

# Radiação quilométrica auroral

(*Auroral kilometric radiation*)

Edio da Costa Junior<sup>1</sup>, Maria Virgínia Alves<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto Federal Minas Gerais, Campus Ouro Preto, Ouro Preto, MG, Brasil*

<sup>2</sup>*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil*

Recebido em 11/6/2015; Aceito em 5/7/2015; Publicado em 12/12/2015

Vários fenômenos puderam ser mais bem estudados ou até mesmo só foram descobertos depois do desenvolvimento dos satélites e espaçonaves. Dentre esses fenômenos podemos destacar a radiação quilométrica auroral (AKR, do inglês auroral kilometric radiation). O fenômeno foi descoberto apenas há pouco mais de 40 anos; as frequências típicas são muito baixas para penetrar na ionosfera em direção à Terra. Sua geração se dá através de interações onda-partícula na região noturna do planeta, acima da ionosfera auroral, sendo a energia necessária proveniente dos feixes de elétrons que se precipitam nessas regiões. É gerada principalmente no modo extraordinário (modo-X), no intervalo de frequências de 20-800 kHz, próximo à frequência local ciclotrônica de elétrons. Sabe-se muito bem que a AKR é intensificada durante subtempestades magnéticas, sendo bem correlacionada com o índice AE. Entretanto, estudos recentes têm mostrado que a radiação desaparece nas fases inicial e principal de algumas tempestades magnéticas, apesar do grande aumento do índice AE e de correntes alinhadas ao campo. Nesses casos, a radiação volta a ser emitida durante a fase de recuperação. Esse comportamento sugere que o campo elétrico alinhado ao campo magnético que acelera os elétrons que se precipitam e induz correntes alinhadas não é formado nas fases inicial e principal de algumas tempestades magnéticas. O intuito desse artigo é apresentar aos leitores a AKR e suas características, tornando esse importante fenômeno mais conhecido entre estudantes e professores de física.

**Palavras-chave:** radiação quilométrica auroral, magnetosfera, subtempestades magnéticas, tempestades magnéticas, física espacial.

Several phenomena could be better studied and even disclosed after the development of the satellites and spacecrafts. Auroral kilometric radiation (AKR) is one of these phenomena. AKR was first detected only about forty years ago; its typical frequencies are too low to penetrate earthward across the ionosphere. This radiation is generated through wave-particle interactions, in the nightside region above the auroral ionosphere. It grows at the expense of free energy from the precipitating auroral electron beam. It is generated mainly in the extraordinary (X) mode, in the frequency range of 20-800 kHz, near the local electron cyclotron frequency. Nowadays, it is well known that AKR is intensified during magnetic substorms and has a good correlation with the AE magnetic index. However, recent studies showed that the radiation disappears in the initial and main phases of some magnetic storms, in spite of the large enhancement of the AE index and field aligned currents. The radiation activates strongly in the recovery phase. This behavior suggests that the field-aligned electric field, which accelerates precipitating electrons and drives field-aligned currents, is not formed in the initial and main phases of some magnetic storms. The purpose of this article is introduce readers to AKR and its features, making this important phenomenon best known among students and teachers of physics.

**Keywords:** auroral kilometric radiation, magnetosphere, magnetic substorms, magnetic storms, space physics.

## 1. Introdução

Vários tipos de pesquisas espaciais foram e ainda são desenvolvidos a partir da superfície do planeta, com o auxílio de câmeras, fotômetros, espectrômetros, magnetômetros, radares, dentre vários outros tipos de instrumentos bastante sensíveis aos processos que ocorrem em altas altitudes na atmosfera superior e na mag-

netosfera. No entanto, a maior parte das pesquisas são conduzidas com o auxílio de foguetes e satélites, que permitem medidas mais precisas, contribuindo de forma bastante significativa para o conhecimento e melhor compreensão dos processos estudados pela física solar e terrestre.

Apesar dos avanços proporcionados pela tecnologia,

<sup>1</sup>E-mail: edio.junior@ifmg.edu.br, costajr.e@gmail.com.

ainda há muito a ser feito no campo da física solar e terrestre, que já tem uma história longa e considerável. O interesse pela área foi despertado no homem com a apreciação de dois fenômenos principais: a aurora e, posteriormente, o campo geomagnético [1, 2].

Mais recentemente, as descobertas que foram feitas a partir dos anos 1950 de vários fenômenos que ocorrem nas camadas solares e nas magnetosferas e ionosferas dos planetas do nosso sistema solar, assim como o descobrimento do próprio vento solar, têm sido usadas para esclarecer os mecanismos de interação entre essas diferentes estruturas. Além disso, essas descobertas servem de modelo para fenômenos que ocorrem em outras estrelas e sistemas planetários, com os quais não é possível um contato direto através de sondas ou satélites e cuja única fonte de informação são as ondas eletromagnéticas que emitem.

No que diz respeito à Terra, é bem conhecido o fato de que a interação entre o vento solar e a magnetosfera e ionosfera terrestres exercem uma grande influência nas linhas de comunicação, seja via satélites ou por reflexão na ionosfera, além de influenciar os sistemas de transmissão de energia a longas distâncias, podendo aumentar a corrosão e criar fortes correntes transientes em oleodutos e gasodutos [3]. Especula-se também sobre uma possível influência que essa interação teria sobre o próprio clima de nosso planeta [4]. Por todos esses e outros motivos, é evidente a necessidade de se conhecer a fundo os processos que ocorrem próximos à Terra, não apenas pelos impactos científicos, mas também tecnológicos.

A magnetosfera terrestre é de extrema importância para a manutenção da vida em nosso planeta, funcionando como uma espécie de escudo e desviando as partículas carregadas provenientes do vento solar [5]. Dentre todos os possíveis fenômenos decorrentes da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, este artigo se concentrará na radiação quilométrica auroral.

A Terra é um emissor natural de ondas eletromagnéticas. Emissões intensas de ondas de rádio ocorrem em aproximadamente algumas centenas de kHz. Uma vez que o comprimento de onda dessa radiação é da ordem de quilômetros, foi chamada inicialmente de radiação quilométrica terrestre [6] (TKR, do inglês *terrestrial kilometric radiation*), recebendo posteriormente a denominação radiação quilométrica auroral (AKR, do inglês *auroral kilometric radiation*) [7, 8], por estar intimamente relacionada à aceleração de elétrons na região auroral [9–17]. A partir de agora será utilizada a sigla em inglês AKR para se referir ao fenômeno.

A AKR é gerada através de interações entre ondas e partículas na parte noturna da magnetosfera terrestre, a distâncias relativamente pequenas da Terra, ocorrendo em rajadas que duram por períodos de meia hora até várias horas. A sua ocorrência está intimamente relacionada com a ocorrência de arcos aurorais discre-

tos [12]. Ambos os fenômenos, AKR e auroras, se originam da interação entre o vento solar, a magnetosfera e a ionosfera, representando as etapas finais de um processo de liberação explosiva de energia acumulada na cauda da magnetosfera.

Essa radiação não pode ser detectada no solo. A razão disso é que as emissões apresentam frequências que são da ordem de centenas de kHz, abaixo do limite crítico a partir do qual a ionosfera passa de opaca a transparente às ondas eletromagnéticas. Portanto, todas as observações de AKR são feitas por satélites. Isso explica porque as emissões terrestres só foram descobertas no início da década de setenta, após o advento dos satélites destinados a observar a magnetosfera a grandes distâncias do planeta, aproximadamente vinte anos depois da descoberta das emissões similares de Júpiter (*Jovian Decametric Radiation*) [18]. As emissões jovianas possuem comprimento de onda que são da ordem de dezenas de metros, com frequências da ordem de dezenas de MHz, sendo suficientemente altas para ultrapassar o citado limite. São, portanto, detectáveis a partir do solo [19].

É bastante conhecido o fato de que a AKR é intensificada durante subtempestades aurorais. Além disso, a radiação quilométrica auroral apresenta boa correlação com o índice de atividade auroral AE, podendo ser usada como um indicador confiável sobre o início de subtempestades [13, 20].

Por outro lado, estudos mais recentes [21] mostraram comportamentos realmente inesperados da AKR durante tempestades magnéticas. Um resultado surpreendente é o desaparecimento da radiação durante as fases inicial e principal de várias tempestades magnéticas, apesar do grande aumento do índice AE e da formação das correntes elétricas alinhadas ao campo magnético terrestre durante esses períodos [22].

