

Aprendendo sobre o Sol

Learning about the Sun

M. Tavares

*Instituto de Física, Universidade Federal Fluminense
24210-340, Niterói, Rio de Janeiro, Brazil*

Recebido em 12 de maio, 1999

Todos sabemos que o Sol é de importância sem limites para a vida na Terra, mas poucos têm uma noção básica da nossa estrela e como ela influencia a Terra. O caroço do Sol é muito denso e o tamanho do Sol é tão grande que a energia liberada no seu centro leva 50.000.000 anos para chegar à sua superfície através de inúmeros processos de absorção e emissão. Neste artigo, apresentamos algumas das mais importantes características do Sol.

We all know that the Sun is overwhelmingly important to the life on Earth, but few have a good knowledge of our star, its characteristics and how it influences the Earth. The Sun's core is so dense and the size is so huge that the energy released at its center takes about 50,000,000 years to reach the surface, undergoing countless absorption and emission processes. In this paper, we present some important features of the Sun.

I Introdução

O Sol é uma estrela média, semelhante a milhares de outras no Universo. É uma poderosa máquina de energia, produzindo cerca de $4,0 \times 10^{23}$ quilowatts de potência por segundo. Vamos fazer uma pequena comparação: se o Sol tivesse sua energia canalizada por um segundo isto daria energia suficiente para abastecer o nosso país nos próximos 9.000.000 anos.

A fonte de energia básica do Sol é a fusão nuclear. Devido às altas temperaturas e densidades do seu interior ocorre a fusão do hidrogênio, criando energia e produzindo o hélio como um subproduto. Se o Sol parasse hoje de produzir energia seriam necessários 50.000.000 anos para que os efeitos fossem sentidos na Terra.

O Sol produziu energia radiante e térmica nos últimos quatro ou cinco bilhões de anos, e tem hidrogênio suficiente para continuar produzindo tal energia por outras centenas de bilhões de anos [6]. No futuro, a superfície do Sol estará se expandindo e englobará os planetas internos (inclusive a Terra!) e o Sol se tornará uma enorme estrela vermelha [9]. Após isso, devido ao seu tamanho médio, o Sol provavelmente se contrairá e se tornará uma estrela relativamente pequena e fria conhecida como anã branca.

Um das observações mais antigas que conhecemos a respeito do Sol é, sem dúvida, a existência de manchas solares. No ano de 325 A.C., Theophrastus identificou as primeiras manchas no Sol. Manchas solares são áreas escuras temporárias na superfície do Sol onde se concentram campos magnéticos. Constituem o aspecto

mais visível da superfície do Sol pois uma mancha de tamanho médio é do tamanho da Terra. Manchas se formam e se dissipam em períodos de dias ou semanas. Elas ocorrem quando um campo magnético forte aparece na superfície do Sol e provoca um ligeiro resfriamento na área, de um valor de 6.000 °C para digamos 4,200 °C, tal que esta área aparecerá mais escura em comparação com o resto da superfície solar. A área mais escura no centro da mancha é chamada *umbra*, onde o campo magnético é mais intenso. A área menos escura, uma área com estrias em torno da umbra é chamada *penumbra*. As manchas giram com a superfície solar, levando 27 dias para fazer uma rotação completa vista da Terra. Manchas perto do equador do Sol tendem a rodar mais rápidas do que as situadas em latitudes mais altas. As manchas no início de um ciclo começam a aparecer entre $\pm 45^\circ$ de latitude, a medida que o ciclo avança, as manchas se movem para o equador do Sol, alcançando cerca de $\pm 5^\circ$ no final do ciclo. Grupos de manchas com configuração de campo magnético complexa fazem freqüentemente parte do fenômeno conhecido como *chamas solares* [11]. O número de manchas é máximo no meio de um ciclo, o que significa que o campo magnético interno do Sol está mais caótico. Ainda que a produção de energia total durante os anos de máximo seja apenas cerca de 0,1 % maior do que para os anos de mínimo, a variabilidade solar é refletida através do vento solar na atividade geomagnética [12]. Nos últimos 300 anos, o número médio de manchas tem aumentado e diminuído em ciclos de eventos de manchas de 11 anos. Na Fig. 1, é mostrado um ci-

clo solar de 1986 a 1997. O eixo vertical representa o número de manchas enquanto no eixo horizontal estão os anos observados. A linha contínua mais escura mostra o número observado de manchas e a mais clara o número previsto. O Sol, como a Terra, tem suas estações mas seu ano é igual a 11 dos nossos. O último máximo solar foi em 1989 e o próximo máximo será em 2000.

