



A Influência de Raios Cósmicos na Atmosfera terrestre: Auroras e Tempestades

Bernardo Rosalinski Russomano, Arthur Marques Moraes

Copyright 2019, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

This paper was prepared for presentation at 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, held in Rio de Janeiro, Brazil, 19-22 August 2019.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 16th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

In this paper I present some essential information about the influence of cosmic rays on the process of auroral formation and on their role as a trigger for lightning strokes on Earth. The cosmic rays we address here are originated either from extra-galactic sources or from the Sun. Due to its proximity to our planet, particles ejected from the Sun have a prominent contribution to many atmospheric phenomena we observe on Earth. These interplanetary particles are expelled from the star after innumerable reactions in all of its layers, starting in its core and being ejected to space by different processes. These ejected particles become a plasma cloud that navigates through space and reaches Earth's magnetosphere. Here at our planet's magnetic field the plasma cloud interact through a series of complex mechanisms till they penetrate the Van Allen inner-belt and ionosphere.

Introdução

Nesse artigo apresentamos um estudo sobre a influência de raios cósmicos na atmosfera terrestre com particular atenção dedicada aos fenômenos das auroras e raios. A influência da radiação cósmica emitida pelo Sol nesses fenômenos será nosso principal foco.

Raios cósmicos são as partículas de mais alta energia da natureza e que compõem o clima espacial. São, em geral, 90% núcleo do Hidrogênio, 8% partículas alpha, 1% elétrons e 1% núcleos de íons pesados. Elas viajam pelo meio interplanetário e têm origem no núcleo de estrelas e em explosões de supernova, além de algumas fontes ainda não totalmente conhecidas.

São classificados em Raios Cósmicos Solares (RCSs) e Galáticos (RCGs).

Para que apareçam auroras boreais e austrais, ou luzes do norte e sul, respectivamente, é necessário que haja uma subtempestade geomagnética. Para tal, partículas de um vento solar deverão interagir com a magnetosfera de forma que cause uma tempestade geomagnética (uma série de movimentos de plasma e variações no campo magnético terrestre) (AKASOFU, S-I., 2007).

Sobre os raios, descargas elétricas na atmosfera, entende-se que não são apenas causados por fenômenos terrestres. Esses precisam de uma considerável força elétrica para romper a rigidez dielétrica do ar. Primeiro, há a movimentação das cargas no interior da nuvem cumulonimbus, separando cargas originalmente em equilíbrio. Depois, elas correm pelo ar até encontrar uma concentração de cargas opostas. Estudos mostram que há certos tipos de raios onde os RCs proporcionam a ruptura dielétrica do ar, ionizando-o (HOELLER, H., 2012).

Para entender tais fenômenos, suas causas, consequências e mecanismo de formação, foi necessário um estudo base sobre o Sol e sua atividade. Essa estrela é a fonte principal de partículas cósmicas que chegam em nosso planeta.

Teoria

O Sol

O Sol, assim como o nosso planeta, é estruturado em camadas com diferentes tamanhos, densidades, temperaturas e composição. É no núcleo onde é gerada maior parte da sua energia, resultante da fusão nuclear entre átomos de H e He.

Depois do núcleo vem a Zona radiativa e a convectiva: porção por onde passa o resultado dessas fusões de átomos, até chegarem à zona convectiva. Nela surgem as células de convecção, por onde a energia gerada no núcleo alcança as camadas externas, com movimentos circulares devido à variação de temperatura e pressão.

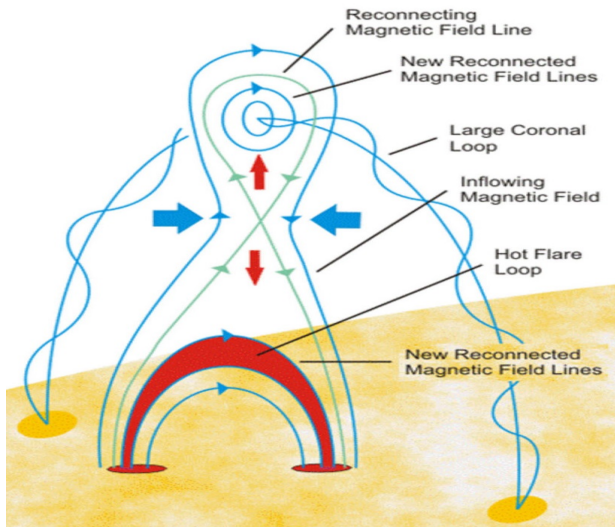


Figura 1: processo de reconexão magnética na coroa solar (NASA, Reconnection on the Sun, 2019 [Internet])