## 2. AKR e suas características

Nas últimas décadas, medidas de radiação de baixa frequência mostraram que a magnetosfera terrestre é uma emissora bastante intensa de ondas de rádio, tendo características muito semelhantes às de outras fontes astronômicas, como Saturno, Júpiter, Urano e Netuno, por exemplo. A AKR despertou muita atenção pela possibilidade de se fazer medidas *in situ*, levando assim a uma melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem não só na Terra, mas também nas outras fontes de rádio do sistema solar.

Apesar de ser a mais intensa, a AKR não é a única emissão de ondas da magnetosfera. Devido às várias regiões distintas, caracterizadas por condições particulares de campo magnético e de plasmas, há várias outras emissões de ondas, tanto eletrostáticas quanto eletromagnéticas [18]. Porém, a origem de todas elas é basicamente a interação do vento solar com o campo geomagnético.

A partir dos primeiros estudos, feitos por Benediktov e cols. [23] e Dunckel e cols. [24], foi descoberto que as emissões intensas de rádio no intervalo de frequência de algumas centenas de kHz ( $\approx 20-800$ ) estavam muito bem associadas a perturbações magnéticas nas regiões aurorais de altas altitudes. Dunckel e cols. se referiram inicialmente a esse fenômeno como ruído de frequência demasiadamente alta (*high-pass noise*).

O primeiro trabalho abordando uma investigação sistemática do fenômeno consistiu no clássico artigo de Gurnett, publicado em 1974 [6]. A partir de dados experimentais, o autor já infere uma série de características da radiação. Foi mostrado que essas emissões de rádio estavam relacionadas com a ocorrência de arcos aurorais no lado noturno do planeta. A radiação foi facilmente identificada como eletromagnética, pois existia um vínculo bastante evidente entre os campos elétrico e magnético associados a ela. Esse vínculo evidencia uma relação linear entre os módulos dos campos elétrico (E) e magnético (B) muito próxima à relação obtida para ondas eletromagnéticas,  $E = cB$ , onde  $c$  é a velocidade da luz.

Desde a sua descoberta a AKR tem sido amplamente estudada, além de ter sido usada como parâmetro para estudos e previsões de outros fenômenos, tais como tempestades e subtempestades magnéticas, por exemplo. A radiação é uma consequência da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre. Atinge picos de intensidade em aproximadamente 250 kHz [8] e raramente é observada no

setor diurno do planeta, por ser gerada por fortes acelerações de elétrons, que ocorrem principalmente no setor noturno.

A radiação é emitida em intervalos distintos, sendo que cada emissão pode durar desde aproximadamente meia hora até várias horas. Períodos de emissão completamente nula podem ocorrer entre duas rajadas consecutivas do fenômeno, às vezes durando por até 24 horas. Um exemplo de emissão da AKR observada pelo satélite IMP 6<sup>2</sup> (*Interplanetary Monitoring Platform 6*) está ilustrado na Fig. 1, que mostra a magnitude do campo elétrico nos canais de 178, 100, 56,2 e 31,1 kHz para o dia 14 de setembro de 1971. Nesse dia o satélite se encontrava próximo ao seu apogeu (cerca de 33,37 raios terrestres), na cauda magnética da magnetosfera. As barras verticais indicam a intensidade média do campo, enquanto o ponto acima de cada barra indica o valor máximo atingido pelo campo elétrico naquele intervalo.

Um espectro de frequências típico de AKR é mostrado na Fig. 2. Esse espectro foi obtido pelo satélite IMP 8<sup>3</sup> (*Interplanetary Monitoring Platform 8*), a uma distância radial de cerca de 25,2 raios terrestres. Na figura ficam claras algumas características da AKR. O espectro atinge picos de intensidade no intervalo entre 100 e 300 kHz. Além disso, é fácil perceber que a intensidade da radiação decresce rapidamente para frequências abaixo de 100 kHz e acima de 300 kHz, se aproximando do nível de ruído cósmico para frequências próximas de 1 MHz.

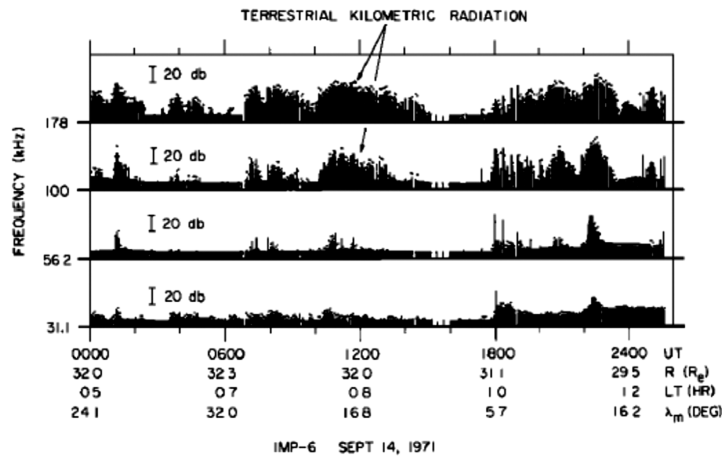


Figura 1 - Dados de campo elétrico do satélite IMP 6 para o dia 14 de setembro de 1971, mostrando vários períodos de intensa emissão de AKR nos canais de 100 e 178 kHz. Fonte: Ref. [6].

<sup>2</sup>Esse satélite foi lançado em 14 de março de 1971 em uma órbita elíptica com a missão de realizar estudos magnetosféricos. Possuía um período de 4,18 dias, inclinação da órbita de 28,7° em relação à eclíptica, apogeu de  $\approx 34$  raios terrestres e perigeu de  $\approx 1,04$  raios terrestres [25] (1 raio terrestre ( $R_T$ )  $\approx 6370$  km). Era alimentado por células solares e baterias químicas e coletou dados até outubro de 1974.

<sup>3</sup>Satélite lançado em 26 de outubro de 1973 em uma órbita elíptica para monitoramento magnetosférico. Possuía apogeu e perigeu de aproximadamente 45 e 25 raios terrestres, respectivamente, inclinação da órbita de 28,7° em relação à eclíptica e período de 12,6 dias [26]. Foi o satélite da série com maior longevidade, coletando dados até 7 de outubro de 2006.

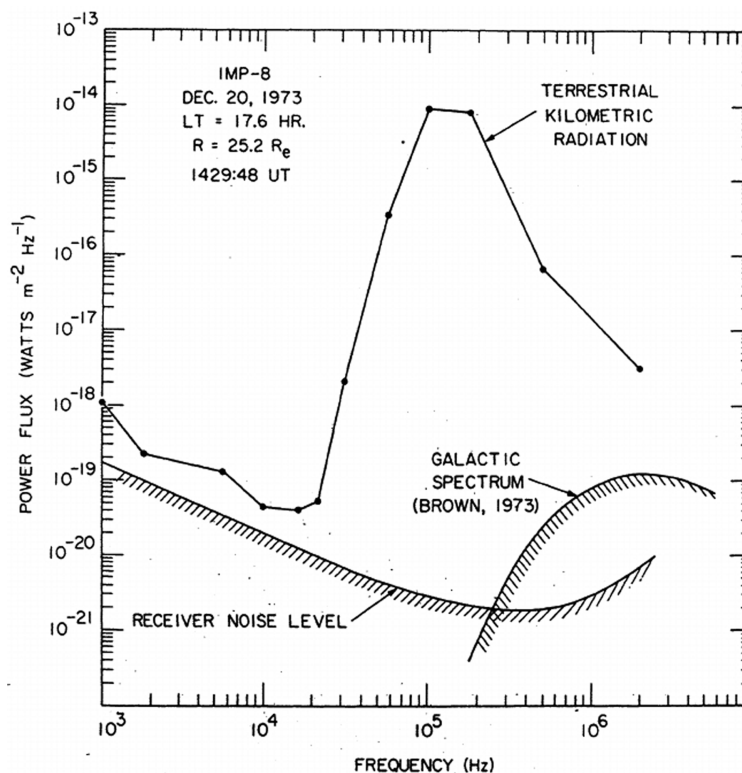


Figura 2 - Espectro de potência da radiação quilométrica auroral observado pelo satélite IMP 8 a uma distância radial de 25,2 raios terrestres, na parte noturna do planeta. Fonte: Ref. [6].