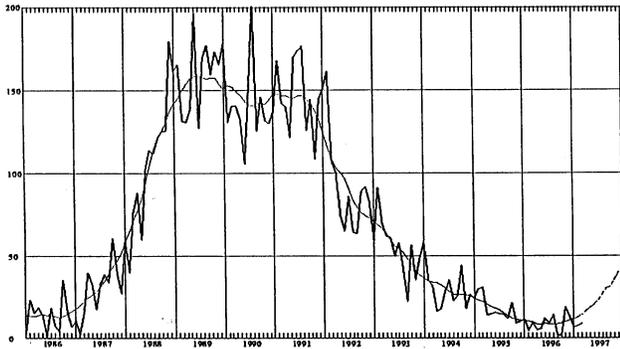


Figura 1. Número de manchas solares por ciclo solar de 1986 a 1997, a linha em negrito é o número de manchas solares observado, a outra delineada é o número de manchas solares previsto.

Para ilustração, a Fig. 2 mostra a coleta de dados do fluxo de prótons e do fluxo de elétrons durante a trajetória do Satélite Goes entre os dias 14 de março e 17 de março de 1999. As medidas terrestres são indicadas na parte inferior do gráfico.

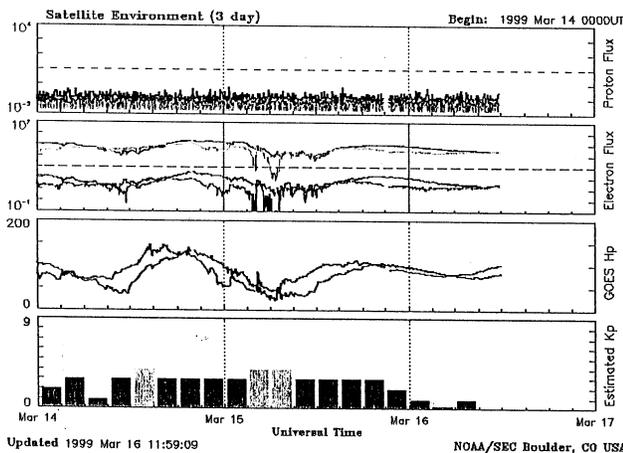


Figura 2. Amostra de dados obtidos em um satélite e de magnetômetros terrestres, os dados foram recolhidos durante três dias.

Outro fenômeno variável são os buracos coronais que podem permanecer por anos ou meses. Eles são vistos como grandes buracos escuros quando o Sol é observado através de comprimentos de onda dos raios x [10]. Esses buracos se iniciam em grandes células de campos magnéticos unipolares na superfície do Sol. Suas linhas de campo se estendem para longe do sistema solar e permitem um fluxo contínuo externo de alta velocidade do vento solar. Os buracos coronais têm um ciclo

longo mas não correspondem exatamente a um ciclo de manchas e são mais numerosos nos anos após o máximo solar. Durante alguns estágios do ciclo solar, os buracos são visíveis continuamente nos pólos sul e norte.

Um fenômeno solar muito interessante são as proeminências solares (observadas como filamentos escuros no disco solar). São nuvens imóveis de matéria solar mantidas acima da superfície do Sol por campos magnéticos. Muitas proeminências subitamente lançam grandes quantidades de matéria solar no espaço.

Chamas solares são intensas descargas de energia. Vistas por observatórios terrestres aparecem como áreas brilhantes no Sol e detectadas na região de comprimentos de onda ópticos e suas explosões ruidosas na região de ondas de rádio. Elas podem permanecer por minutos ou horas [8, 10]. São os maiores eventos do nosso sistema solar, os mais explosivos, equivalentes a 40 bilhões de bombas atômicas de Hiroshima. A fonte primária de energia para a produção dessas chamas pode ser proveniente da reconexão (termo técnico de Física de Plasmas para designar a situação quando dois campos magnéticos com direções diferentes se encontram, por exemplo, o campo magnético interplanetário e o campo magnético da Terra) ou do rompimento dessas reconexões devido a uma mudança súbita na direção de um dos campos, causado pelos intensos campos magnéticos [4, 5].

