*seminário pré-requisito de defesa de mestrado*

# Da Deflexão de Raios Cósmicos Ultra-Energéticos no Campo Magnético Galáctico

**Aluno: Rafael Alves Batista**
**Orientador: Prof. Dr. Ernesto Kemp**

# campos magnéticos cósmicos

## origem

- ✦ como e quando surgiram os campos magnéticos cósmicos
- ✦ influência sobre a radiação cósmica de fundo

## evolução

- ✦ amplificação de campos primordiais
- ✦ manutenção dos campos
- ✦ evolução das estruturas em larga e pequena escala

## estrutura

- ✦ intensidade e estrutura dos campos no meio intergaláctico e interestelar
- ✦ relação com a distribuição de gás

# como estudar campos magnéticos cósmicos?

## métodos de medição

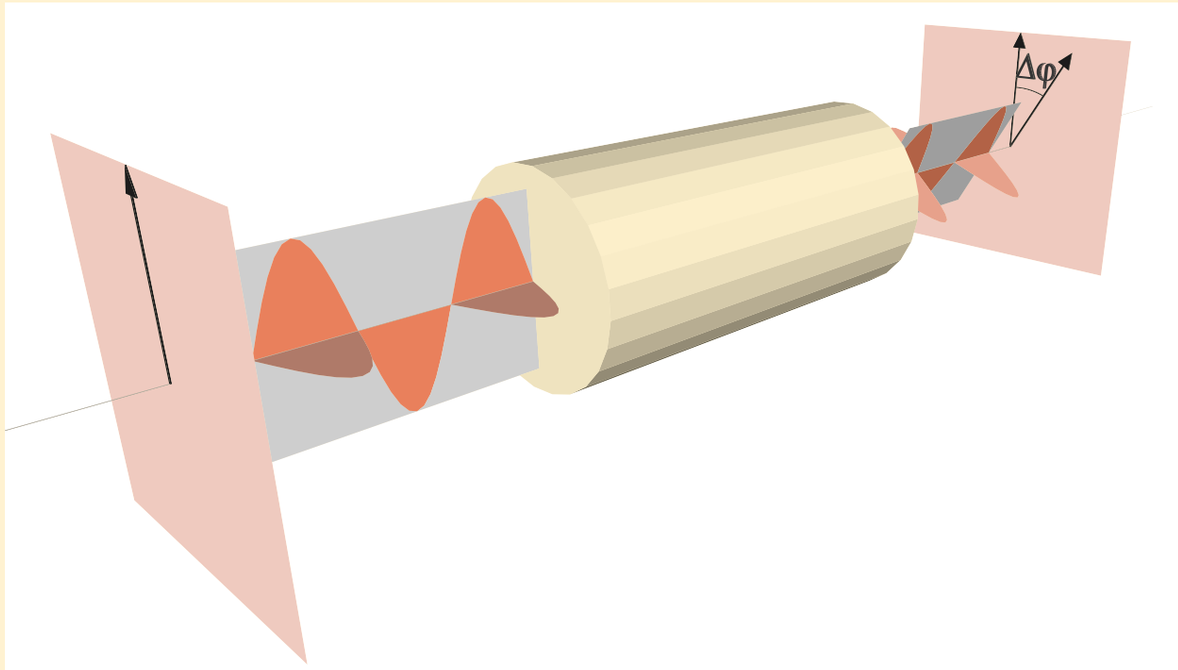
- polarização da luz estelar
- efeito Zeeman
- polarização da luz síncrotron
- rotação de Faraday