Inicialmente, pensou-se que a AKR fosse gerada de forma contínua em todas as frequências. A estrutura fina da AKR permaneceu desconhecida até o lançamento de satélites equipados com receptores de banda larga, tais como o ISEE 1 (*International Sun-Earth Explorer 1*) e o japonês Jikiken, os quais detectam sinais em uma banda de frequências contínua de vários kHz. Os satélites anteriores portavam receptores que operavam ou em multi canais, como os IMP's, ou com baixa resolução espectral, como o ISIS 1 (*International Satellite for Ionospheric Studies 1*). A AKR é constituída de uma série de emissões individuais, cuja largura espectral é da ordem de 1 kHz, ou até mesmo menor. A distância espectral entre componentes distintos da estrutura fina é, em geral, da ordem de 10 kHz. Vários estudos mostraram que as regiões geradoras da AKR não possuem uma estrutura suave, sendo compostas de muitas regiões de aumentos e rarefações na densidade de plasma. Essas variações são responsáveis pela emissão discreta da radiação [27].

A AKR é produzida pelos intensos fluxos de elétrons que causam as auroras e produzem as corren-

tes responsáveis pelas perturbações magnéticas. Observações de satélites mostram que a AKR é gerada principalmente no modo extraordinário<sup>4</sup> (modo X) e que as emissões geralmente ocorrem em regiões onde a frequência ciclotrônica local ( $f_{ce}$ ) é maior que a frequência eletrônica de plasma ( $f_{pe}$ ) [29]. Em geral,  $\frac{f_{pe}}{f_{ce}} < 0,2 - 0,3$ . O bloqueio imposto pela ionosfera à radiação é devido ao aumento brusco na densidade eletrônica que ocorre na região, pois sendo a frequência eletrônica de plasma proporcional à raiz quadrada da densidade eletrônica, a radiação será refletida quando sua frequência for igual ao valor local de  $f_{pe}$ .

De uma forma geral, a radiação se origina em altitudes relativamente baixas, a distâncias radiais que não ultrapassam três raios terrestres. As fontes são mais comumente encontradas por volta de 22 MLT<sup>5</sup> (hora magnética local, do inglês *Magnetic Local Time*) e acima de 70° de latitude [30].

No clássico estudo feito por Gurnett [6], a distribuição angular da AKR foi abordada, usando-se como base dois anos de observações feitas pelo satélite IMP 6, localizado a distâncias superiores a 5 raios terres-

<sup>4</sup>De acordo com a orientação do campo elétrico da onda em relação ao campo magnético externo, a onda pode ser classificada como extraordinária ou ordinária. Ondas eletromagnéticas do tipo ordinário são aquelas em que o campo elétrico é paralelo ao campo magnético externo,  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$ . Ondas eletromagnéticas do tipo extraordinário possuem seu campo elétrico perpendicular ao campo magnético externo,  $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$  [28].

<sup>5</sup>A hora magnética local é uma componente do sistema de coordenadas geomagnéticas esféricas. É análoga à hora local, exceto pelo fato de que o meio-dia e a meia-noite local ocorrem quando o Sol está no plano definido pelo meridiano que se encontra o observador e os polos geomagnéticos, ao invés dos polos geográficos.

tres (evitando assim o corte imposto pela ionosfera à radiação). Os resultados foram apresentados em termos da frequência de eventos como função da latitude magnética e da hora magnética local. Os resultados para a frequência de 178 kHz estão dispostos na Fig. 3. As áreas mais escuras representam maiores probabilidades de ocorrência da AKR, evidenciando maior incidência do evento durante a noite local, aproximadamente entre 18 e 4 horas (MLT). Do lado diurno, as ocorrências são restritas a latitudes maiores, de tal modo que a forma da distribuição angular em ambos os hemisférios é a de um cone apontado para o equador, centrado aproximadamente às 23 horas (MLT).

A AKR está muito bem relacionada com a ocorrência de arcos aurorais discretos, que são gerados pela precipitação de intensas bandas de elétrons do tipo V-invertido, característica relativa à forma da função de distribuição, que pode ser vista na Fig. 4. Essas bandas contêm feixes de elétrons energéticos, aproximadamente alinhados com as linhas de campo magnético, com energias de feixe  $E_f \approx 5 - 15$  keV e velocidade de feixe  $v_f$  aproximadamente entre 10 e 20% da velocidade da luz [11]. Essas bandas de elétrons que se precipitam constituem as fontes de energia livre para a AKR.

A potência total estimada que é liberada pela AKR atinge picos da ordem de  $10^9$  W, sendo comparada

com a máxima potência dissipada pela precipitação de partículas aurorais, da ordem de  $10^{11}$  W [6]. Isso indica uma eficiência de conversão de energia da ordem de 1%. A potência liberada é comparada à potência total liberada pela radiação decamétrica de Júpiter, fazendo da mesma uma emissão extremamente intensa. Por essa razão, a blindagem proporcionada pela ionosfera é providencial, uma vez que uma fonte de rádio tão potente dirigida diretamente para a superfície terrestre comprometeria de forma drástica as comunicações no intervalo de frequências de rádio em todo o planeta [29].

Os espectros da AKR refletem as localizações de suas fontes. Nas linhas de campo aurorais a frequência de plasma decresce com a altitude. Entretanto, não é tão simples inferir a altitude de geração, já que o espectro também reflete o caminho de propagação da radiação. Uma vez que a propagação da AKR pode ser bloqueada ou refratada na plasmasfera<sup>6</sup>, a depender da frequência, o caminho de propagação para cada frequência é determinado pela altitude da fonte e pelo perfil de densidade na plasmasfera. Assim, o espectro observado também depende da localização do satélite. A Fig. 5 mostra, de forma esquemática, a geração de AKR por feixes de elétrons que se precipitam na magnetosfera terrestre.

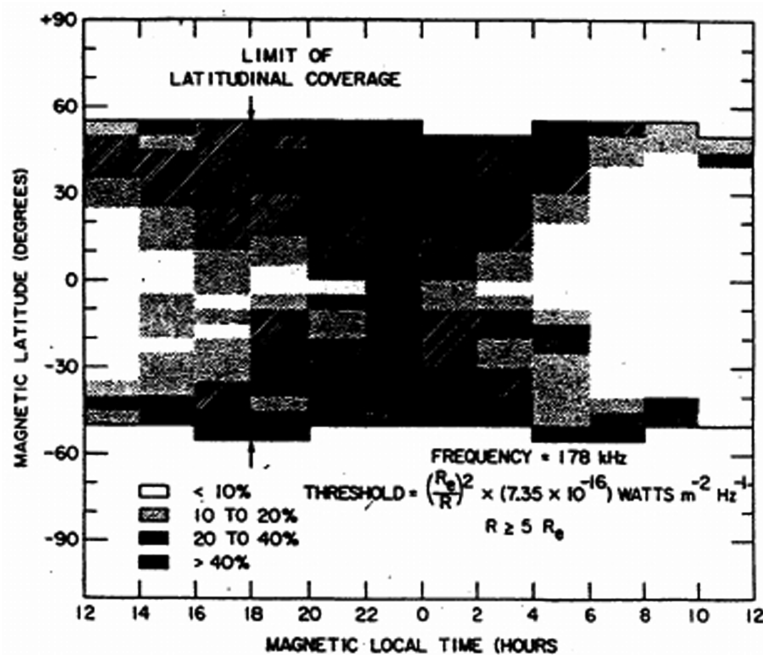


Figura 3 - Porcentagem de ocorrência da AKR em 178 kHz, como função da latitude magnética e do tempo magnético local. Fonte: Ref. [6].

<sup>6</sup>A plasmasfera é a região mais interna da magnetosfera, caracterizada por linhas de campo magnético conectadas ao solo do planeta, ou seja, linhas de campo fechadas. Essa região se caracteriza por apresentar um plasma mais denso, mais frio e de menores energias, sendo separada da magnetosfera externa pela plasmapausa. No plano equatorial a plasmapausa fica a uma distância média de  $\approx 4R_T$  do planeta [1].