As chamas irradiam na região compreendida entre os raios gama e os raios X do espectro eletromagnético, bem como na região visível e de longos comprimentos de onda [1, 2, 7]. Na atmosfera solar, a coroa é estruturada por fortes campos magnéticos. Na região onde as linhas de campo são fechadas, que geralmente se situa acima dos grupos de manchas, a atmosfera solar confinada pode súbita e violentamente lançar bolhas ou línguas de gás criando campos magnéticos que são ejeções da massa coronal. Um grande evento pode conter 10^{17} gramas (um bilhão de toneladas) de matéria que pode ser acelerada por vários milhões de quilômetros por hora causando uma explosão espetacular. Matéria solar é lançada através do meio interplanetário indo chocar-se com planetas ou naves espaciais em sua trajetória. Esses extraordinários eventos algumas vezes coincidem com as manchas mas, em geral, são independentes.

II Entre o Sol e a Terra

A área entre o Sol e a Terra e os demais planetas tem sido chamada de meio interplanetário e já foi considerada um vácuo perfeito, mas atualmente é reconhecida como sendo uma área de alta turbulência dominada pelo vento solar que flui a velocidades que variam entre 250 a 1000 km/s. Outra característica do vento solar é depender das condições do Sol. A primeira indicação de que o Sol emitia um vento veio da cauda dos cometas. O seu efeito sobre os mesmos faz com que a cauda

destes aponte em direção contrária a do Sol.

Kepler, no início de 1600, achou que os cometas eram dirigidos pela pressão da luz solar e sua predição ainda é verdadeira para muitas caudas de cometas que se constituem de “poeira”. O Halley-Boop, um cometa proeminente cujo maior brilho foi de março a abril de 1996, exibiu claramente duas caudas gêmeas. A cauda de poeira era mais brilhante e a outra cauda tinha uma cor diferente tendendo para o azul. Esse cometa foi observado muito claramente no hemisfério norte. A pressão do Sol não explica tal comportamento mas, em 1943, Hoffmeister, e mais tarde Biermann [3], propôs que além da luz solar, o Sol emitia um feixe estacionário de partículas, que pressionaria os íons.

Eugene Parker da Universidade de Chicago sugeriu em 1959, que o Sol lançava um fluxo de partículas chamado *vento solar*. O Sol arremessa um milhão de toneladas de matéria dentro do espaço a cada segundo. Se você adicionar tudo durante um dia será comparável à massa de um grande lago ou até mesmo da Baía de Guanabara. E isto acontece todos os dias, dia após dia, ano após ano. Essa massa perdida é chamada de vento solar.

O vento solar é formado pela camada superficial do Sol que sopra dentro do espaço preenchido de campos magnéticos ainda presos ao Sol. O vento arrasta o campo magnético externo, formando o que é chamado de *campo magnético interplanetário*. A região do espaço na qual o campo magnético solar domina é chamada *heliosfera*. O vento solar de plasmas consiste primeiramente de elétrons e prótons quentes com uma fração pequena de hélio e alguns outros íons pesados. O vento solar originário dos feixes de partículas é vagaroso enquanto que o proveniente dos buracos na coroa é rápido. Isto cria a chamada região de interação de co-rotação no espaço interplanetário. Os campos magnéticos observados na magnetosfera não são apenas gerados pelo Sol, mas também pela Terra que, com seu caroço líquido, gera seu próprio campo magnético, fator também importante para a vida humana. Os cientistas usam dados coletados de várias partes do mundo para calcular o campo magnético da Terra. Uma comparação é feita entre as flutuações observadas desde 1600 até 2000 para determinar se o campo magnético total está diminuindo de valor. Os resultados demonstram uma flutuação entre 25,583 G até 88,31 G onde as regiões mais fortes se situam próximas aos pólos. A Fig. 3 ilustra o fenômeno conhecido como *aurora boreal*. Esse evento ocorre apenas para as altas latitudes próximas ao pólo norte e a precipitação de partículas na atmosfera se manifesta como se uma imensa cortina verde ondulasse no céu escuro e algumas vezes também muito estrelado. Existem ainda as auroras vermelhas mas, essas são mais raras. A aurora da Fig. 3 está sobre a cidade de Copenhague e ocorre raramente, porque implica que as partículas desceram a latitudes muito mais baixas do que o usual para serem observadas.