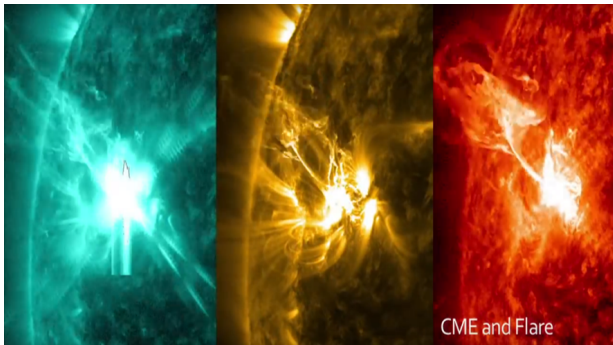


Figura 2: Mesmo instante observado pelo *Solar Dynamics Observatory* em diferentes comprimentos de onda. À esquerda vê-se com clareza o *flare* e à direita a CME (NASA — The Difference Between CMEs and Solar Flares, 2019 [Internet])

Na atmosfera solar estão a fotosfera, cromosfera, a região de transição e a coroa (ou coroa), nessa ordem. A fotosfera marca o “topo” das células de convecção, formando grânulos: formas de bolhas, aonde a energia é dissipada para o meio interestelar. Assim como os grânulos, as manchas (*sunspots*) também aparecem na fotosfera. São regiões semelhantes aos grânulos, porém possuem um campo magnético próprio e muito mais intenso, de 0,1 a 0,4T. São escuras e mais frias que o resto do Sol e o aparecimento de duas com polaridades magnéticas opostas permite a formação de proeminências (*loops*). Proeminências são partículas carregadas que seguem a orientação do campo magnético com polos nas manchas, possibilitando a observação das linhas de campo, se estendendo até fora da co-

rona. Os *loops* podem ter campos magnéticos tão intensos, coincidentes com os de outros *loops*, e com velocidades tão próximas da velocidade da luz, que as cargas que correm nele se expõem, ocasionando um *flare* ou até uma CME (*Coronal Mass Ejection*). Da mesma forma, a proeminência pode sofrer um fracionamento, liberando partículas com velocidades menores que da CME.

Acredita-se que a explicação para esses eventos é um fenômeno da física magneto-hidrodinâmica chamado de reconexão magnética, observado na figura 1. Para entendê-lo é preciso ter em mente, primeiro, a topologia da interação de dois campos magnéticos opostos. Quando analisamos esse processo entre dois plasmas, o resultado é o que nomeamos reconexão. Após isso, as linhas que tomaram outro sentido podem se reconectar, conectando-se novamente ou até se ligando a outro plasma. Quando as linhas se reencontram ocorre uma espécie de “explosão magnética”, aonde as partículas são aceleradas, devido à conversão de energia magnética em energia cinética e térmica.

Por outro lado, os *flares*, descritos pela NASA como uma explosão de flashes de luz, possuem classificação, em valores de potência, muito importante para o estudo da atividade solar e clima espacial: A, B, C, M e X (ordem crescente, sendo classificado como classe X quando o fluxo de raios-x supera $10^{-4}W/m^2$). Cada classe possui um valor máximo 10 vezes maior que o anterior, com exceção da X, que já teve valores maiores detectados. Enquanto os *flares* são vistos como flashes, uma CME é a própria massa carregada ejetada. Essa demora de um a três dias para alcançar a Terra e tem um sentido definido (não é em todas as direções como as ondas eletromagnéticas dos *flares*). Como observado na figura 2, *Flares* de classe M ou X normalmente acompanham CMEs e interferem nos meios de comunicação e localização na Terra, por interagirem com as ondas que dão funcionamento a esses sistemas.

Na corosfera são geradas as espículas: jatos de plasma que se dão pela pressão entre átomos e posterior alívio. Acima da cromosfera está a região de transição, camada em que a temperatura dá um salto de 8000 para 500.000K na coroa.

