



Centro Brasileiro de  
Pesquisas Físicas

# A INFLUÊNCIA DE RAIOS CÓSMICOS NA ATMOSFERA TERRESTRE: *Auroras e Tempestades*

**Bernardo Rosalinski Russomano**  
**Dr. Arthur Marques Moraes**

**Rio de Janeiro, 13 de Julho de 2019**

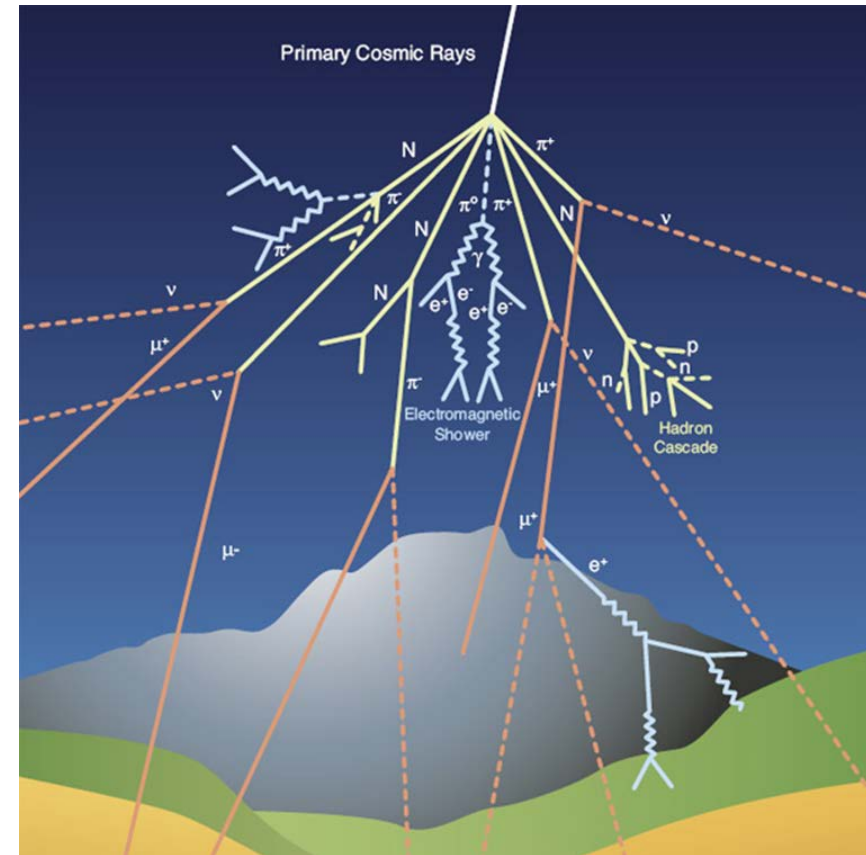
# INTRODUÇÃO

- ▶ Estudar os mecanismos de formação das **auroras polares** e das **tempestades elétricas** na atmosfera.
- ▶ Relação com partículas originárias do meio interplanetário:
  - De onde vêm?
  - Como chegam à Terra?
  - Quais as consequências por aqui?

# Raios C3smicos

Part3culas altamente energ3ticas (maiores que 1 MeV de energia) presentes no meio interplanet3rio, resultado de reaq3es em estrelas, principalmente, que se misturam com o g3s e poeira interestelares.

- ▶ 90% n3cleo do H;
- ▶ 8% part3culas alpha;
- ▶ 1% el3trons;
- ▶ 1% n3cleos de 3ons pesados.



Fonte: Pierre Auger Observatory [Internet]



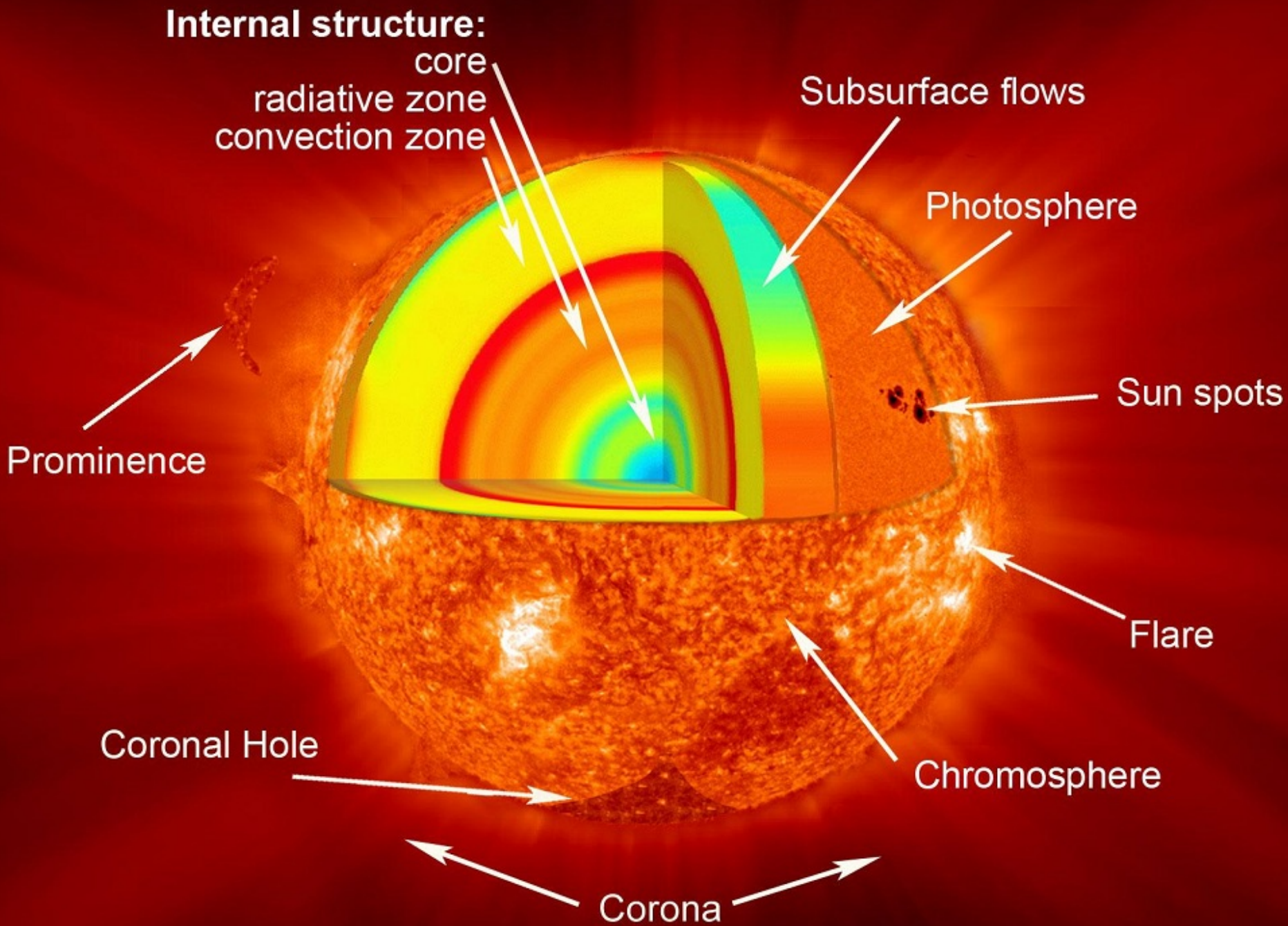
# O Sol

Principal fonte de raios cósmicos

Núcleo:

- ▶ Reações de fusão nuclear
- ▶ 15.7 milhões Kelvin
- ▶ Rompimento da barreira de Coulomb dos átomos



