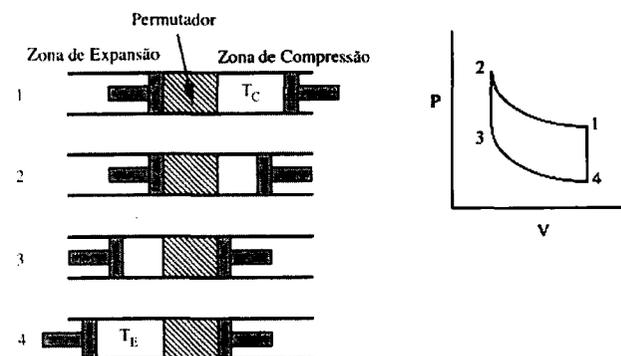


Fig. 1 — Princípio de funcionamento de um refrigerador Stirling.

Tubo Pulsado

Outro sistema mecânico de refrigeração muito em voga nos últimos tempos é o Tubo Pulsado, uma variante do Stirling.

³ Infrared Space Observatory.

Como muitas vezes acontece em ciência, o Tubo Pulsado nasceu de um acaso acidental. Estávamos no início dos anos 1960 quando Grifford, da Universidade de Syracuse nos EUA, notou que um pequeno compressor em série com um longo tubo fechado aquecia a extremidade deste. Concluindo que existia um processo de transferência de calor do compressor para a extremidade do tubo, Grifford colocou um permutador entre o pistão e o tubo de modo a acumular o efeito. O resultado foi que a base do permutador arrefeceu (c.f. Figura 2).

Longsworth, um dos seus estudantes, estudou sistematicamente o sistema mas devido à muito baixa eficiência da máquina então produzida o projecto foi abandonado pouco depois, sendo apenas recordado como mais uma curiosidade académica.

Em 1984 porém, um grupo de cientistas russos da Escola Técnica Superior de Moscovo (Mikulin, 1984) propôs a introdução de um reservatório a pressão constante ligado ao topo do tubo através de um orifício, uma configuração que ficou conhecida pelo nome de Tubo Pulsado com Orifício. A primeira máquina construída com esta nova configuração (Radebaugh, 1986) revelou-se muito mais eficiente e pela primeira vez desafiou o domínio dos refrigeradores Stirling.

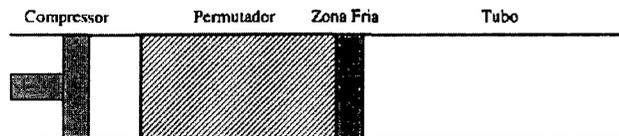


Fig. 2 — Diagrama do Tubo Pulsado.

O princípio de funcionamento é relativamente simples e está ilustrado na Figura 3. Durante a primeira fase do ciclo, uma dada porção elementar de gás sofre uma compressão adiabática e a sua temperatura aumenta para T_Q . Como a pressão no tubo é agora superior à pressão dentro do reservatório, o elemento de gás desloca-se no sentido do reservatório. Este é um processo isotérmico. Entretanto, entramos na segunda fase do ciclo que consiste na expansão adiabática. A porção elementar de gás arrefece mas, devido ao deslocamento de X_2 para X_1 , atinge agora uma temperatura, T_F , mais baixa do que a temperatura original. O resultado é o arrefecimento da base do tubo, um arrefecimento que se vai acumular de ciclo para ciclo até que se atinge uma temperatura mínima em que o processo de refrigeração é compensado pelas diversas fontes secundárias de calor, como por exemplo a condução ao longo do tubo ou do permutador.

A grande vantagem do Tubo Pulsado relativamente aos Stirling é o facto de apenas ter um pistão (embora existam configurações onde o orifício e o reservatório são substituídos por um segundo pistão) e portanto ter, potencialmente, um tempo de vida muito mais longo.

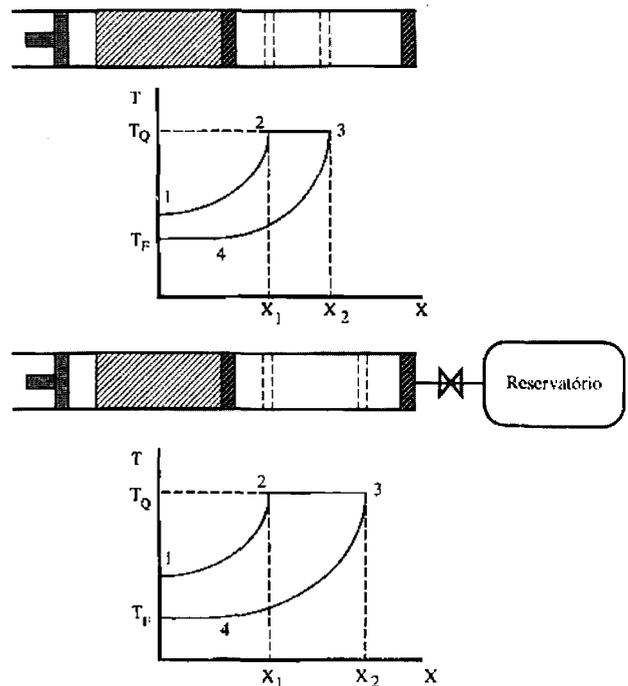


Fig. 3 — Princípio de funcionamento do Tubo Pulsado com Orifício.

A tecnologia dos Tubos Pulsados para aplicações espaciais ainda está a dar os primeiros passos mas os resultados são bastante promissores. A Tabela 2 compara a *performance* de diversos refrigeradores mecânicos.