A coroa, camada mais externa, é muito importante para o estudo do clima espacial por ser onde se observa as CMEs e os buracos coronais: regiões semelhantes às manchas, escuras e relativamente frias, porém muito maiores (*Coronal hole*). Nesse fenômeno, o plasma é expulso do Sol com maior facilidade em comparação às CME (não necessita de uma explosão

ou de uma corda de fluxo, *flux rope*). As partículas vindas dessas porções do Sol podem chegar a ser mais energéticas do que as de uma CME, contudo, ao serem expelidas, elas são comprimidas pelas partículas de ventos menos energéticos, na Região de Interação de Fluxo. Dessa forma, poucas horas depois de saírem da estrela, as partículas do *hole* se englobam com as de outros fenômenos menos energéticos num mesmo vento, tornando-se mais denso, mais lento e gerando uma onda de choque. Ventos de espículas têm velocidade em torno de 400 km/s , enquanto que os ventos de CMEs e *Coronal holes* alcançam 1000 km/s . Na figura 3 podemos ver as camadas e alguns eventos solares importantes.

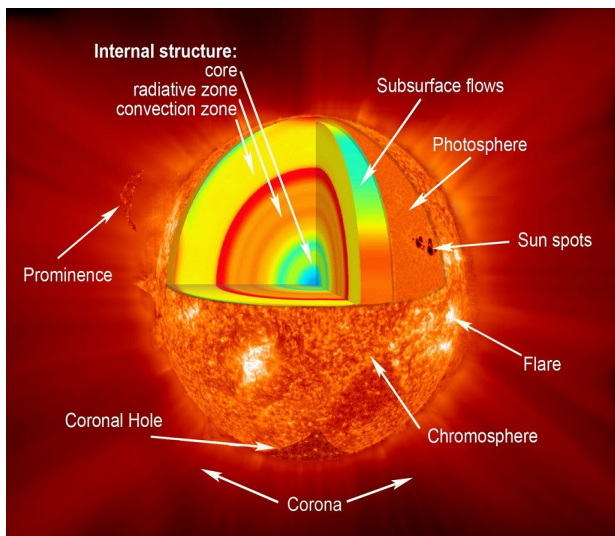


Figura 3: O Sol, suas camadas e alguns fenômenos de liberação de energia e partículas cósmicas (NASA, The Sun [Internet]).

O ciclo solar

A partir da observação da atividade solar durante décadas, foi desenvolvido um levantamento chegando à conclusão de que o Sol possui ciclos de aproximadamente 11 anos. Isto é, dentro desse período, haverá um momento de ápice em que os *flares*, os *loops*, e as CMEs, por exemplo, serão mais intensos e perceptíveis.

Por ser composto de matéria no estado plasma (fluido) e possuir um período de rotação na latitude 0° mais curto do que nos polos, o Sol tem seu campo magnético interno e de superfície bastante enrolado. No início de um ciclo as linhas seguem os meridianos solares e com o passar do tempo sua orientação é alterada. Na figura 4 vemos a relação que comprova que a estrela tem ciclos de atividade, com pontos máximos e mínimos.

É essa complexidade magnetométrica que propicia os inúmeros eventos de liberação de energia e matéria para o espaço, os quais constituem o vento solar e o clima espacial. A densidade típica do vento solar é da ordem de 5 partículas por centímetro cúbico e possui a mesma quantidade de íons e elétrons, sendo 95% hidrogênio ionizado H^+ (V.M. Souza, 2016).