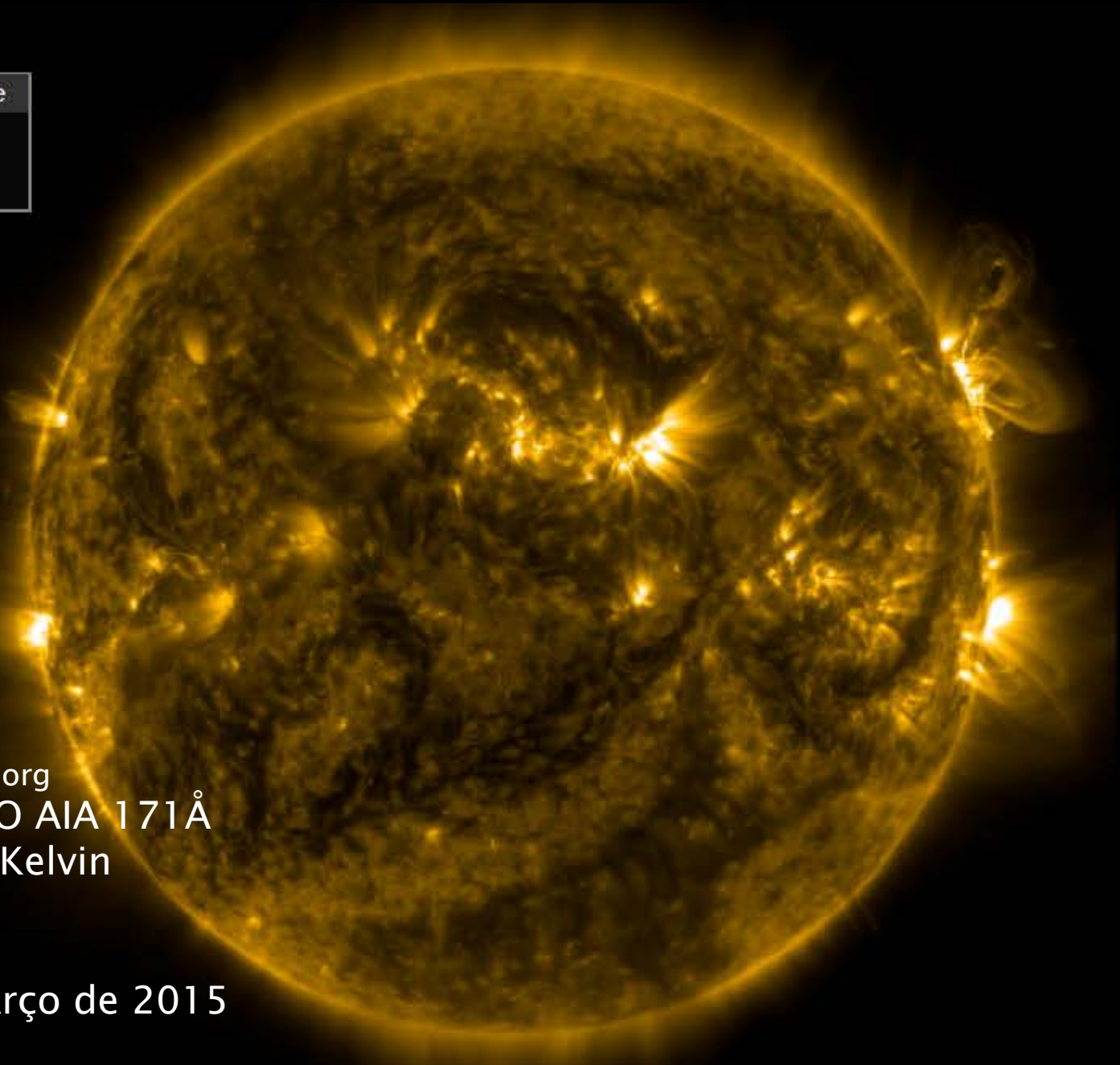


# ☉ Sol

Principal fonte de raios cósmicos

## Corona:

- ▶ Melhor observação dos eventos:
  - *Coronal holes*;
  - Proeminências (*loops*);
  - CMEs (*Coronal Mass Ejections*);
  - *Flux ropes*;
  - *Flares* (erupção, explosão);
  - Reconexão magnética.



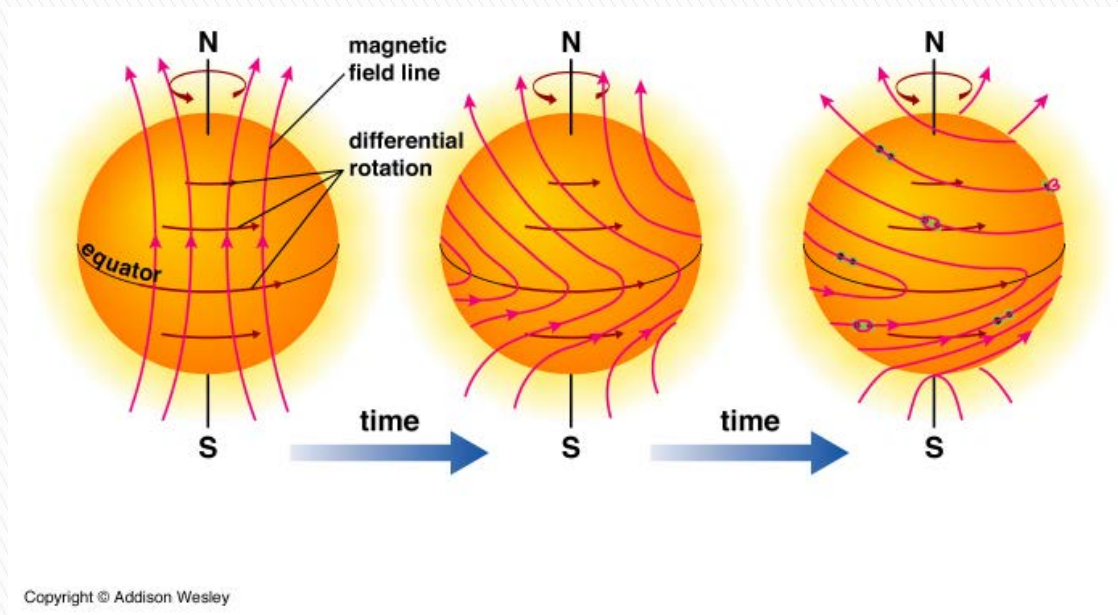
helioviewer.org  
NASA SDO AIA 171Å  
600.000 Kelvin  
Corona  
15:25:29  
02 de Março de 2015



# O Sol

## Principal fonte de raios cósmicos

Devido ao estado físico do Sol (plasma) e a maior velocidade de rotação no equador, as linhas de campo se mantêm pressionando umas às outras, até que essa pressão dá início a inúmeros fenômenos, como CMEs e espículas.





# Auroras Polares

## Polar Lights

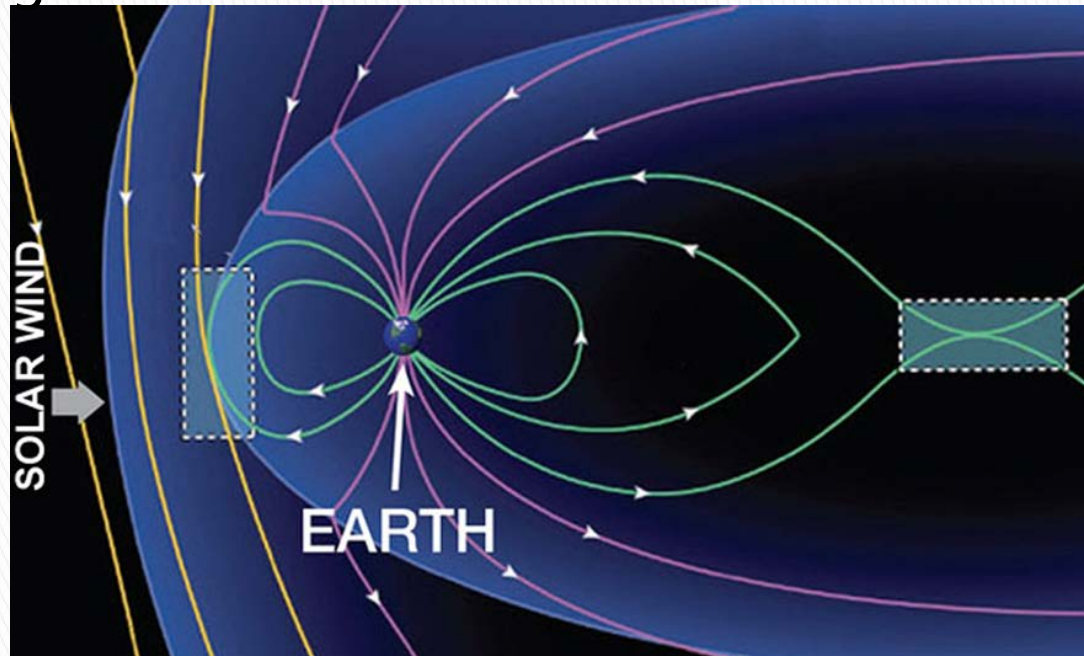
- ▶ Resposta visível da tempestade geomagnética
  - Tempestade geomagnética: grande variação no campo magnético horizontal.
  - Corrente de Birkeland.
- ▶ SSC (*Storm Sudden Commencement*)
- ▶ Fase inicial
- ▶ Fase Principal
- ▶ Fase de Recuperação



# Auroras Polares

## Polar Lights

- ▶ SSC
  - Corrente de Chapman–Ferraro e a cavidade: o vento solar é supercondutor e diamagnético.
  - Reconexão magnética ?
    - Equilíbrio entre pressão cinética, do vento e da **onda de choque**, e magnética, da magnetosfera.



# Auroras Polares

## Polar Lights

- ▶ Fase principal:
  - Após relativa estabilidade da fase inicial.
  - Campo magnético produzido pelo movimento para Oeste dos prótons em volta da Terra: sentido Sul (eletrojato equatorial).
  - O *ring current* (surge do diamagnetismo das partículas aprisionadas)
    - Resultado: diminuição do campo horizontal.