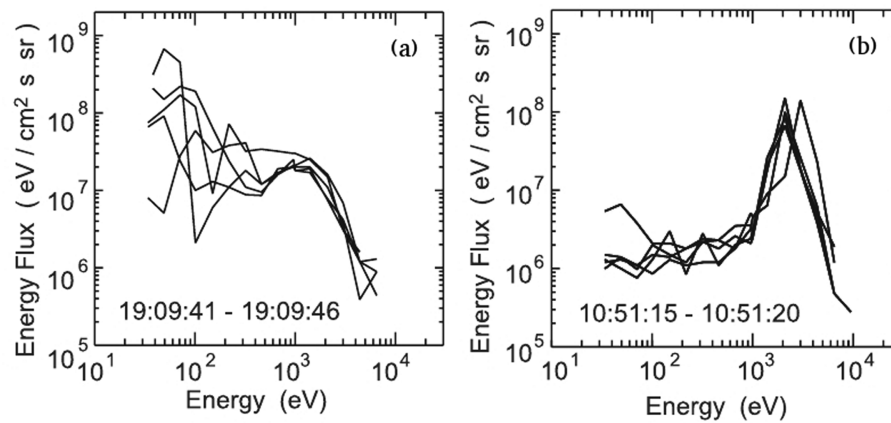


Figura 4 - Espectros de energia entre (a) 19:09:41 e 19:09:46 UT do dia 11 de fevereiro de 1994 e (b) 10:51:15 e 10:51:20 do dia 12 de fevereiro de 1994. Fonte: Ref. [22].

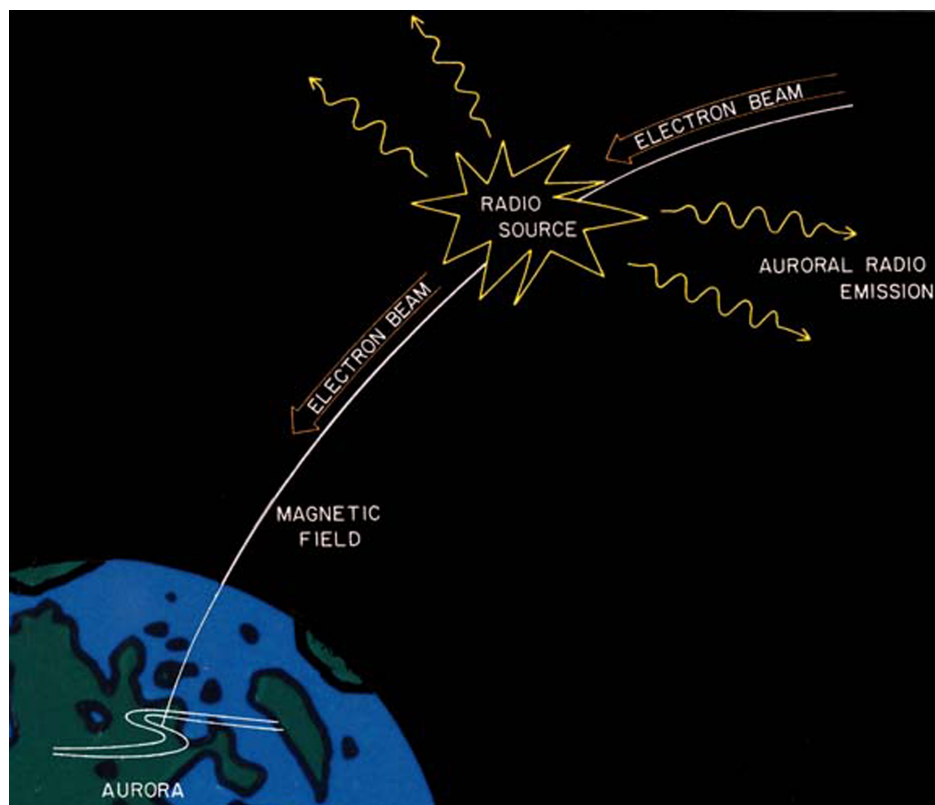


Figura 5 - Representação esquemática da geração de AKR por feixes de elétrons. Disponível em <http://www-pw.physics.uiowa.edu/space-audio/sounds/EarthAKR>. Acesso em maio de 2015.

Como tentativa de se entender e explicar o mecanismo da AKR, várias teorias já foram propostas [10,31–36]. Os detalhes das teorias são completamente diferentes, mas as ideias centrais, de uma forma geral, são similares. Existe um consenso entre todas elas de que, primeiro, a radiação é de natureza induzida, ao invés de espontânea e natural. Segundo, os elétrons que se precipitam nas regiões aurorais são responsáveis pela emissão. A principal discussão é em torno de como

esses elétrons geram a AKR. Grande parte das teorias prediz que a AKR é gerada no modo ordinário (modo O), o que está em desacordo com as observações. Além do mais, a maior parte dessas teorias requer um mecanismo de conversão entre modos de propagação que geralmente reduz a eficiência do processo de uma forma drástica, não sendo adequada para explicar a grande potência associada à radiação.

Dentre as teorias já propostas, a que melhor des-

creve a geração da AKR, sendo a mais bem aceita no meio científico, é conhecida como *maser de elétron-cíclotron*, formulada por Lee e Wu [29]. Nesse modelo, os elétrons injetados da lâmina de plasma descem até a alta atmosfera com diferentes ângulos de passo<sup>7</sup> (*pitch angles*). Por causa da convergência das linhas de campo magnético (efeito de espelho magnético), existe um cone de perdas, definido pelo ângulo  $\theta_{cp}$ , dado por

$$\left( \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}} \right)^{\frac{1}{2}} = \cot \theta_{cp}, \quad (1)$$

onde  $B_{\max}$  e  $B_{\min}$  são os valores máximos e mínimos de campo magnético encontrados pelas partículas injetadas. Elétrons com grandes ângulos de passo e, portanto, fora do cone de perdas, são refletidos e ascendem de volta para a magnetosfera, com distribuições do tipo cone de perdas. Esses elétrons possuem a seguinte desigualdade entre as velocidades paralela  $v_{\parallel}$  e perpendicular  $v_{\perp}$  ao campo magnético

$$\frac{v_{\parallel}}{v_{\perp}} < \cot \theta_{cp}. \quad (2)$$

Através de efeitos relativísticos, a energia livre das partículas com distribuições do tipo cone de perdas é absorvida pelas ondas eletromagnéticas, dando origem à AKR. Com esse modelo é possível prever a predominância das emissões do modo extraordinário.

### 3. AKR e subtempestades magnéticas

Estudos recentes mostram que existe uma boa associação temporal entre subtempestades magnéticas e o aumento e até mesmo o começo de emissão da AKR. Além disso, esses estudos mostram que o índice geomagnético AE e as emissões de AKR estão profundamente ligados [20].

#### 3.1. Subtempestades magnéticas e o índice AE

Subtempestades magnéticas são o tipo mais frequente de atividade geomagnética e são constituídas por processos dissipativos da energia magnetosférica que é armazenada na cauda magnética resultante da interação com o vento solar. Causam várias perturbações na região auroral, tais como o surgimento de auroras e o aumento da densidade de corrente do eletrojo auroral, através do acoplamento que ocorre entre a ionosfera e a magnetosfera [5,14]. Ocorrem com maior frequência nas regiões dos ovais aurorais, que são duas regiões de formato oval centradas nos pólos sul e norte magnéticos.

Vários acontecimentos precedem a fase de expansão de uma subtempestade magnética, podendo ser usados como indicadores do desenvolvimento do fenômeno.

Dentre os acontecimentos pode-se destacar o aumento da probabilidade de intensificações fracas e de curta duração nas auroras e no eletrojo, acompanhado de explosões de ondas ULF, chamadas *Pi-2 bursts*. Uma outra característica que geralmente ocorre antes da fase de expansão é um aumento gradual no tamanho dos ovais aurorais. Esses fenômenos caracterizam a fase de crescimento de uma subtempestade. Durante a fase de crescimento a energia extraída do vento solar é armazenada na magnetosfera. A fase de expansão corresponde à liberação ou recarregamento da energia armazenada, enquanto a fase de recuperação é o retorno da magnetosfera às suas condições normais [1]. Subtempestades típicas têm em média duração entre 1-3 horas e perturbação do campo geomagnético da ordem de 200-2000 nT (nano Tesla), sendo identificadas e quantificadas pelo índice de atividade auroral AE (*Auroral Electrojet*).