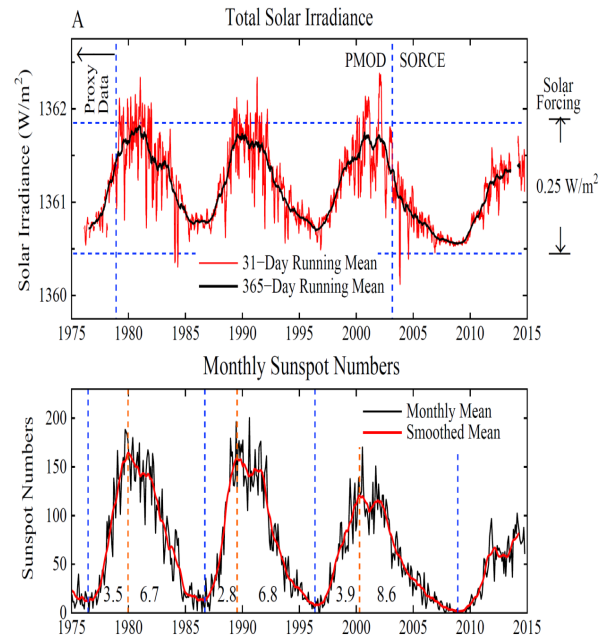


Figura 4: Gráficos de irradiância solar e números de *sunspots* de 1975 a 2015 (HANSEN, 2013).

A radiação cósmica

Raios cósmicos são partículas altamente energéticas, que possuem mais que 1 MeV de energia (aproximadamente 90% núcleo do H, 8% partículas alpha, 1% elétrons e 1% núcleos de íons pesados). Presentes no meio interplanetário como resultado de reações em estrelas, principalmente, os raios cósmicos se misturam com o gás e poeira interestelares (Astronomia e Astrofísica, S. O. Kepler et al; 2014). O gás é composto majoritariamente de hidrogênio neutro que curiosamente é iluminado (ionizado) ao se aproximar de estrelas que emitem muita radiação ultravioleta (nebulosa gasosa de emissão). A poeira é composta principalmente por grafite, silicato e gelo de água. Partículas originárias de outras fontes além do Sol, como explosões de supernova, podem alcançar níveis de ultra-alta energia, acima de 1 EeV (exa-electron volts). Essas são tão raras que levam 1 século para atingir todos os quilômetros quadrados da Terra. Na atmosfera, ocorre o que chamam de chuva cósmica: raios cósmicos de

alta energia ao colidirem com as moléculas de ar aqui presentes decaem em outros tipos de partículas elementares, como representado na figura 5.

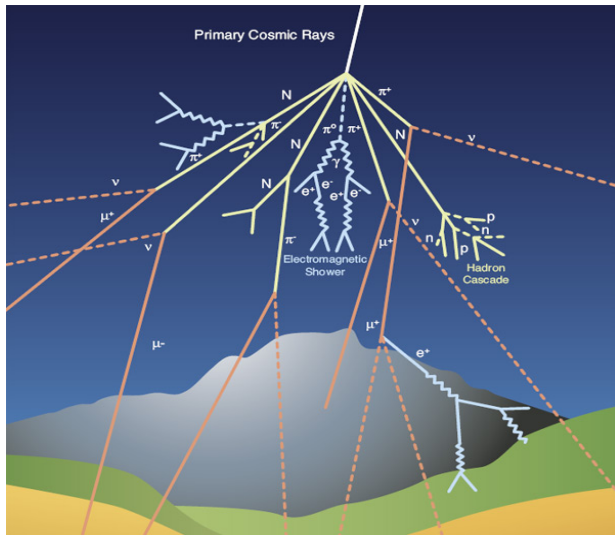


Figura 5: Raios cósmicos decaindo em outros tipos de partículas, formando o chamado 'chuveiro cósmico atmosférico' (Pierre Auger Observatory, *The Mystery of High-Energy Cosmic Rays*, 2019 [Internet]).

Auroras polares

As auroras polares, também chamadas de Luzes do Norte e Sul, são as manifestações luminosas que ocorrem na altura da ionosfera, devido à interação de átomos vindos do espaço com os que se encontram nessa porção da atmosfera.

Tempestade geomagnética é o nome dado ao processo físico completo que tem como consequência as auroras. Ela é uma das respostas do planeta à interação de um fluxo de radiação (*stream*) muito energético encontrando a magnetosfera e um fluido de menor energia (gerando uma onda de choque). A partir disso, tudo no entorno da nuvem de plasma recebe uma pressão muito intensa, inclusive a magnetosfera e sua magnetopausa.