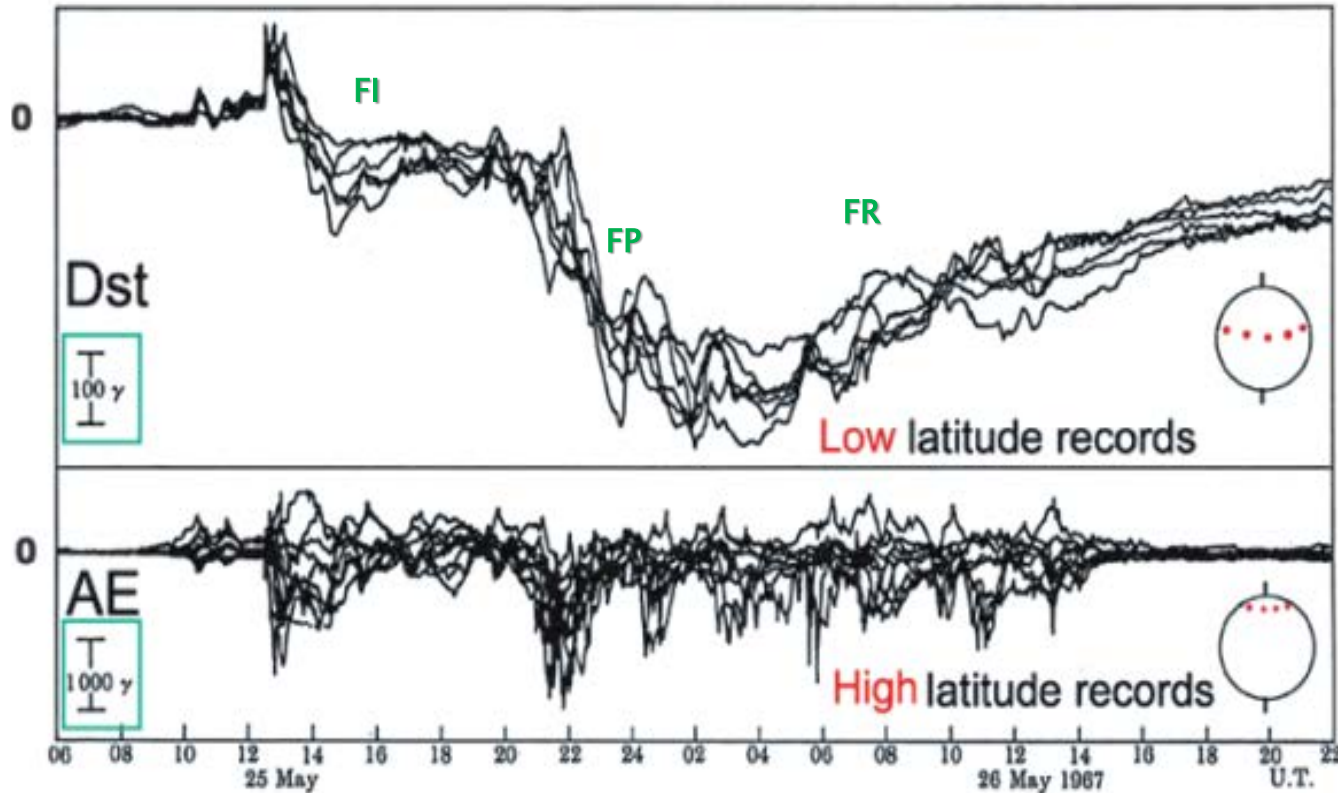


# Auroras Polares

## Polar Lights

Storm =  $\sum$  substorms

SSC



\*SSC: Storm Sudden Comencemnt

\*FI: Inicial

\*FP: Principal

\*FR: Recuperação

\*AE: eletrojato auroral: taxa de variação do campo magnético horizontal (H) na região da *auroral oval*.

\*Dst: Disturbance storm time: taxa de variação do campo H em baixas latitudes. Demonstra o efeito do movimento de prótons para Oeste no *ring current*.

\*(1 $\gamma$  = 1nT)

Fonte: Exploring the secrets of the aurora, Syun\_Ichi Akasofu

# Auroras Polares

## Polar Lights

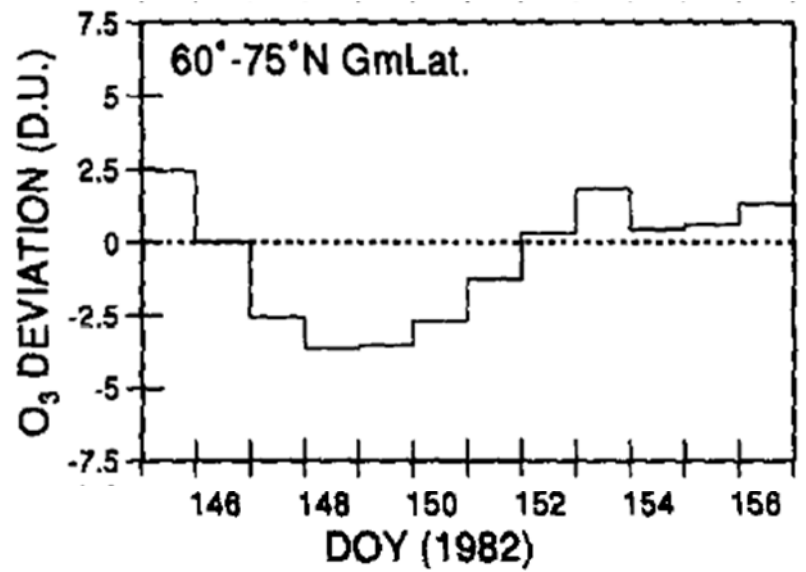
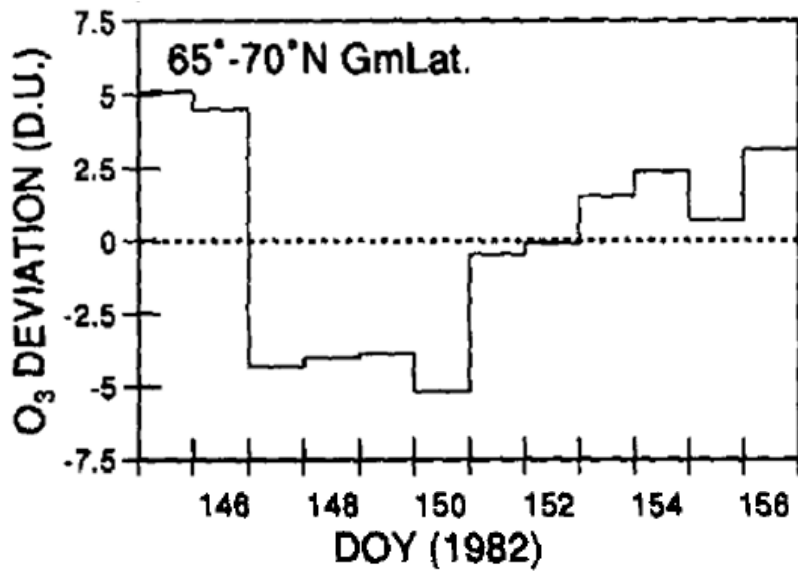
- ▶ Relação atividade auroral e camada de ozônio nos polos (em épocas de primavera):
  - Ionização direta e indireta do O<sub>3</sub> pelos raios cósmicos:
    - Direta: os próprios elétrons ionizam o ozônio.
      - Quanto mais energético os elétrons, menores altitudes eles alcançam!
    - Indireta: os elétrons ionizam moléculas com nitrogênio ou hidrogênio, que viajam até outras latitudes e altitudes ionizando o ozônio.

# Auroras Polares

## Polar Lights

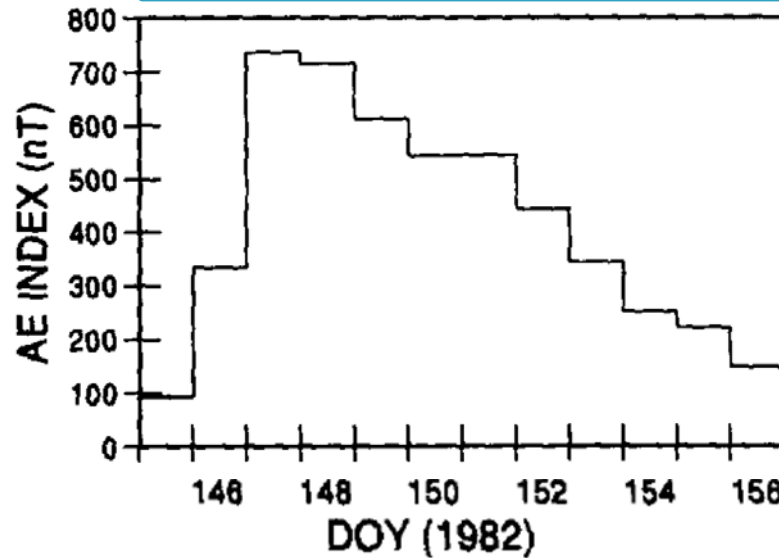
- ▶ Relação atividade auroral e camada de ozônio nos polos (em épocas de primavera):
  - *Coronal holes* causam grande diminuição nos níveis de O<sub>3</sub> em até 3 dias.
  - Para CME/ *flares* foi observado aumento nos níveis de O<sub>3</sub> (Decréscimo de Forbush) e depois de 11 dias a diminuição.