O índice AE foi introduzido por Davis e Sugiura [37], com o intuito de caracterizar a influência do eletrojo auroral nas variações no campo magnético terrestre nas regiões polares (altas latitudes). Para a sua obtenção é usada uma rede de estações relativamente próximas aos pólos, como uma tentativa de excluir assim a perturbação produzida pela corrente de anel, que circunda a Terra em latitudes equatoriais. Apenas a componente horizontal (H) do campo magnético é usada para sua obtenção. A média dos dias não perturbados é usada como uma base de referência. A componente H detectada por cada observatório é registrada em intervalos regulares de tempo, sendo plotadas as máximas variações  $\Delta H$  de todos os observatórios em forma de magnetogramas. Os resultados são dois envelopes distintos de valores. O envelope superior, o índice AU (*auroral upper*), é definido em qualquer instante como a máxima perturbação positiva  $\Delta H$  registrada por qualquer estação da rede. De forma similar, o envelope inferior, o índice AL (*auroral lower*) é dado pela máxima perturbação negativa  $\Delta H$  registrada. Finalmente, o índice AE é uma medida única das perturbações, sendo definido como  $AE = AU - AL$  [38]. A Fig. 6, apresenta a variação temporal dos índices AU e AL ao longo de uma subtempestade auroral. O índice AE responde não somente à atividade de subtempestades, mas também a aumentos na pressão dinâmica do vento solar [39].

Resultados obtidos por Gurnett [6] a partir dos dados para o dia 25 de janeiro de 1973 estão dispostos na Fig. 7. O painel inferior mostra o fluxo de potência no canal de 178 kHz do IMP 6, enquanto o painel superior mostra o índice AE. Comparando-se qualitativamente os dois painéis percebe-se claramente que eventos de emissão intensa de AKR correspondem a altos valores de AE. Voots e cols. [9] descobriram essa profunda relação estatística entre o índice AE e a intensidade da AKR. Esse resultado foi confirmado por vários estudos

<sup>7</sup> Ângulo definido entre a velocidade  $\mathbf{v}$  de cada partícula e o campo magnético local  $\mathbf{B}_0$ .

posteriores. No trabalho de Liou e cols. [13] foi demonstrado que a AKR é um bom indicador do início de subtempestades, baseado em um estudo estatístico da relação entre perturbações aurorais e aumentos na intensidade da radiação. Não só a intensidade e o começo da AKR, mas também o intervalo de frequências em que a radiação ocorre seguem a evolução de uma subtempestade. Kaiser e cols. [20] mostraram que a banda de frequência da AKR aumenta à medida que a subtempestade passa da fase de crescimento para a fase de expansão. Os estudos de Moriaka e cols. [40] demonstraram que o intervalo de frequência de detecção da AKR expande em direção a altos e baixos valores à medida que o índice AE aumenta.

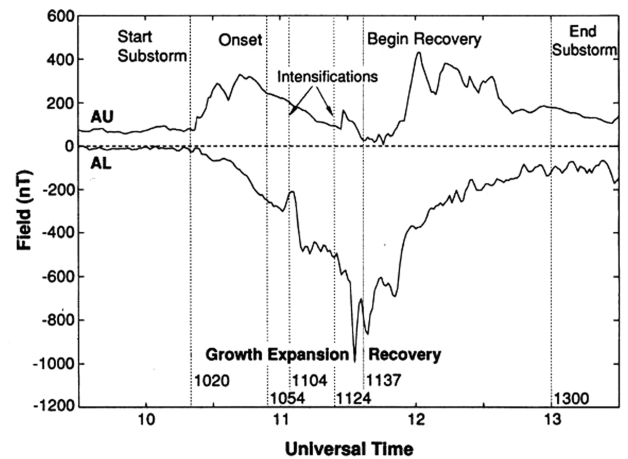


Figura 6 - Índices AU e AL para uma subtempestade típica bem estudada. As três fases dessa subtempestade, crescimento, expansão e recuperação (*growth*, *expansion* e *recovery*, respectivamente) podem ser identificadas pelo comportamento dos índices. O horário correspondente ao início de cada fase é indicado pelas linhas verticais. Fonte: Ref. [1].

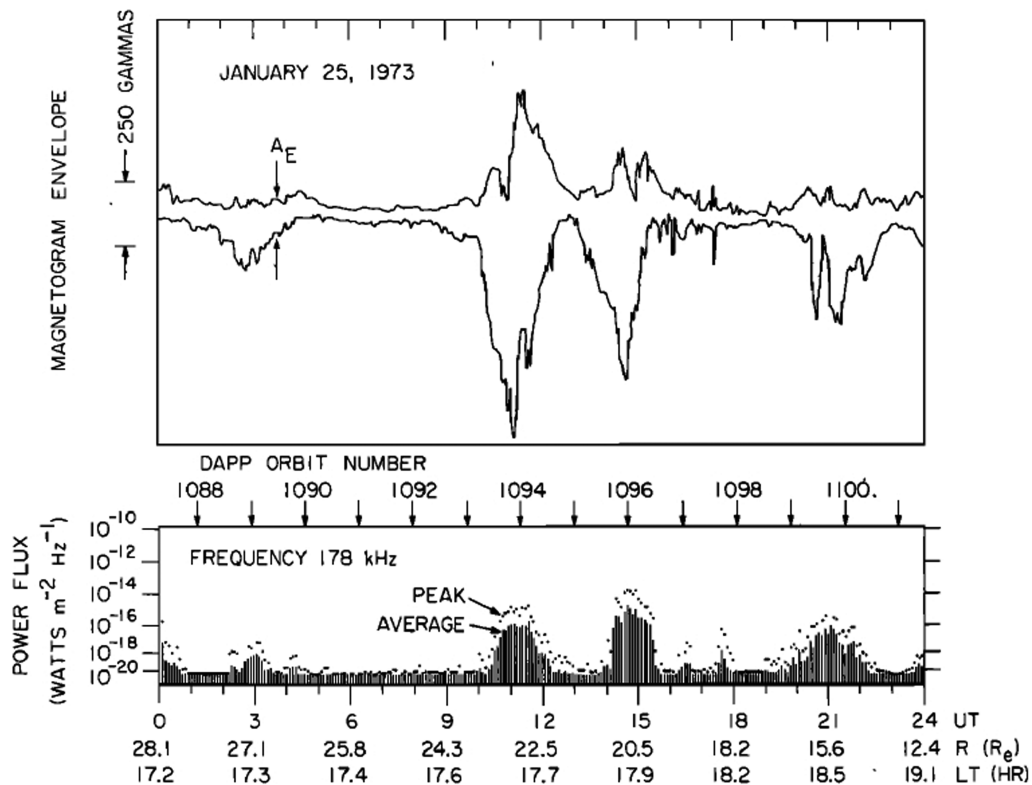


Figura 7 - Fluxo de potência observado pelo satélite IMP 6 em 178 kHz e os correspondentes envelopes de magnetogramas obtidos por estações no solo para o dia 25 de janeiro de 1973. Fonte: Ref. [6].

### 3.2. Radiação quilométrica auroral durante subtempestades magnéticas

Com base em um estudo estatístico, Liou e cols. [13] concluíram que em 70% (83%) dos eventos, os aumentos na emissão da AKR são detectados dentro de  $\pm 1$  (2) minutos do início de subtempestades. Além disso,

descobriram também que o começo da AKR tende a ocorrer, em média, com um pequeno atraso de 0,36 minutos (21 segundos) em relação ao começo das subtempestades.

Assim sendo, existe uma boa correlação temporal entre a ocorrência e aumento da radiação e o início das subtempestades. Portanto, se um satélite de monito-



ramento estiver adequadamente localizado, o aumento nas emissões AKR pode ser usado como um bom indicador do início de subtempestades. Pode até mesmo ser usado para a previsão desses fenômenos, com aproximadamente 21 segundos de antecedência, especialmente se forem observadas outras características de começo de subtempestades simultaneamente com o aumento na emissão da AKR.

É importante o estudo das frequências típicas da AKR durante e após subtempestades aurorais, pois o conhecimento desse intervalo de frequências pode ser usado para se inferir a altitude da fonte. Além disso, o conhecimento da frequência da AKR durante a fase inicial de subtempestades pode ser usado para se determinar onde a aceleração de partículas aurorais se inicia.