Para a tempestade geomagnética, algumas etapas comuns foram nomeadas (S. Chapman, 1940): a SSC (*Storm Sudden Commencement*), a fase inicial, a fase principal e a fase de recuperação. Na SSC, o que se tem é um aumento muito grande e instantâneo do valor do campo da Terra, seguido de uma fase de decréscimo e relativa estabilidade, a fase inicial, e um decréscimo maior, a fase principal. Após, a fase de recuperação é o retorno para o valor de B_0 (A. Von Humboldt, 1871). Todo esse processo dura em torno de 1 dia, podendo

ser mais duradouro em períodos de intensa atividade solar. É reconhecido como um conjunto de *substorms* da magnetosfera e pode ser visto em gráficos de *Disturb storm index* (índice Dst).

Na SSC um efeito marcante é o aumento da intensidade de B (componente norte-sul). Sobre a fase principal, Chapman e Ferraro pensavam que o lado iluminado da Terra continha mais cargas positivas, enquanto que o lado sombreado possuía mais cargas negativas, formando um campo elétrico e o chamado *ring current belt* em torno da Terra. O campo magnético calculado, produzido pelos movimentos dos prótons nos cinturões, foi observado apontando quase uniformemente para o Sul, explicando assim a grande depressão do campo durante a fase principal (Akasofu e Chapman, 1961).

Cinturões de radiação Van Allen e o *ring current belt*: duas porções do ambiente espacial-terrestre, relativamente próximas à superfície do planeta, aprisionam partículas de alta energia, devido à influência de B. O cinturão interno de Van Allen, que se estende, em condições sem distúrbios solares, de 1000 até 6000 km acima da superfície, armazena elétrons e prótons com keV e MeV de energia, respectivamente. O cinturão externo, que em condições de baixa influência do Sol fica situado num raio de 13000 a 60000 km da superfície, é composto principalmente por elétrons, de até 10 MeV.

Além do movimento giratório devido às interações eletromagnéticas, as partículas nos *belts* também oscilam entre os hemisférios e ainda atravessam o globo, no chamado *drift longitudinal*. Quando elas atingem um ângulo de inclinação de 90° entre o vetor velocidade e o vetor campo magnético, elas são refletidas, adquirindo sentido oposto. Esse local chama-se *mirror point* e ocorre próximo aos polos. O movimento longitudinal ocorre devido a um pequeno deslocamento lateral das cargas no movimento giratório (ao atingirem uma posição mais distante da terra, elas possuem um raio maior devido a menor influência do campo) e à curvatura das linhas de campo (o que gera uma força centrífuga das partículas). Esse movimento é responsável por ordenar elétrons para Leste e prótons para Oeste do globo no *ring current*.

O *ring current belt* é, como o nome indica, a região por onde há o *drift longitudinal* e ele surge principalmente do diamagnetismo das partículas aprisionadas. Ele é o responsável pela fase principal da tempestade geomagnética. Acredita-se que prótons em região dos cinturões mais próximas da Terra são resultado de decaimento de nêutrons na atmosfera, a partir da colisão deles com raios cósmicos. Outra hipótese são os íons liberados no processo de reconexão (mesmo processo

que ocorre na coroa).

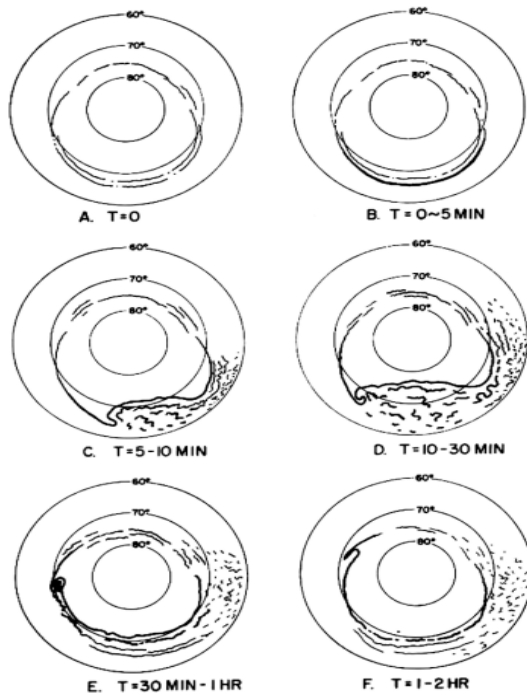


Figura 6: Subtempestade auroral: aumento da luminosidade, deslocamento em onda para Oeste e Ω s ficando pelo caminho (AKASOFU, S-I., 2007) .