**1 unidade Dobson (D.U.):**  
 $2,69 \times 10^{16}$  moléculas de  
 ozônio por  $m^2$ .

**Auroral oval:**  $\sim 65-75^\circ$  GmLat.



Fonte: "Geomagnetic storm effects on the Earth's ozone layer", M. Storini.

# Tempestades Eléctricas



# Tempestades Eléctricas

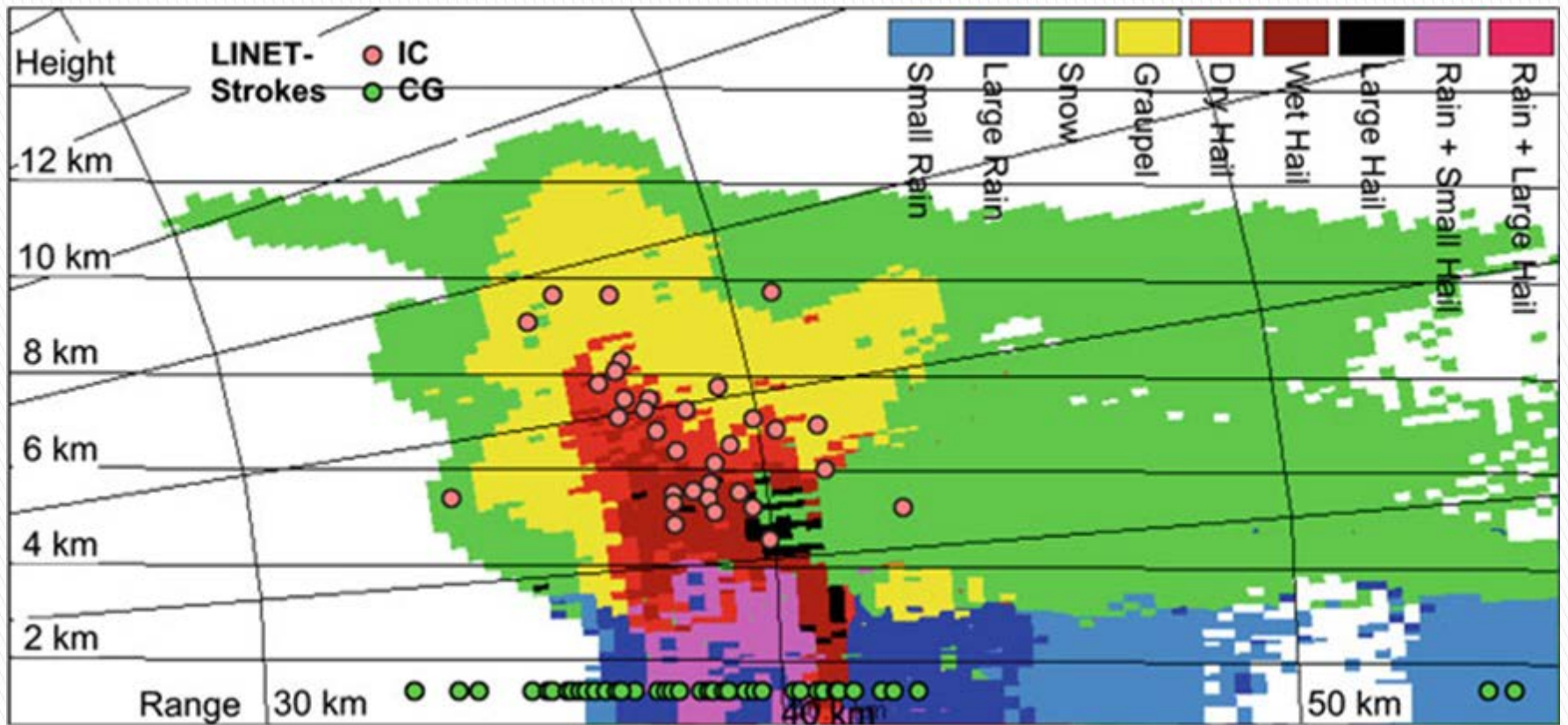
## ▶ Formação da nuvem:

- Aerossóis: formam núcleos de condensação do vapor d'água. São partículas dispersas no ar, de inúmeras fontes.
  - Íons são de 10 a 100 vezes melhores que moléculas neutras na captura de aerosols!
- Razão (moléculas de água/partículas de aerosol)
  - Com muito aerosol no ar, as nuvens demoram para ficarem densas e precipitarem → aumento na cobertura de nuvens.



# Tempestades Eléctricas

- ▶ Separação de cargas nas nuvens e criação do campo eléctrico:
  - Colisões entre as gotículas e cristais de gelo (hipótese aceita).
  - Diferenças nas propriedades físicas (como **densidade** e **velocidade de queda**) dos hidrometeoros dão origem aos campos eléctricos.
    - Em geral: graupel (-) e cristais de gelo (+)



Fonte: POLDIRAD e LINET (livro Atmospheric Physics – DLR).

# Tempestades Elétricas

## ▶ Raio:

- Separação das cargas opostas nas *cumulonimbus*.
- Ruptura dielétrica do ar (força elétrica muito alta)
- Ionização do ar → Luz (relâmpago).
- Ionização muito rápida (descarga elétrica), energia cinética e térmica.
  - Onda de choque.



# Tempestades Elétricas

- ▶ Relação com a entrada de raios cósmicos:
  - Ionização do canal por onde o relâmpago passará.
    - Promovida principalmente por elétrons.
  - Facilita a ruptura dielétrica do ar.
  - Proporciona emissão de ondas eletromagnéticas VLF, LF e VHF(*sferics*) pelos relâmpagos.