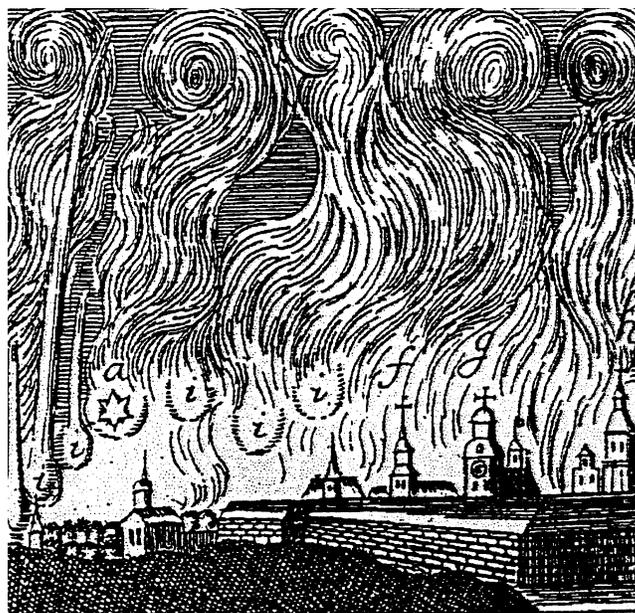


Figura 3. Aurora vista através de um trabalho artístico, a nanquim, de um dinamarquês.

Chegou-se à conclusão que os campos magnéticos estão em declínio mas que nos pólos mantêm ainda o nível mais alto de intensidade. De qualquer forma são muito mais fracos do que em anos passados. O contorno magnético entre o campo da Terra e o vento solar é chamado *magnetopausa*. Sua seção reta é aproximadamente circular. As distâncias na magnetosfera em geral são medidas em unidades de raios terrestres, i.e. $R_T = 6371$ km. Nessas unidades, a distância entre o centro da Terra para o “nariz” da magnetosfera é cerca de $10,5 R_T$ e para a cauda é cerca de $60 R_T$. Esses são apenas valores médios pois a pressão do vento solar aumenta e diminui da mesma forma que a magnetopausa expande e encolhe. Por exemplo, quando a magnetopausa é atingida por um fluxo rápido da massa da coroa, o nariz da magnetopausa é pressionado ocasionalmente e então a magnetosfera fica com um tamanho em torno de $6,6 R_T$. Em torno de $2 R_T$ acima da magnetopausa situa-se a frente de choque, que é formada como a de um avião supersônico em movimento. Quando o vento solar passa por essa fronteira parte de sua energia cinética é transformada em calor. Os íons que fluem através da magnetopausa fazem parte de um fenômeno conhecido como *aurora boreal*. As auroras se encontram entre 60 e 80 graus de latitude. Se há uma forte tempestade no Sol, a aurora pode chegar até o equador. Durante uma tempestade fortíssima em 1909, a aurora foi vista em Singapura, que se situa no equador magnético.

Existe ainda um outro fenômeno que não pode ser detectado pelos olhos humanos, mas somente por câmaras de satélites. Trata-se de um anel de fogo rodeando as calotas polares da Terra. Em geral, este anel é formado por elétrons que se aproximam da Terra, devido às tempestades solares. A aurora difusa foi des-

coberta pelo satélite canadense *ISIS 2* em 1972 e aumenta e contrai-se devido a variações no vento solar e seu campo magnético. Vemos na Fig. 4 as diferentes regiões do campo magnético em torno da Terra e estão rotuladas por números: (1) magnetosfera do lado dia que pode alcançar até $10 R_T$; (2) região onde o vento solar encontra a magnetopausa; (3) região correspondente ao campo magnético interplanetário; (4) linha de campo interplanetário conectando-se aos pólos; (5) cauda da magnetosfera que é o campo magnético da Terra deformado pelo vento solar. (6) ponto onde acredita-se que o campo magnético seja nulo.