Para estudar a atividade das auroras, os pesquisadores posicionaram câmeras *all-sky* em três países. O resultado obtido foi que existiam momentos de calma em toda a aurora e momentos que eles chamaram de subtempestade auroral: a luminosidade aumenta e o arco se desloca rapidamente na direção Oeste em forma de onda, com velocidade de alguns quilômetros por segundo. Em contrapartida, nesse mesmo instante, o arco na região de onde começou a onda se torna bastante enrolado, com formas de Ω . Essa *auroral substorm* ocorre de duas a três vezes por noite e está representada na figura 6.

Tempestades

Para uma tempestade ocorrer, deve haver uma separação entre as cargas positivas e negativas dentro das nuvens, ou seja, um fator externo causaria essa separação, visto que cargas opostas tendem a se atrair. Nesse sentido, as cargas negativas, inicialmente em equilíbrio eletrostático em terra, são deslocadas devido à repulsão com as cargas negativas concentradas na parte mais baixa das nuvens. Assim, a terra fica carregada com cargas positivas e se a força de atração

(força elétrica) for suficiente, os elétrons da nuvem irão atravessar o ar (ruptura dielétrica do ar).

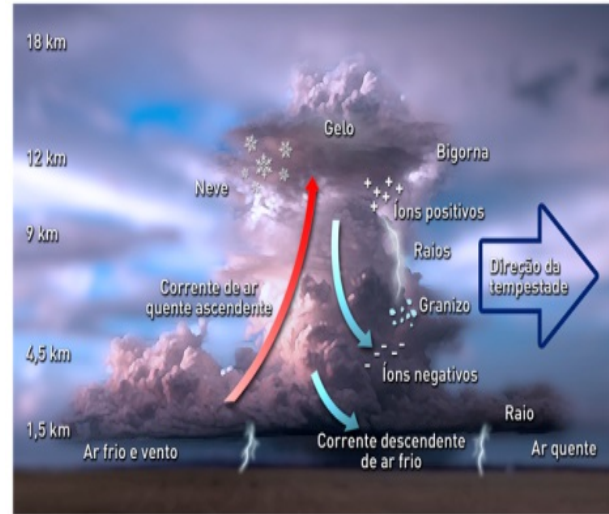


Figura 7: Formação da nuvem cumulonimbus e suas descargas elétricas. A altura máxima varia com a latitude (ELAT, Conceitos meteorológicos, 2019 [Internet]).

Um raio pode ser ascendente (terra-nuvem), descendente (nuvem-terra), ocorrer entre nuvens, no interior da nuvem ou da nuvem para o ar acima. Pode ocorrer, inclusive, em tempestades de neve e areia ou nas cinzas de erupções vulcânicas. Pode atingir até 30.000 A de intensidade de corrente elétrica.

O formato de um raio representa o caminho mais fácil que as cargas negativas encontram para alcançar as positivas, dependendo da temperatura, composição e umidade do ar naquele trecho da atmosfera. Os elétrons vão criando um caminho pelo ar, ionizando as moléculas em volta (gerando a luz). Ao encontrar a terra (muito mais condutora que o ar), ocorre uma luz maior e o som, como formas de dissipação de energia, e a onda de choque.

Por outro lado, as nuvens se formam a partir da condensação do vapor de água que ao ascender se resfria com a altitude, podendo virar até gotículas de gelo. Alguns fatores são responsáveis pelo movimento do ar. Nesse caso, a umidade, o grau de instabilidade atmosférico (determinado a partir da comparação entre a temperatura do fluido em movimento com a temperatura do ar ambiente) e um mecanismo que empurrará o ar, chamado de forçante. A convergência horizontal (como na Zona de Convergência Intertropical), as ilhas de calor, as frentes e os ventos orientados em direção a montanhas são exemplos de forçantes. No caso das

nuvens de tempestade, as cumulonimbus (como a da figura 7), o mecanismo forçante causará um movimento vertical localizado.