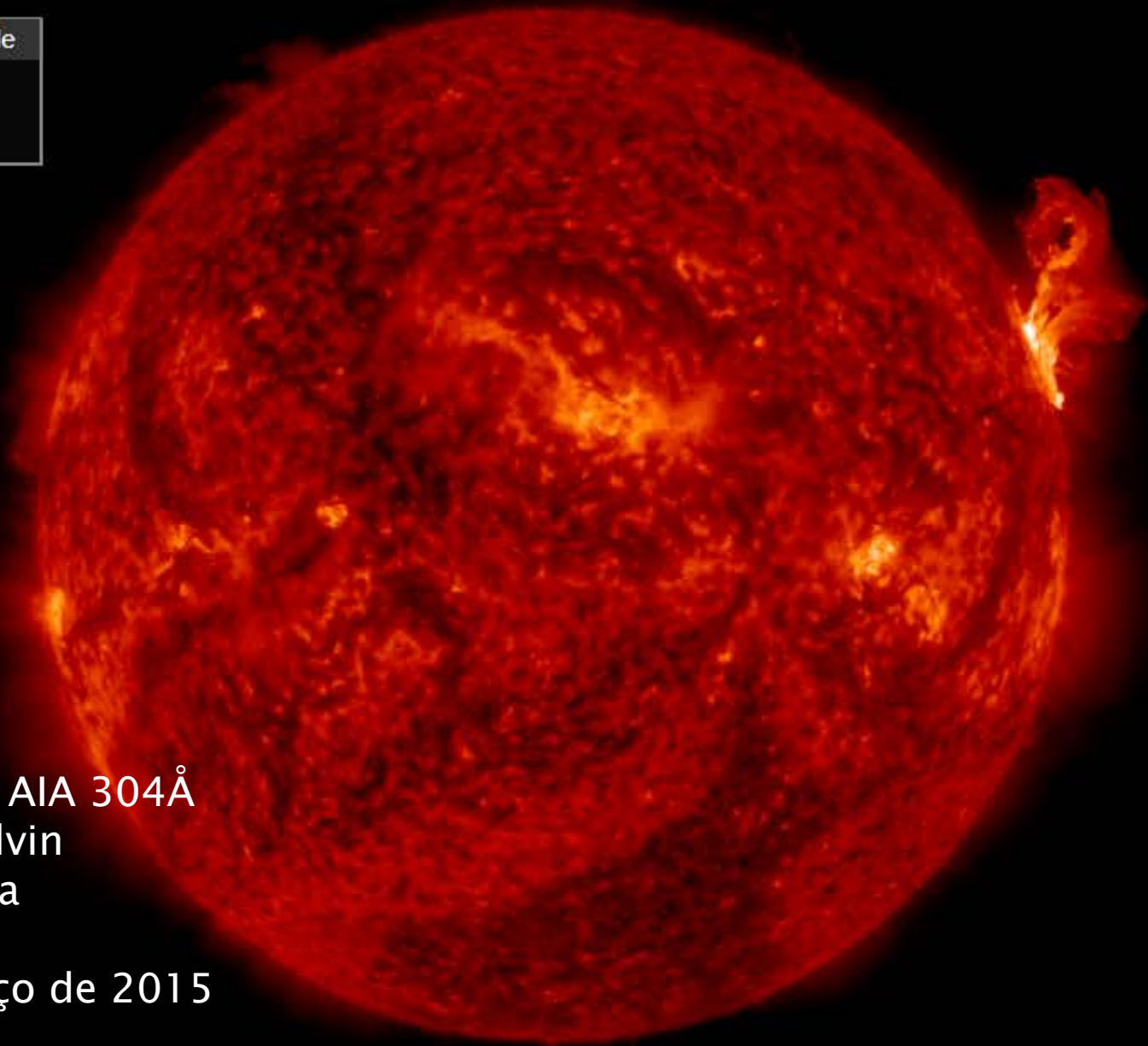
# CONCLUSÃO

Os vários eventos solares, a combinação de movimentos por trás das auroras, a propagação dos raios na atmosfera e a formação de nuvens são assuntos que ainda devem ser explorados.

Depois de um primeiro ano saindo do senso comum, no segundo ano fomos mais a fundo na parte física (vendo que ainda é possível ir muito mais).

# SLIDES EXTRAS





NASA SDO AIA 304Å  
50.000 Kelvin  
Cromosfera  
15:25:29  
02 de Março de 2015

NASA SDO AIA 131Å



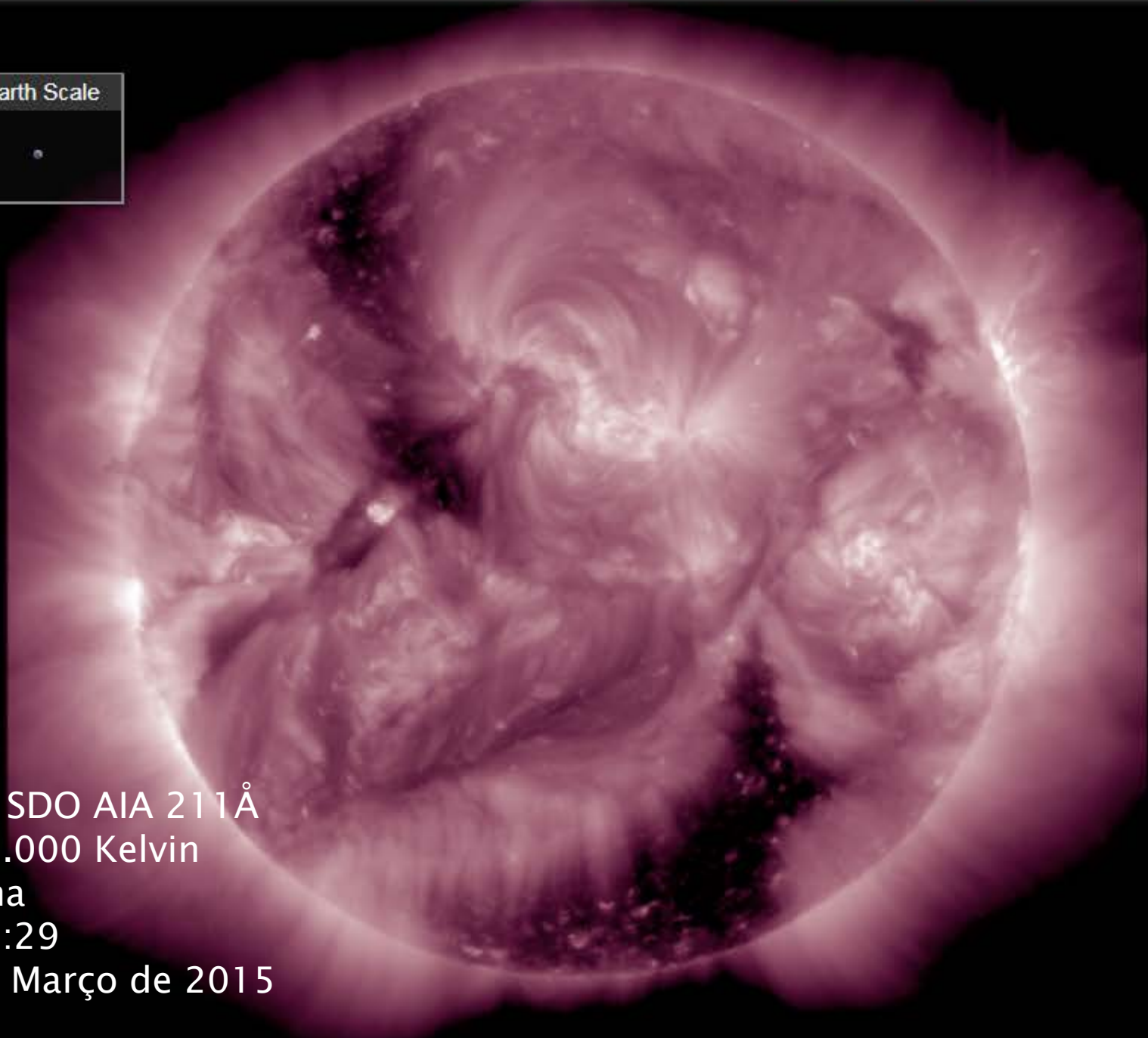
NASA SDO AIA 171Å



NASA SDO AIA 304Å

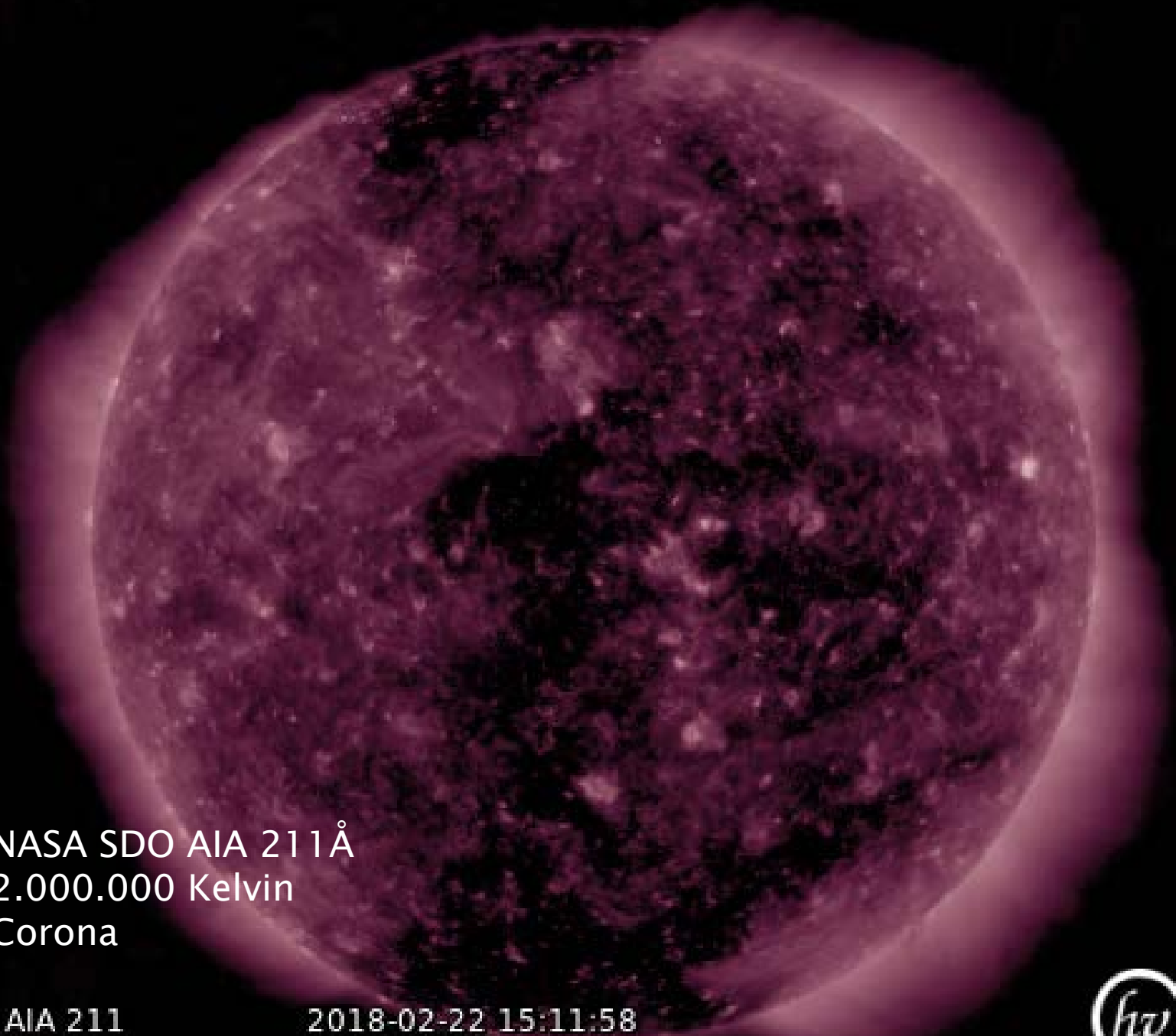


Fonte: NASA youtube:  
"The difference between CMEs and flares"