## efeito Zeeman

- desdobramento das linhas espectrais

$$B = \frac{m_e c}{e} \Delta E$$

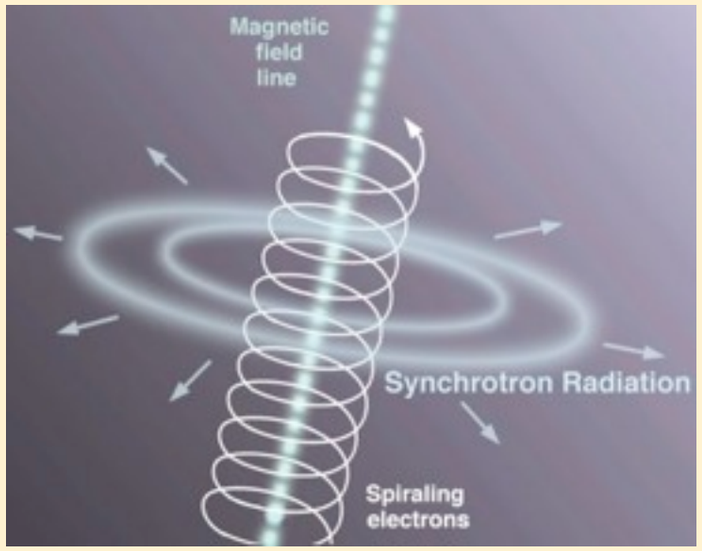
## rotação de Faraday




## polarização da luz estelar

- alinhamento dos grãos de poeira com o campo magnético do meio

## polarização da luz síncrotron



# raios cósmicos e campos magnéticos

## raios cósmicos

✦ defletem em campos magnéticos cósmicos dependendo de sua energia e composição

✦ para raios cósmicos ultra-energéticos (uhecrs), seu raio de Larmor é normalmente maior que o comprimento de coerência dos campos

✦ a propagação de raios cósmicos depende dos campos interventores

## campos magnéticos cósmicos

✦ pouco compreendidos devido a dificuldades de medição

✦ determinam a propagação dos raios cósmicos

✤ compreensão dos campos magnéticos cósmicos podem contribuir para a melhor compreensão da propagação de uhecrs

✤ deflexão de uhecrs podem contribuir para a compreensão de campos magnéticos cósmicos

✤ por que não utilizar uhecrs para estudar campos magnéticos?

# o campo magnético galáctico

## a Via Láctea

- galáxia espiral barrada
- raio aproximado: 20 kpc
- pertence ao Grupo Local

## o campo magnético galáctico

- componente regular
  - comprimento de coerência ~ dezenas de kpc
  - permeia toda galáxia
- componente turbulenta
  - campos aleatórios
  - pequeno comprimento de coerência
  - permeia os braços espirais

## alguns modelos para o campo regular

- Stanev
- Harari, Mollerach e Roulet (HMR)
- Tinyakov e Tkachev (TT)
- Prouza e Smída (PS)
- Kalcherieβ, Serpico e Teshima (KST)
- Sun, Reich, Waelkens e Enβlin (SRWE)

## forma do campo

- ASS (AxisSymmetric Spiral)
- BSS (BiSymmetric Spiral)
- toróide
- dipolo
- anéis