Sobre as cumulonimbus (Cb), essas são as nuvens que começam a se formar mais próximas à superfície, estendendo-se para cima e para seu entorno. Caracterizadas pelos movimentos de ascendência do ar quente e úmido, a subsidência do ar frio e a precipitação, as nuvens de tempestade possuem algumas etapas: seus estados de Cb *calvus*, Cb *capillatus* e Cb *capillatus incus*. O que os cientistas defendem é que os raios cósmicos, ao se aproximarem das nuvens de tempestade, facilitam o caminho das cargas negativas. Isso é, segundo eles, a ruptura dielétrica se torna possível quando o meio é ionizado por algum fator. Esse fator pode ser as partículas cósmicas e tem sido objeto de estudo do experimento da rede de radiotelescópios LO-FAR (*Low-Frequency Array*), localizado na Holanda.

Conclusão

Após um ano e meio de estudo, obtivemos algumas respostas sobre fenômenos que possuem muitas pesquisas e ainda muitas dúvidas por trás. Começamos estudando todas as camadas do Sol por ser a principal fonte de RCs que chegam na Terra. Vimos as maneiras com que ele expõe partículas mais energéticas, como as de CMEs e buracos coronais, e as de menor energia, como as de espículas.

Sobre as auroras, vimos que são apenas uma manifestação luminosa dentro de um enorme processo envolvendo o campo magnético terrestre: primeiro ocorre o encontro de *streams* e a propagação da onda de choque contra a magnetopausa. Em consequência, a primeira reconexão e a formação da cavidade. Depois, a reconexão na magnetocauda e a penetração de mais partículas nos cinturões. E por fim os movimentos longitudinal (em torno da Terra), paralelo e espiralado em torno das linhas de campo.

Por último, entendemos como se dá a formação das nuvens de tempestade, passando pelas etapas de cumulonimbus *calvus*, *capillatus* e *capillatus incus*. Estudamos sobre o fenômeno dos relâmpagos (a separação das cargas e a formação das nuvens, e as suas classificações) e como as partículas cósmicas podem influenciar seu aparecimento.

Agradecimentos

- Este trabalho recebeu apoio financeiro do programa PIBIC/CNPq

Referências

- NASA, The Sun [Internet]. [citado 12 de julho de 2018]. Disponível em : https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/multimedia/Sunlayers.html
- MORAES, A.M. Física nuclear e de partículas. Curso de Física - Licenciatura, Universidade Aberta do Brasil, 2007.
- NASA — The Difference Between CMEs and Solar Flares [Internet]. [citado 12 de julho de 2018]. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TWjtYSRIOUI&t=2s>
- NASA, Reconnection on the Sun [Internet]. [citado 11 de março de 2019]. Disponível em <https://www.nasa.gov/content/goddard/reconnection-on-the-sun>
- HANSEN, J., KHARECHA, P., SATO, M., MASSON-DELMOTTE, V., ACKERMAN, F., et al. Assessing “Dangerous Climate Change”: Required Reduction of Carbon Emissions to Protect Young People, Future Generations and Nature. PLOS ONE 8(12): e81648, 2013.
- Pierre Auger Observatory, The Mystery of High-Energy Cosmic Rays. [citado 11 de março de 2019]. Disponível em: <https://www.auger.org/index.php/cosmic-rays/cosmic-ray-mystery>
- AKASOFU, S-I. Exploring the secrets of the aurora, Astrophysics and space science library, V.346, p. 1-78 , 2007
- ZMUDA, A.]. The auroral oval. Johns Hopkins University, Applied Physics Laboratory, 1966
- NASA, MMS Mission Overview [Internet]. [citado 11 de março de 2019]. Disponível em: https://www.nasa.gov/mission_pages/mms/overview/index.html
- HOELLER, H., BETZ, H-D., FINKE, U. and SCHMIDT, K. Atmospheric physics: lightning detection, DLR-Instituto de Física Atmosférica, p. 331-346, 2012.
- ELAT, Conceitos meteorológicos [Internet]. [citado 11 de março de 2019]. Disponível em: <http://www.inpe.br/webelat/homepage/menu/infor/tempestades/conceitos.meteorologicos.php>
- MOSKVITCH, K., Do Cosmic Rays Grease Lightning? [Internet]. Science — AAAS. 2013 [citado 13 de julho de 2018]. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/news/2013/05/do-cosmic-rays-grease-lightning>