NASA SDO AIA 211 Å  
2.000.000 Kelvin  
Corona  
15:25:29  
02 de Março de 2015





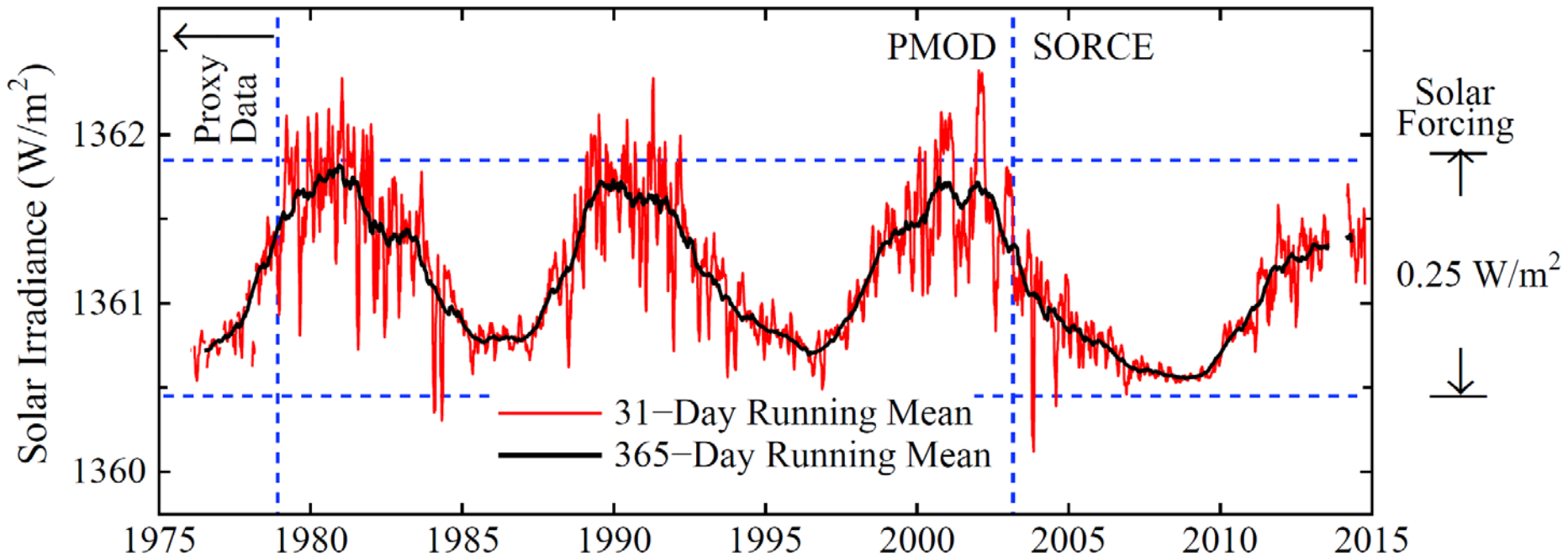
NASA SDO AIA 211Å  
2.000.000 Kelvin  
Corona