Em poucas subtempestades Liou e cols. [13] não detectaram emissões no intervalo espectral da AKR, sendo que nesses eventos o satélite estava localizado ou no setor do amanhecer da magnetosfera ou em latitudes muito baixas. A AKR é raramente observada no setor do amanhecer porque está associada com a aceleração de elétrons energéticos, que ocorre principalmente no setor da meia-noite.

Durante os períodos de subtempestades, a frequência de onda da AKR varia de pouco mais de 20 kHz até mais de 800 kHz. Na fase inicial da subtempestade a AKR é produzida aproximadamente no estreito intervalo entre 200-400 kHz. Posteriormente, dentro de alguns minutos, a intensidade da radiação aumenta e o intervalo espectral de ocorrência se expande consideravelmente [20], cobrindo todas as frequências características do fenômeno. Essa expansão acontece, de forma geral, muito mais rapidamente que a fase de expansão de subtempestades típicas. As frequências médias após a expansão ficam entre aproximadamente 60 e 650 kHz. Porém, o mecanismo controlador do intervalo de frequências da AKR durante subtempestades ainda não é muito bem conhecido, merecendo estudos mais detalhados.

## 4. Radiação quilométrica auroral e tempestades magnéticas

Como já foi dito, a emissão de AKR é intensificada durante subtempestades aurorais e apresenta uma boa correlação com o índice auroral AE. Porém, durante algumas tempestades magnéticas o comportamento das emissões é completamente diferente, chegando a ser até mesmo surpreendente.

### 4.1. Tempestades magnéticas

O estudo das tempestades magnéticas é importante por duas causas principais. Uma se refere ao seu aspecto acadêmico, por ser considerada uma parte central da geofísica. A outra envolve aspectos práticos, que em

muitos casos podem ser de profundo interesse para a humanidade.

O Sol lança grandes quantidades de matéria no espaço interplanetário, o chamado vento solar. Durante períodos de atividade solar intensa, esse vento solar tem a sua velocidade e a sua densidade aumentadas, podendo atingir a Terra com velocidades médias extremamente elevadas, da ordem de até 700 km/s [41]. Em geral, a velocidade média do vento solar a 1 U.A. do Sol (posição correspondente à órbita da Terra) é por volta de 400 km/s.

As tempestades magnéticas são causadas pela chegada das perturbações do vento solar que aumentam em larga escala os campos elétricos no meio interplanetário. A causa primária dessas tempestades está associada a estruturas interplanetárias com campos magnéticos intensos, direcionados para o sul (aproximadamente anti-paralelos ao campo magnético da magnetopausa diurna) e de longa duração, que se interconectam com o campo magnético da Terra e permitem que a energia do vento solar seja transportada para o interior da magnetosfera terrestre. Esse processo é conhecido como reconexão magnética [42].

Partículas do vento solar são injetadas na magnetosfera interna durante tempestades e derivam ao redor do planeta, com os prótons se movendo para oeste e os elétrons para leste. Gradientes e curvaturas do campo geomagnético são as causas da deriva das partículas, que enriquecem a corrente de anel, um sistema de correntes de leste para oeste que circula a Terra em latitudes equatoriais, diminuindo o valor da componente H (horizontal) do campo magnético terrestre na superfície de praticamente todo o planeta. Além disso, tempestades geomagnéticas são acompanhadas de aceleração e termalização de partículas da lâmina de plasma e da corrente de anel, provocando ainda auroras [21]. O estudo das diferenças nas características da AKR entre tempestades e subtempestades magnéticas pode desempenhar um papel chave para a compreensão da dinâmica de tempestades e também de subtempestades durante tempestades magnéticas.

### 4.2. O Índice Dst e as fases das tempestades

Durante períodos de intensa atividade magnética a componente H do campo geomagnético sofre decréscimos, recuperando seus valores regulares de forma lenta e gradual. Essa diminuição na componente H é a assinatura de uma tempestade magnética, que em geral se inicia quando o acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera se torna intenso e prolongado o suficiente.

A evolução de uma tempestade é quantificada pelo índice Dst, que é definido como a média instantânea mundial da perturbação da componente H em solo nas regiões equatoriais. O índice é dado em nT (nano Tesla) e serve de quantificador da atividade magnetosférica

em escala global [43]. Valores negativos de Dst indicam decréscimos no campo geomagnético, enquanto variações positivas do índice apontam para compressões da magnetosfera, causadas por aumentos da pressão dinâmica do vento solar, aumentando o campo geomagnético.

Aumentos súbitos na componente H do campo indicam o início de uma tempestade magnética. O aumento da pressão dinâmica exercida pelo vento solar sobre a magnetosfera eleva as correntes na magnetopausa e produz perturbações positivas em H na superfície do planeta. Caracterizado por valores positivos de Dst, esse começo é chamado de fase inicial da tempestade e pode durar algumas horas. Em seguida a tempestade entra em sua fase principal, que é caracterizada por um decréscimo rápido e perturbado da componente H e, conseqüentemente, do índice Dst. Esse decréscimo é causado pelo aumento da injeção de partículas na corrente de anel. À medida que o campo magnético interplanetário se torna mais fraco, ou inverte sua polaridade, a injeção de partículas na magnetosfera diminui. A densidade da corrente cresce até um valor assintótico, onde a taxa de injeção e de perdas de partículas se tornam iguais. A partir daí o crescimento da densidade da corrente de anel cessa e as perturbações começam a diminuir. Tem início assim a fase de recuperação da tempestade, onde os valores da componente H e de Dst retornam lentamente aos seus valores normais [1].

A Fig. 8 mostra a grande correlação existente entre os índices AE e Dst durante tempestades magnéticas. Esse resultado foi obtido por Morioka e cols. [21], através de análises de superposição para 15 tempestades ocorridas entre 1990 e 1993. À medida que a tempestade se desenvolve, o índice AE aumenta na fase principal e diminui na fase de recuperação. Assim, a AKR deveria seguir o comportamento de AE. Porém, como será mostrado a seguir, isso nem sempre acontece.

O intervalo de valores observáveis do índice Dst é aproximadamente entre -600 nT e +100 nT. As condições de um período não perturbado são caracterizadas por um valor nulo de Dst, mas, em geral, isso não é correto. A média dos valores do índice para dias calmos geralmente é negativa e não necessariamente representa a existência de uma tempestade magnética. Em geral, tempestades com valores de Dst entre -50 e -30 nT são classificadas como fracas, enquanto tempestades onde  $-100 \text{ nT} < \text{Dst} < -50 \text{ nT}$  são chamadas de moderadas. Por fim, se o pico de Dst for igual ou inferior a -100 nT, a tempestade é classificada como forte ou severa [41].

### 4.3. AKR Durante tempestades magnéticas

À medida que uma tempestade magnética evolui, o índice AE aumenta durante sua fase principal e diminui na fase de recuperação, como pode ser visto na Fig. 8. Desse modo, esperar-se-ia que a emissão de AKR

também apresentasse aumento e decréscimo durante a evolução da tempestade. Porém, o comportamento da radiação é inesperado durante algumas tempestades, chegando a desaparecer claramente nas fases inicial e principal, reaparecendo na fase de recuperação [21]. Esse comportamento chega a ser surpreendente, já que ocorrem violentas precipitações de partículas na fase inicial de uma tempestade magnética.

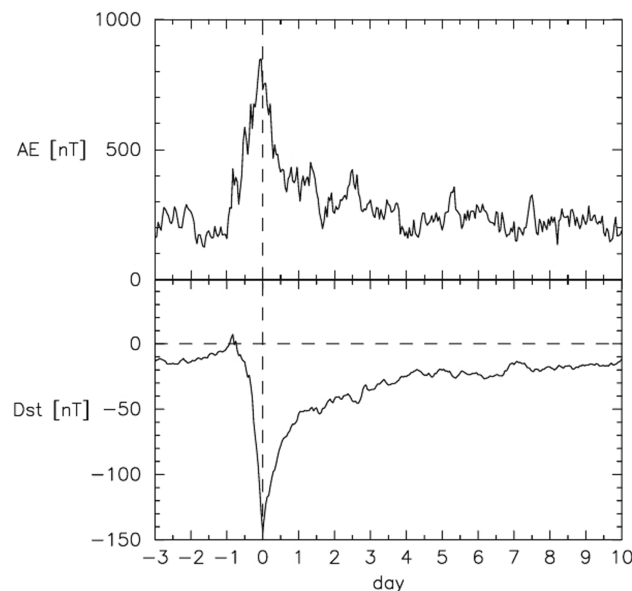


Figura 8 - Relação entre os índices AE e Dst obtida através da superposição de 15 tempestades magnéticas entre 1990 e 1993. Fonte: Ref. [21].