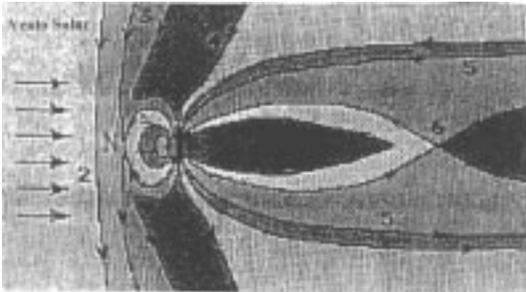


Figura 4. A figura mostra as regiões do vento solar e as internas a magnetosfera do lado dia (3, 4), e as regiões do lado noite (5, 6).

III Conclusões

O estudo dos fenômenos que ocorrem entre o Sol e a Terra são fascinantes. No entanto muitas perguntas sobre o assunto ainda estão em aberto. Os climatologistas e também aqueles, interessados em entender as auroras e outros fenômenos descritos aqui, estudam as principais influências do Sol sobre a Terra através de um sofisticado e complicado trabalho estatístico.

Por exemplo, as flutuações magnéticas são monitoradas por magnetômetros em diversas partes do globo terrestre (veja Fig. 5), onde ficam registradas toda variação do campo magnético minuto após minuto, dia a dia, ano após ano. Os pontos no mapa da Fig. 5 indicam as diversas estações que existem na Groenlândia, algumas pertencem à Dinamarca (DMI) outros ao Canadá (Magic). Assim milhares de dados são gravados em computadores mostrando o que acontece entre a Terra e o Sol. Muitos desses dados têm que ser filtrados, devido a diversas interferências nos magnetômetros, e a análise científica do trabalho se torna mais complicada.

Os satélites que são lançados na magnetosfera também possibilitam a aquisição de dados para análise tanto das condições do campo magnético interplanetário como do vento solar. Assim, o trabalho do ci-

entista para encontrar as respostas para as perguntas que ainda existem, demanda muita análise e compreensão da estatística baseada em dados colhidos tanto por satélites como por magnetômetros situados em diferentes pontos do globo terrestre.

References

- [1] Allan W. and Pouter E.M. *ULF waves their relationship to the Earth's magnetosphere*. Rep. Prog. Phys., **55**, 533 (1992).
- [2] Anderson B.J., Engebretson M.J., Zanetti S.P., and Potemra T.A. *A statistical study of Pc 3-5 pulsations observed by the AMPTE/ CCE magnetic field experiment, 1. Occurrence distributions* J. Geophys. Res., **95**, 1495 (1990).
- [3] Biermann L. *Kometeschwerfe und solare korpuskularstrahlung*, Z. Astrophys., 29274,(1951).
- [4] Crooker, N.U., Siscoe C.T., Russel C.T., Smith E.J *Factors controlling degree of correlation between ISEE1 and ISEE3 interplanetary magnetic field measurements*, J. Geophys. Res., vol. **87**, 2224 (1982).
- [5] Chang S.W., Scudder J.D., Sigwarth J.B., Frank L.A., Maynard N.C, Burke W.J., Peterson W.K., Shelley E.G, Friedel R., Blake J.B., Greenwald, Lepping R.P, Sofko G.J., Villain J.P., Lester M, *A comparison of a model for the theta aurora with observation from Polar Wind and SuperDarn*, J. Geophys. Res., **103**, 17367 (1998).
- [6] Foukal P., *Study of Solar Irradiance Variations Holds Key to Climate questions*, EOS, Transactions AGU, vol.75, no. 33, (1990).
- [7] Jacobs J.A, *Geomagnetic Micropulsations*, pringer-Verlag, New York, (1970).
- [8] Kojima, M. and Kakinuma T., *Solar cycle dependence of global distribution of solar wind speed*, Space Sci. Rev., **53**, 173 (1990).
- [9] Lean J. and Rind D., *Solar variability implications for global change*, EOS, Transactions, AGU, January, (1994).
- [10] Orr D., *Magnetic pulsations within the magnetosphere: A review*, J. Atmos. Terr. Phys., **35**, 1 (1973).
- [11] Paterson J.R. and Reeves C.V., *Applications of gravity and magnetic surveys: The state of the art in 1985*, Geophysics, **50**, 2558 (1985).
- [12] Tavares M., Friis-Christensen E., Moretto T., Vennertrom S., *Semiannual variation of geomagnetic activity in the Greenland magnetometer chain*, Phys. Chemistry of the Earth, 685, (1997).