AIA 211

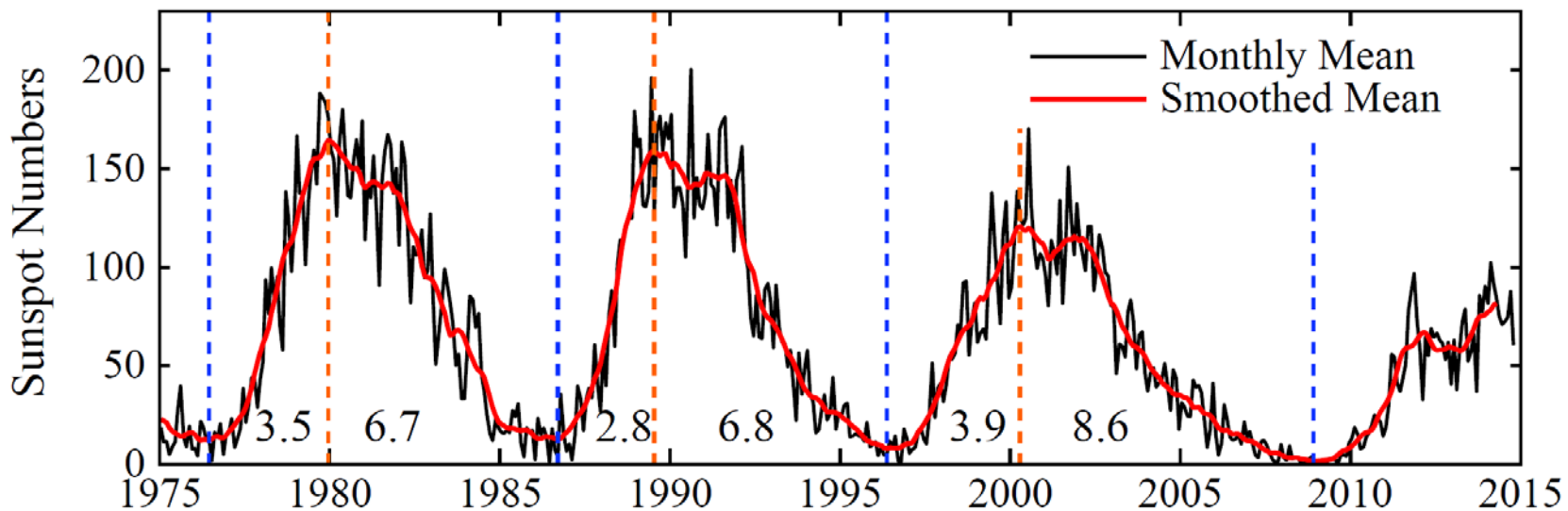
2018-02-22 15:11:58

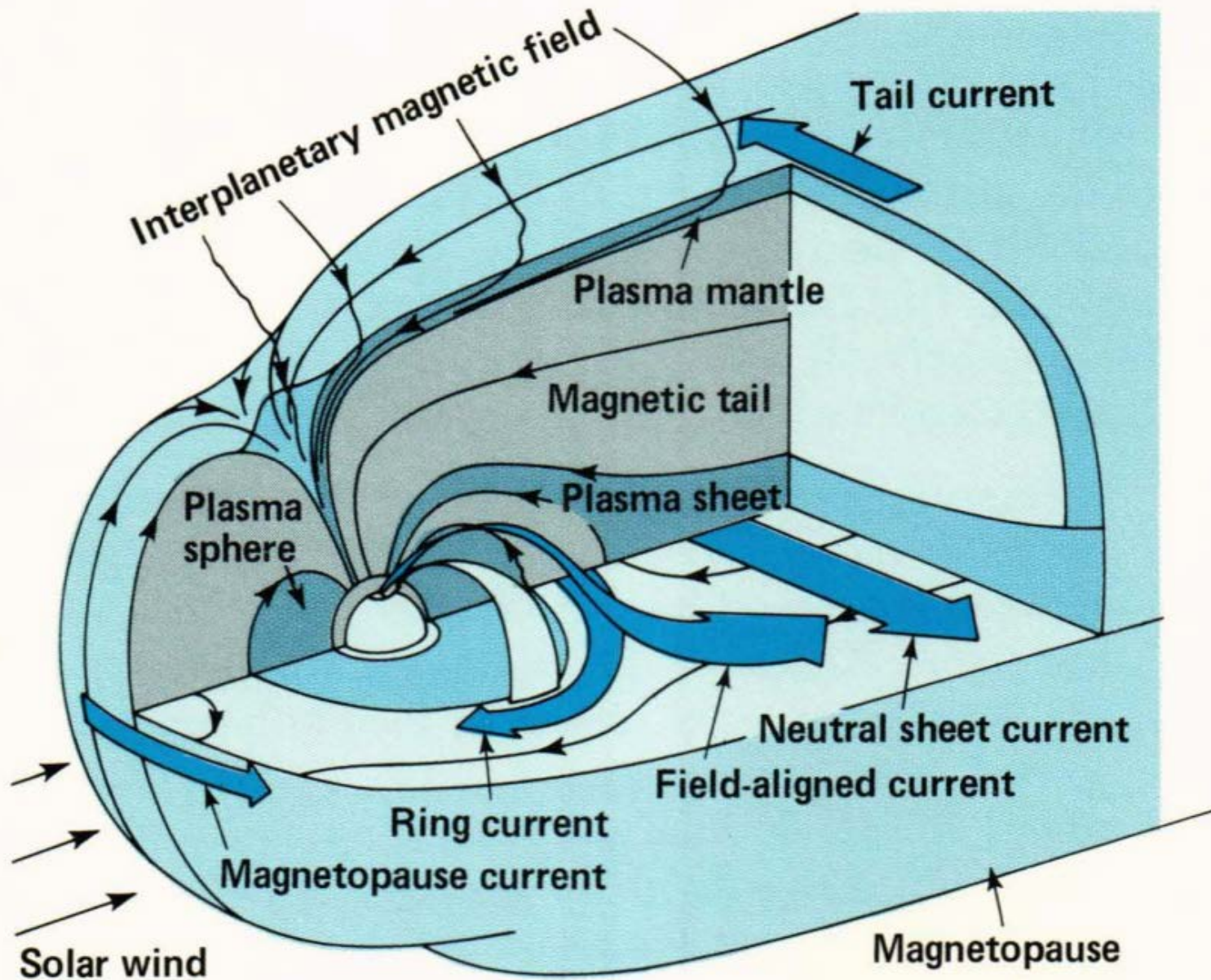


# A Total Solar Irradiance



# Monthly Sunspot Numbers

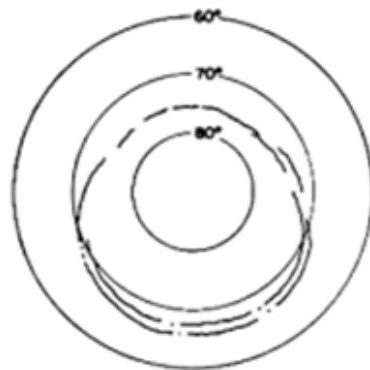




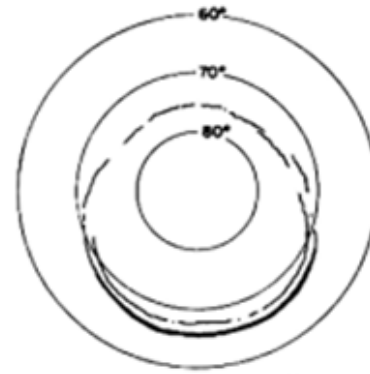
Fonte: "Magnetospheric currents", T. A. Potemra

# ***Auroral substorm***

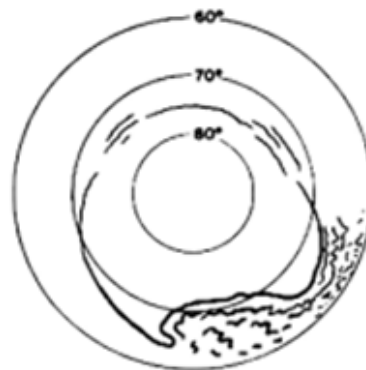
(2 a 3 vezes por noite)