A Fig. 9 apresenta o espectro dinâmico da AKR para os dias 21, 22 e 23 de fevereiro de 1994, detectado pelo satélite *Geotail*, juntamente com os índices AE e Dst. Durante esse período o satélite estava no espaço interplanetário, a cerca de 67 raios terrestres do planeta e na região do anoitecer da magnetosfera. Uma tempestade magnética teve início às 09:01 UT no dia 21 de fevereiro. O valor mínimo do índice Dst foi atingido aproximadamente às 02:00 UT do dia 22. Essa tempestade foi causada por um choque interplanetário [44] bastante intenso e um evento de CME (*Coronal Mass Ejection*), acompanhados por uma alta densidade de plasma no meio interplanetário de até 100 partículas por  $\text{cm}^3$ . O espectro mostra que havia emissão de AKR antes do início da tempestade, e que essa foi completamente extinta com o início da atividade magnética, entre aproximadamente 10:00 UT e 20:00 UT no dia 21. À medida que a tempestade passou pelo valor mínimo de Dst e entrou na fase de recuperação, a AKR voltou a ser observada, sendo que as potências mais intensas foram observadas em um vasto intervalo de frequências, aproximadamente entre 20:00 UT do dia 21 e 14:00 UT do dia 22. Observações feitas com o satélite Akebono apresentam resultados semelhantes, mostrando que, em geral, a AKR desaparece nas fases inicial e principal de algumas tempestades magnéticas [21].

Em um estudo mais recente, Seki e cols. [22] mostraram que os elétrons que se precipitam durante as fases inicial e principal de tempestades magnéticas onde ocorre desaparecimento da AKR não são caracterizados por distribuições do tipo v-invertido, mas sim por distribuições do tipo Maxwelliana, indicando a ausência ou insuficiência de potenciais alinhados ao campo magnético.

A relação de corrente-voltagem na região de acoplamento ionosfera-magnetosfera foi desenvolvida por Knight [45]. A densidade de corrente alinhada ao campo magnético é expressa, supondo-se que os portadores de corrente são os elétrons magnetosféricos com distribuições Maxwellianas, como

$$j_{\parallel} = eN \left( \frac{K_{th}}{2\pi m_e} \right)^{1/2} \frac{B_i}{B_{V_{\parallel}}} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{B_{V_{\parallel}}}{B_i} \right) \times \exp \left\{ - \frac{eV_{\parallel}}{K_{th} \left[ \left( \frac{B_i}{B_{V_{\parallel}}} \right) - 1 \right]} \right\} \right], \quad (3)$$

onde  $j_{\parallel}$  e  $V_{\parallel}$  são a densidade de corrente e a diferença de potencial paralelas ao campo magnético, respectivamente,  $N$  é a densidade de plasma e  $K_{th}$

é a energia térmica das partículas.  $B_i$  é o campo magnético ionosférico e  $B_{V_{\parallel}}$  é a magnitude do campo magnético no topo da variação de potencial ao longo da linha de campo. Os símbolos  $m_e$  e  $e$  representam a massa e a carga elementar, respectivamente [22]. A Eq. (3) é válida até mesmo para períodos de tempestades magnéticas.

O caso onde o potencial alinhado ao campo não é formado ( $V_{\parallel} = 0$ ) e a AKR desaparece apesar de fortes correntes alinhadas ao campo, significa que elétrons com densidade  $N$  e energia térmica  $K_{th}$  são suficientemente supridos pela magnetosfera para manter a corrente alinhada no sistema de acoplamento entre a magnetosfera e a ionosfera. Já o caso onde o potencial alinhado é formado e a AKR reaparece, sugere que o fluxo de elétrons magnetosféricos se torna insuficiente para manter por si só a corrente alinhada ao campo e, assim, o potencial alinhado reaparece para manter a relação de corrente-voltagem no sistema [22]. Isso sugere que o desenvolvimento do potencial alinhado ao campo não é necessário para a manutenção da corrente de acoplamento entre a ionosfera e a magnetosfera durante as fases inicial e principal de algumas tempestades, mostrando serem diferentes os processos de dissipação da energia magnetosférica através da ionosfera auroral durante tempestades e subtempestades magnéticas.

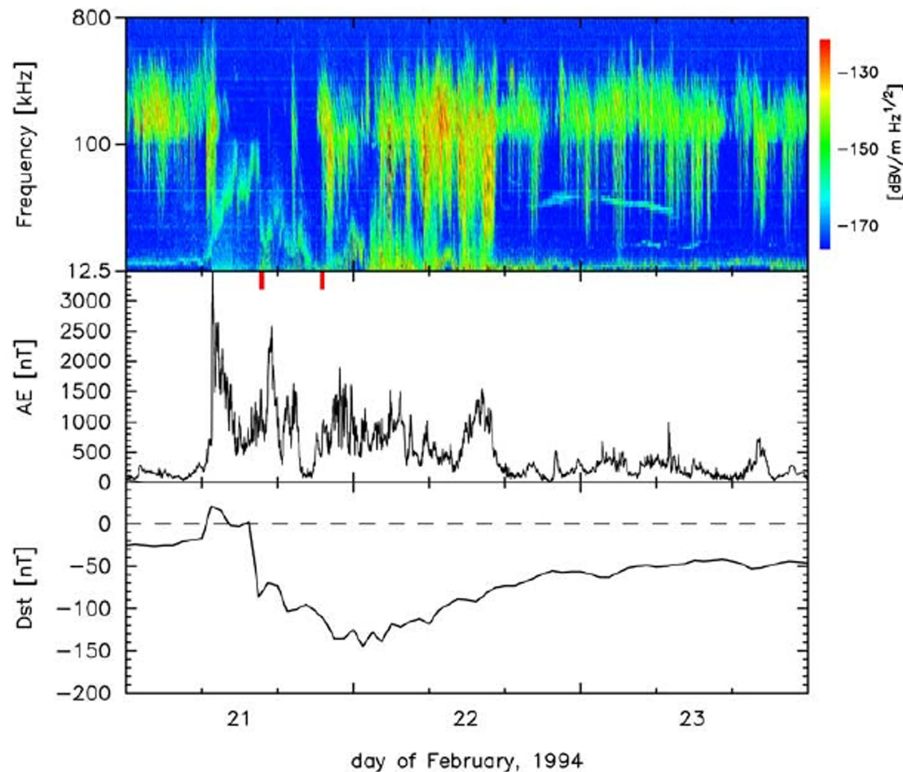


Figura 9 - Desaparecimento da AKR observada com o satélite Geotail para o período de 21 a 23 de fevereiro de 1994. O painel superior mostra o espectro no intervalo de frequência de 12,5 a 800 kHz, do meio o índice AE e o inferior o índice Dst. Fonte: Ref. [21].

Cinco espectros de energia superpostos a cada segundo para o dia 11 de janeiro de 1994 e 12 de janeiro de 1994 estão mostrados na Fig. 4, nos painéis (a) e (b) respectivamente. O painel (a) corresponde à fase principal da tempestade magnética ocorrida naquele dia, enquanto o painel (b) corresponde à sua fase de recuperação. Em (a) não existe característica de aceleração alinhada ao campo magnético, mas sim de precipitação de elétrons energéticos no intervalo de energia entre 200 eV a 4 keV. Por outro lado, o espectro de energia durante a fase de recuperação (b) mostra uma estrutura de V invertido bem desenvolvida, com um pico de energia bastante evidente, indicando um feixe de precipitação de cerca de 2 keV.

O fato de ter sido observada a precipitação de elétrons energéticos ao invés de precipitação do tipo feixe durante as fases inicial e principal da tempestade, sugere que o potencial alinhado ao campo foi muito fraco ou sequer formado nesse período. O reaparecimento da AKR e a simultânea precipitação por feixe durante a fase de recuperação indicam a formação do potencial.