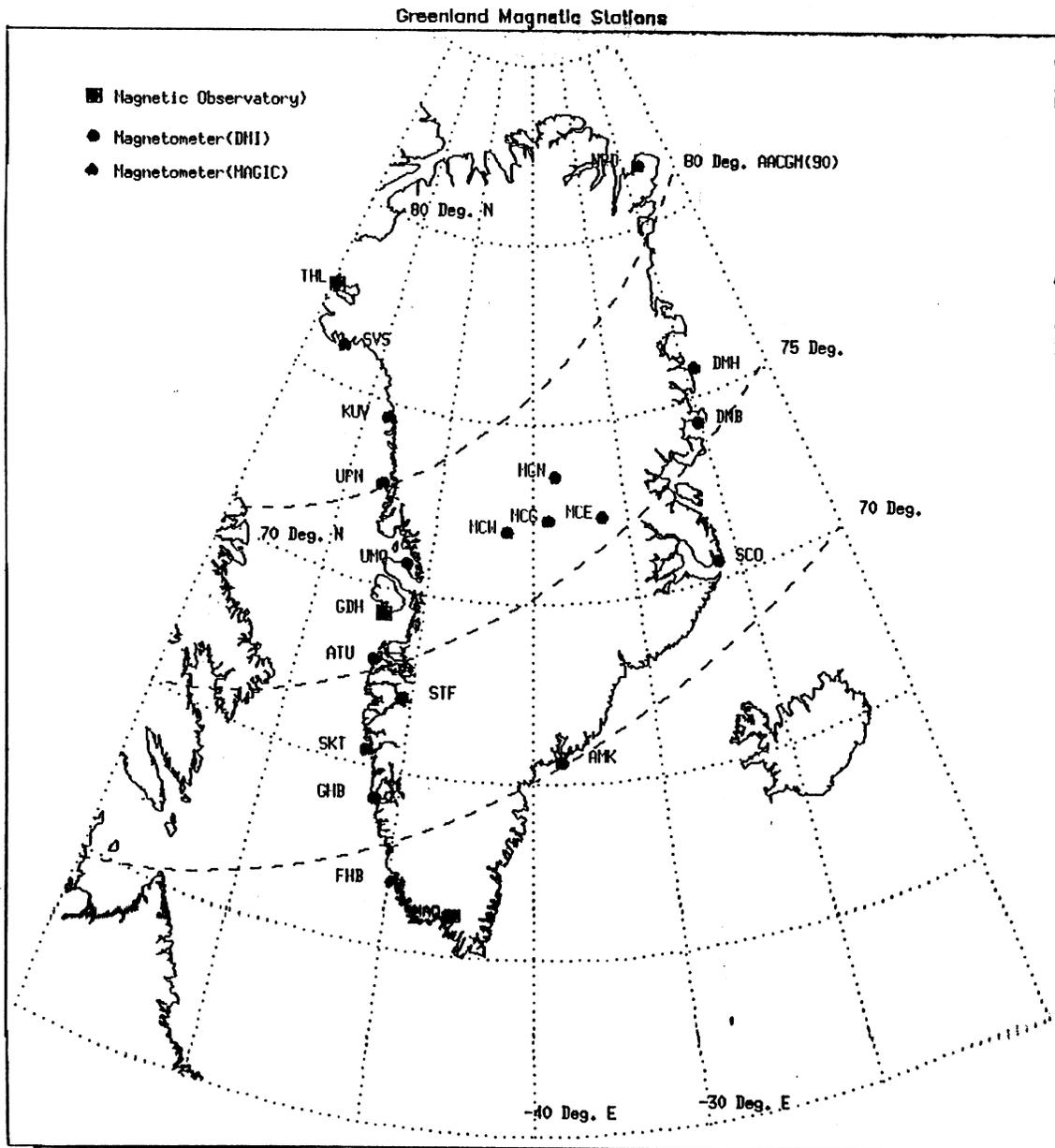


Figura 5. Estações de magnetômetros localizadas na Groenlandia. Algumas das estações possuem detector de raios cósmicos ou riômetros.