A. T=0



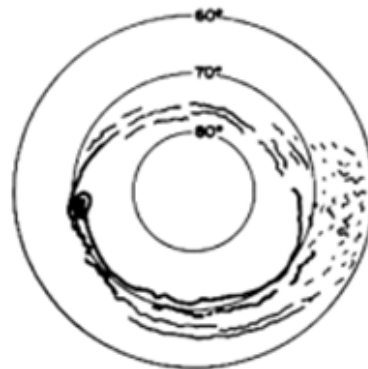
B. T=0~5 MIN



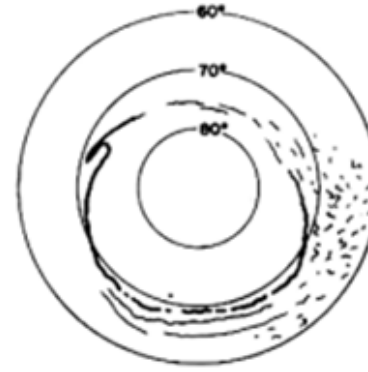
C. T=5-10 MIN



D. T=10-30 MIN

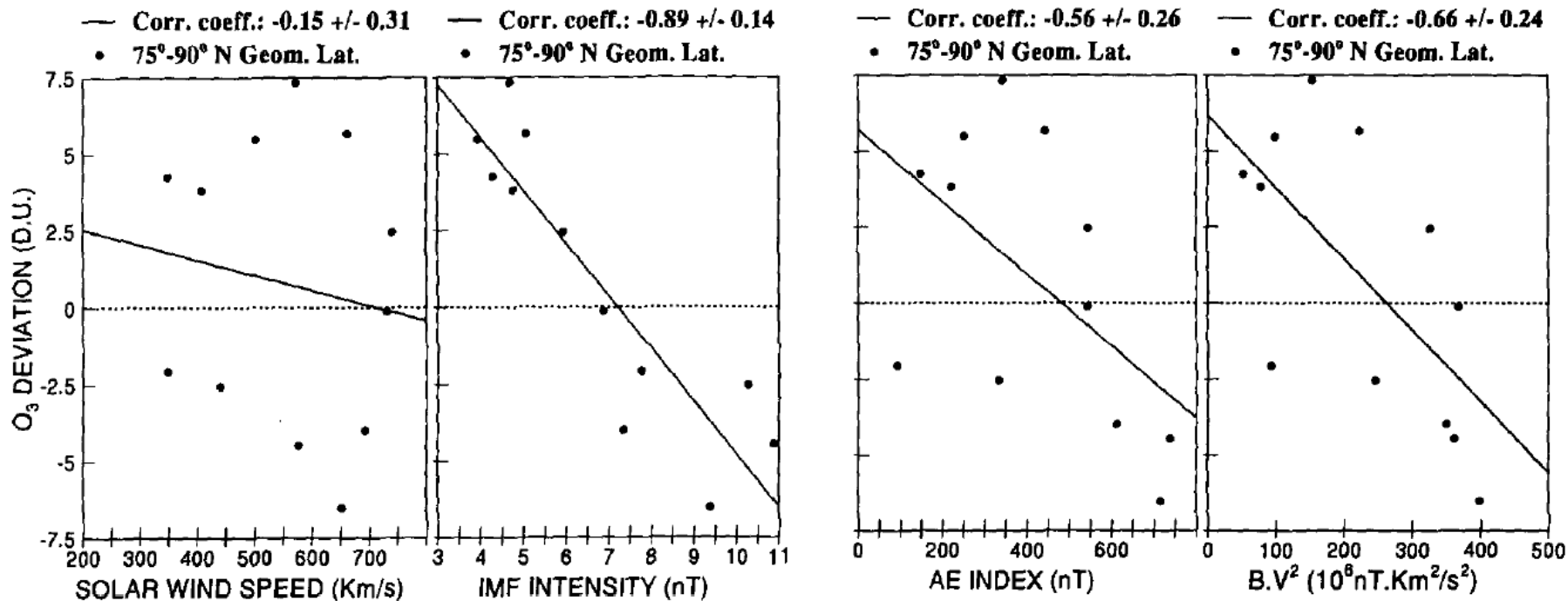


E. T=30 MIN - 1 HR

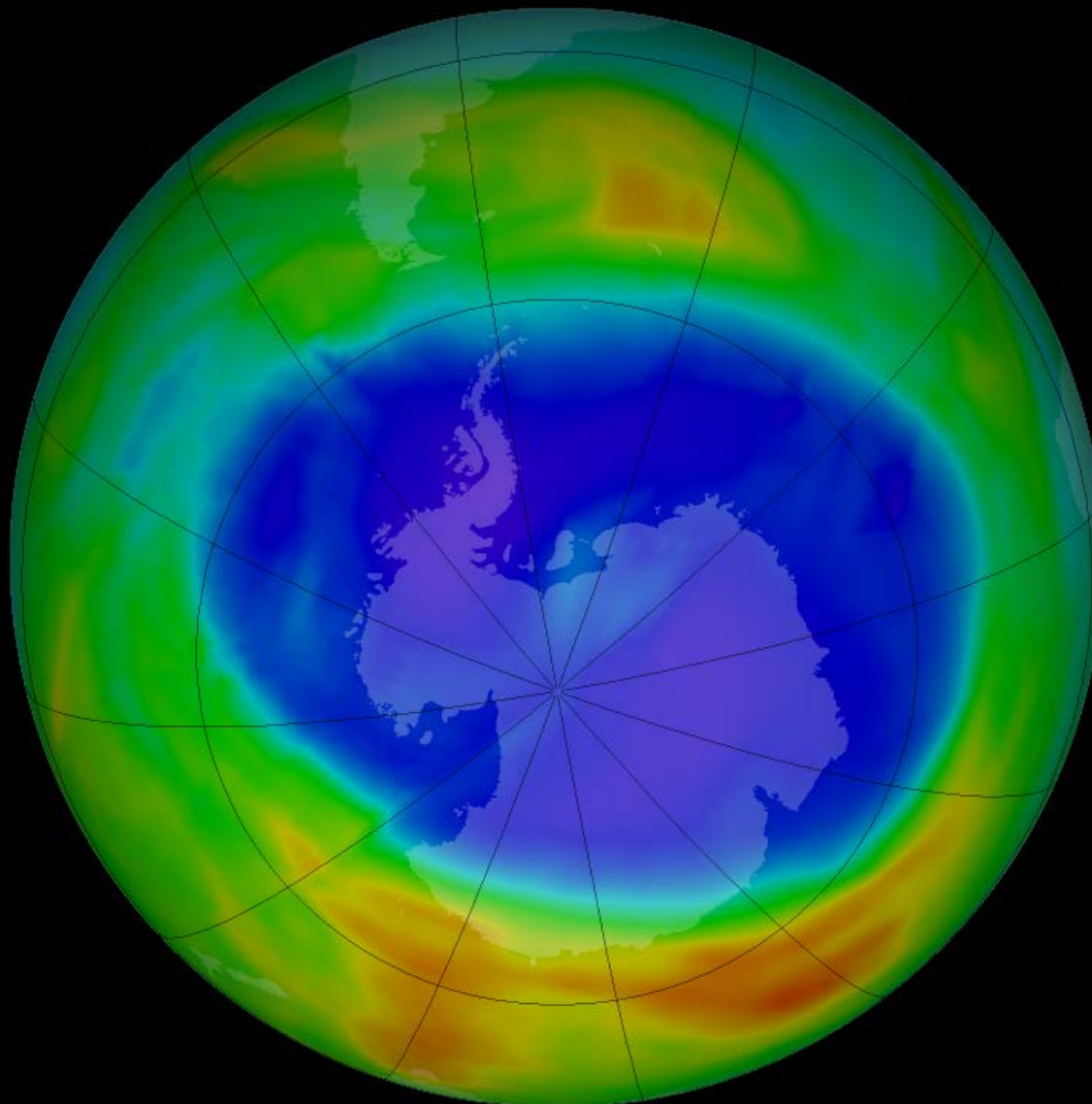


F. T=1-2 HR

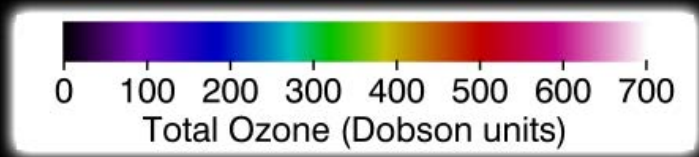




\*Índice AE: atividade magnética na *auroral oval* relacionado a corrente elétrica na ionosfera. Variação do campo geomagnético horizontal. Fonte: NOAA



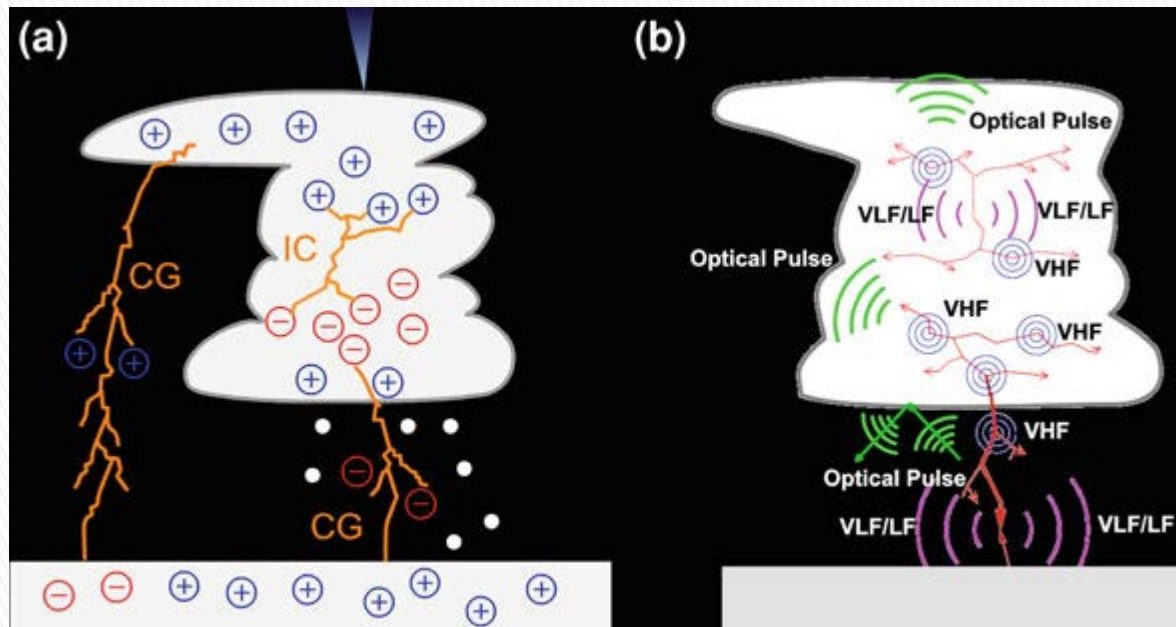
**1 unidade Dobson:**  
 $2,69 \times 10^{16}$  moléculas de  
ozônio por  $m^2$



Fonte: NASA Goddard

# Tempestades Eléctricas

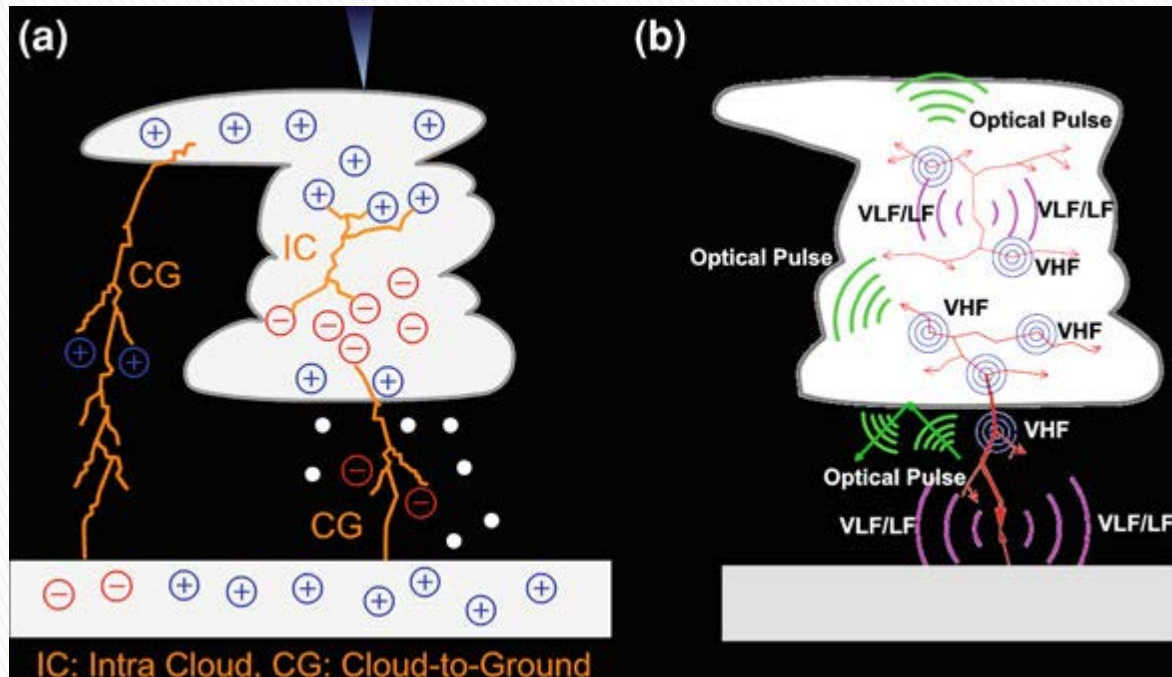
- ▶ Eventos típicos:
  - *Narrow Bipolar Events*: maior fonte natural de emissão de ondas eletromagnéticas VHF
    - *Breakdown* típico: positivo
    - Possibilidade de raio subsequente: *stream* de recuo (K-process). Emite ondas VLF.



Fonte: livro Atmospheric physics, DLR

# Tempestades Elébricas

- ▶ Eventos típicos:
  - Raio nuvem–solo: raio de retorno (*return stroke*, intenso pulso eletromagnético) assim que toca o solo. Pode ser prosseguido de J–process ou K–process(mais veloz). Ou, ainda, novos raios para o solo.



Fonte: livro Atmospheric physics, DLR