Nos casos em que ocorre o desaparecimento da AKR, em geral, acontece um grande aumento na densidade iônica da lâmina de plasma e esse aumento perdura por praticamente toda a fase inicial e principal da tempestade. Em geral esse tipo de acréscimo na densidade é causado por ICMEs (*Interplanetary Coronal Mass Ejections*). O fenômeno é conhecido como lâmina de plasma superdensa (*superdense plasma sheet*). O aumento na densidade da lâmina de plasma e o desaparecimento da AKR acontecem simultaneamente, evidenciando que a alta densidade local é capaz de fornecer as partículas necessárias para a manutenção da relação de corrente-voltagem (Eq. (3)) na região de acoplamento entre a ionosfera e a magnetosfera, sem a necessidade da formação do potencial  $V_{\parallel}$  alinhado ao campo magnético.

Por outro lado, durante as tempestades onde a AKR não desaparece, em geral, também não se observa um aumento muito acentuado na densidade da lâmina de plasma, que se mantém aproximadamente estável. Dessa forma, os elétrons magnetosféricos não são suficientes para manter o acoplamento ionosfera-magnetosfera, sendo mantido o potencial  $V_{\parallel}$  e, conseqüentemente, a AKR não desaparece durante essas tempestades [22].

Nesse artigo foram apresentadas ao leitor as principais características da AKR, bem como suas particularidades durante subtempestades e tempestades magnéticas. Ao longo do texto várias referências foram mostradas, de forma que o leitor mais interessado possa se aprofundar e aprender mais sobre o assunto.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Dr. Marcos Silveira (PDE - CNPq e NASA/GSFC, USA) pelas valiosas contribuições para a escrita desse artigo.

## Referências

- [1] M.G. Kivelson and C.T. Russell, *Introduction to Space Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995).
- [2] W.H. Campbell, *Introduction to Geomagnetic Fields* (Cambridge University Press, Cambridge, 1997).
- [3] I.A. Daglis, *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure* (Kluwer Academic Press, Dordrecht, 2004).
- [4] M. Ogurtsov, M. Lindholm and Risto Jalkanen, InTech DOI: 10.5772/30670. Disponível em <http://www.intechopen.com>, acesso em 15/3/2015.
- [5] E. Costa Jr., F.J. R. Simões Jr., F.R. Cardoso and M.V. Alves, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 4201 (2011).
- [6] D.A. Gurnett, *Journal of Geophysical Research* **79**, 4227 (1974).
- [7] W.S. Kurth, M.M. Baunback and D.A. Gurnett, *Journal of Geophysical Research* **80**, 2764 (1975).
- [8] J.L. Green, D.A. Gurnett and S.D. Shawhan, *Journal of Geophysical Research* **82**, 1825 (1977).
- [9] G.R. Voots, D.A. Gurnett and S.I. Akasofu, *Journal of Geophysical Research* **82**, 2259 (1977).
- [10] R.W. Boswell, *Geophysical Research Letters* **5**, 395 (1978).
- [11] C.L. Grabbe, *Reviews of Geophysics and Space Physics* **19**, 627 (1981).
- [12] D.L. Gallagher and N. D'Angelo, *Geophysical Research Letters* **8**, 1087 (1981).
- [13] K. Liou, C.I. Meng, A.T.Y. Lui and P.T. Newell, *Journal of Geophysical Research* **105**, 25 (2000).
- [14] R.J. Strangeway, R.E. Ergun, C.W. Carlson, J.P. McFadden, G.T. Delory and P.L. Pritchett, *Physics and Chemistry of the Earth* **26**, 145 (2001).
- [15] A. Morioka, Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, H. Misawa A. Kamumoto, H. Oya, H. Matsumoto, K. Kashimoto and T. Mukai, *Journal of Geophysical Research* **110**, A11223 (2005).
- [16] A. Morioka, Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, H. Misawa, T. Sakanoi, K. Yumoto, R.R. Anderson, J.D. Menietti and E.F. Donovan, *Journal of Geophysical Research* **112**, A06245 (2007).
- [17] A. Morioka, Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, H. Misawa, K. Yumoto, G.K. Parks, R.R. Anderson, J.D. Menietti, E.F. Donovan, F. Honary and E. Spanswick, *Journal of Geophysical Research* **113**, A09213 (2008).
- [18] P. Zarka, *Advances in Space Research* **33**, 2045 (2004).
- [19] P. Zarka, *Journal of Geophysical Research* **103**, 20 (1998).
- [20] M.L. Kaiser and J.K. Alexander, *Journal of Geophysical Research* **82**, 5283 (1977).

- [21] A. Morioka, Y. Miyoshi, T. Seki, F. Tsuchiya, H. Misawa, H. Oya, H. Matsumoto, K. Kashimoto, T. Mukai, K. Yumoto and T. Nagatsuma, *Journal of Geophysical Research* **108**, 1226 (2003).
- [22] T. Seki, A. Morioka, Y.S. Miyoshi, F. Tsuchiya, H. Misawa, W. Gonzalez, T. Sakanoi, H. Oya, H. Matsumoto, K. Kashimoto and T. Mukai, *Journal of Geophysical Research*, **110**, A05206 (2005).
- [23] E.A. Benediktov, G.G. Getmantsev, N.A. Mityakov, V.O. Rapoport and A.F. Tarasov, *Cosmic Research* **6**, 791 (1968).
- [24] N. Dunckel, B. Ficklin, L. Rorden and R.A. Helliwel, *Journal of Geophysical Research* **75**, 1854 (1970).
- [25] U.S. Inan, T.F. Bell, D.L. Carpenter and R.R. Anderson, *Journal of Geophysical Research* **82**, 1177 (1977).
- [26] K.I. Paularena, G.N. Zastenker, A.J. Lazarus and P.A. Dalin, *Journal of Geophysical Research* **103**, 245 (1997).
- [27] R.F. Benson, M.M. Mellott, R.L. Ruff and D.A. Gurnett, *Journal of Geophysical Research* **93**, 7515 (1988).
- [28] F.F. Chen *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion* (Plenum Press, New York, 1984), 2<sup>nd</sup> ed.
- [29] C.S. Wu and L.C. Lee, *The Astrophysical Journal* **230**, 621 (1979).
- [30] R.E. Ergun, C.W. Carlson, J.P. McFadden, G.T. Delory, R.J. Strangeway and P.L. Pritchett, *The Astrophysical Journal* **538**, 456 (2000).
- [31] R.F. Benson, *Geophysical Research Letters* **2**, 52 (1975).
- [32] A.A. Galeev and V. Krasnoselkikh, *JETP Letters, English Translation* **24**, 219 (1976).
- [33] D.B. Melrose, *The Astrophysical Journal* **207**, 651 (1976).
- [34] P. Palmadesso, T.P. Coffey, S.L. Ossakow and K. Papadopoulos, *Journal of Geophysical Research - Space Physics* **81**, 1762 (1976).
- [35] D. Jones, *Astronomy and Astrophysics* **55**, 245 (1977).
- [36] D. Jones, *Geophysical Research Letters* **4**, 121 (1977).
- [37] T.N. Davis and M. Sugiura, *Journal of Geophysical Research* **7**, 785 (1966).
- [38] G. Rostoker, *Reviews of Geophysics and Space Physics* **4**, 935 (1972).
- [39] T. Murata, H. Matsumoto, H. Kojima and T. Iemori, In: *Symposium on Upper Atmospheric Physics* (Kyoto, 1997), second edition.
- [40] A. Morioka, H. Oya and S. Miyatake, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* **33**, 37 (1981).
- [41] W.D. Gonzalez, J.A. Joselyn, Y. Kamide, H.W. Kroehl, G. Rostoker, B.T. Tsurutani and V.M. Vasyliunas, *Journal of Geophysical Research - Space Physics* **99**, 5771 (1994).
- [42] W.D. Gonzalez, B.T. Tsurutani and A.L.C. Gonzalez, *Space Science Reviews* **88**, 529 (1999).
- [43] S.I. Akasofu and S. Chapman, *Solar Terrestrial Physics* (Oxford University Press, Oxford, 1972).
- [44] E. Echer, M.V. Alves e W.D. Gonzalez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 51 (2011).
- [45] S. Knight, *Planetary and Space Science* **21**, 741 (1973).