Tabela 2 — Sistemas de refrigeração mecânicos

Fabricante	Data	Temperatura	Potência	Comentário
Malaker, USA	1970	100 K	1.7 W	Stirling, baseado em Refrigeradores Mecânicos militares
	1970	80 K	1 W	versão modificada, SKYLAB
Phillips, USA	1978	60-80 K	0.1-2 W	Stirling, STP 78-1 (espectrometro de raios γ)
	1983	65 K	5 W	Stirling de rolamentos magnéticos
British Aerospace, UK	1989	50-80 K	0.8 W/50 W	baseado no Stirling para o ISAMS
Lockheed, USA	1995	80 K	0.8 W/34 W	baseado no Stirling para o ISAMS
Hughes, USA	1995	80 K	0.15 W/8 W	Stirling miniatura (0.5 Kg)
Ball, USA	1995	55 K	1.5 W/65 W	Stirling para o AXAF
MITI, Japão	1995	70 K	1.2 W/44 W	Stirling para o ASTER
Hitachi, Japão	1995	70 K	5.2 W/200 W	Rolamentos magnéticos
Moscovo, URSS	1984	105 K	10 W	Tubo Pulsado com orifício, 15 Hz
NIST, USA	1986	60 K	—	Tubo Pulsado a 9.0 Hz
CEA, França	1990	85K	4 W	Tubo Pulsado a 3.2 Hz
Academia Sinica, China	1990	49 K	6 W	Tubo Pulsado a 8.3 Hz
TRW, USA	1992	80 K	0.5 W/18 W	Tubo Pulsado Miniatura
	1994	35 K	1 W	Tubo Pulsado
	1996	65 K	5 W	Tubo Pulsado (space qualified)

Conclusão

Para resumir o que ficou dito até aqui, pode-se dizer que a observação do Espaço e da Terra na região do infravermelho revolucionou a nossa visão da Física e do mundo, mas tratou-se de um processo lento e doloroso que só foi possível graças a um progresso, também em si revolucionário, das técnicas e tecnologias associadas a detectores e aos seus sistemas de refrigeração.

O futuro reservar-nos-á certamente inúmeras descobertas e avanços, num meio que fervilha de actividade

Miguel C. Brito é licenciado em Engenharia Física Tecnológica, pelo Instituto Superior Técnico em Lisboa, estando presentemente a realizar o seu doutoramento em Física do Espaço na Universidade de Oxford, Reino Unido.

como por exemplo o recente anúncio de refrigeração laser para aplicações espaciais (New Scientist, 18 Janeiro 1997).

Bibliografia

- JAMIESON, J. *et al* — *Infrared Physics and Engineering*, McGraw Hill, 1963.
- MIKULIN, E. *et al* — *Low Temperature Expansion Pulse Tubes*, Adv. Cryog. Eng. **29**, 629-637 (1984).
- RADEBAUGH, R. *et al* — *Comparison of 3 types of Pulse Tube Refrigerators: new methods for reaching 60 K*, Adv. Cryog. Eng. **31**, 779-789 (1986).
- WALKER, G. — *Low Capacity Cryogenic Refrigeration*, Oxford Science Publications, 1994.

MESTRADO

FÍSICA PARA O ENSINO

Departamento de Física, Faculdade de Ciências do Porto

Pós-graduação dirigida aos professores que ensinam Física no Básico e Secundário. A *reintrodução de trabalho experimental* e o advento das *novas tecnologias*, são a razão de ser da forte componente laboratorial e da ênfase na familiarização com o computador.

A parte escolar ocupa 3 trimestres, de 10 semanas, com um horário pós-laboral de 8 horas semanais; à sua conclusão corresponde um diploma. O curso de Mestrado inclui ainda a elaboração duma dissertação, nos 6 a 12 meses seguintes.

Prazos

Candidaturas 06 - 24 Out. 98

Matriculas 16 - 28 Nov. 98

Numerus clausus: 16

+3 para candidatos de outros Países da CPLP

Programas

Tópicos Complementares de Física I + II

Temas de Física das Ondas, Óptica, Mecânica Quântica, Termodinâmica, Física dos Materiais (aulas teóricas e teórico-práticas)

Metodologia e Invest. no Ensino da Física

Metod. e técnicas de investigação-acção na sala de aula.

Física Laboratorial I e II

Experiências ilustrativas; trabalhos laboratoriais; projectos. (procurar-se-á atender à experiência pessoal e interesses dos mestrandos, tendo presente os equipamentos existentes nas escolas e no departamento).

O computador no Ensino da Física

Preparação básica para a utilização do computador no Ensino.

Seminários

Tópicos de: Ciências da Educação; divulgação da Ciência; temas actuais.

Acesso

- Licenciados em Física (ou Química), ramo educacional.
- Licenciados em Ensino de Física (ou Física e Química).
- Licenciados com estágio profissional como docentes de Física.
- Outros licenciados com curriculum que o Conselho Científico considere adequado.

Plano de Estudos

Trimestre 1 (4/1 - 13/3/99)

- Tópicos Complementares de Física I
 - Física Laboratorial I
- (5+3 horas semanais)

Trimestre 2 (26/4 - 3/7/99)

- O computador no Ensino da Física
 - Metodologia e Investigação do Ensino da Física
 - Seminários
- (4+3+1 horas semanais)

Trimestre 3 (27/9 - 4/12/99)

- Tópicos Complementares de Física II
 - Física Laboratorial II
- (5+3 horas semanais)

Informações/Contactos:

Departamento de Física
Faculdade de Ciências do Porto
Rua do Campo Alegre, 687
4150 Porto
Tel. (02) 6082703
Fax: (02) 6082679