# o campo magnético galáctico

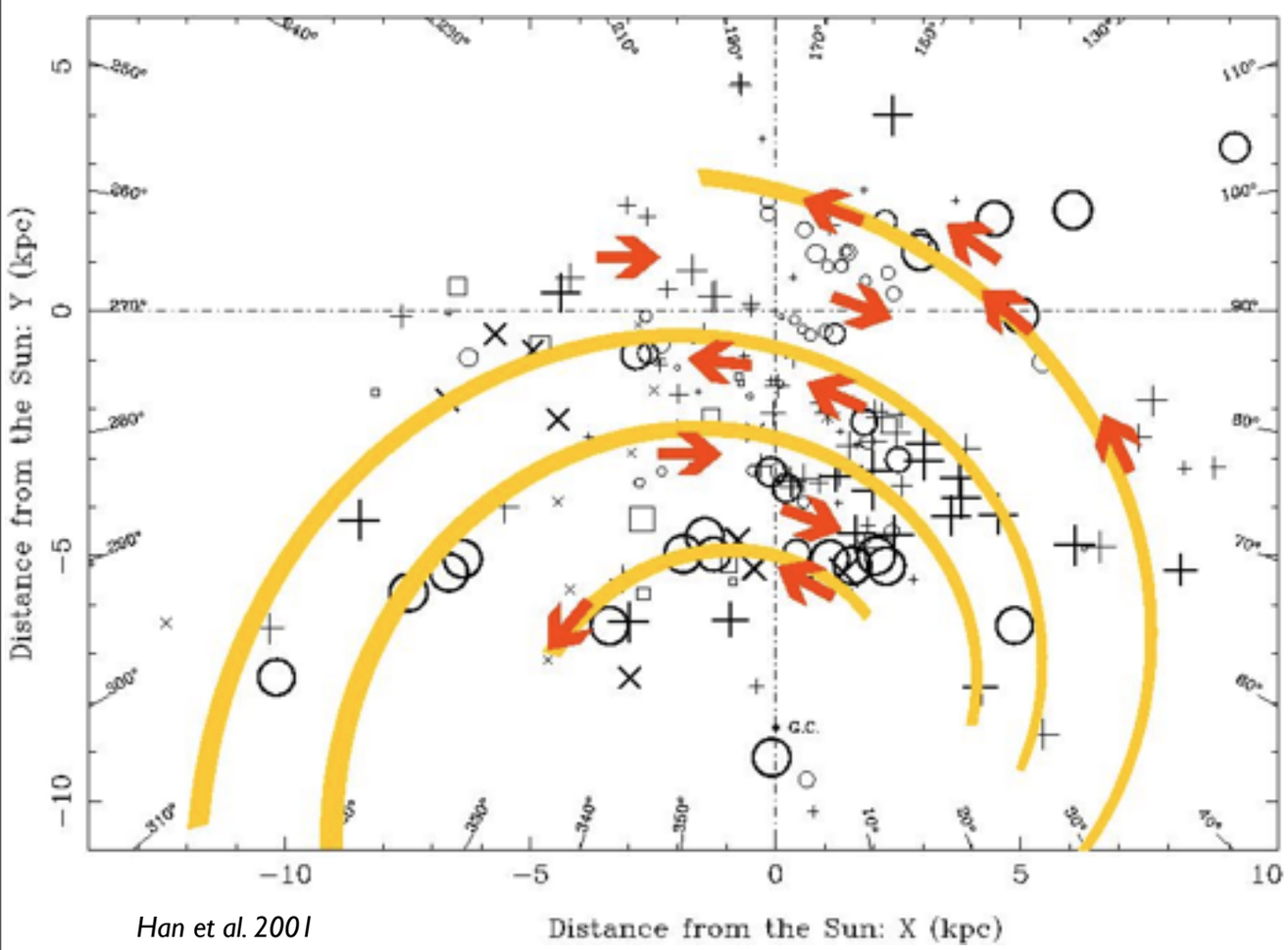
✦ disco ➜ espiral logarítmica

$$R_{espiral} = R_0 \exp\left(\theta \tan p\right)$$

✦ este campo pode ser escrito como

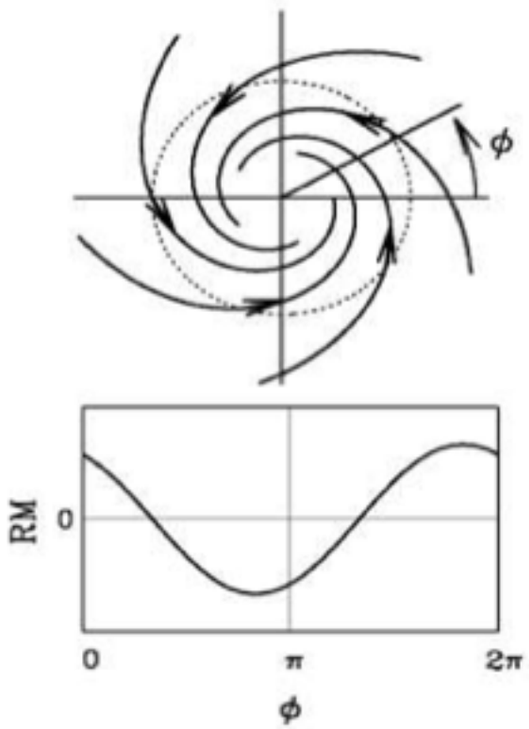
$$\vec{B}(r,\theta) = B(r,\theta)\left(\hat{\theta}\cos p + \hat{r}\sin p\right)$$

onde B(r, θ) depende do modelo adotado.

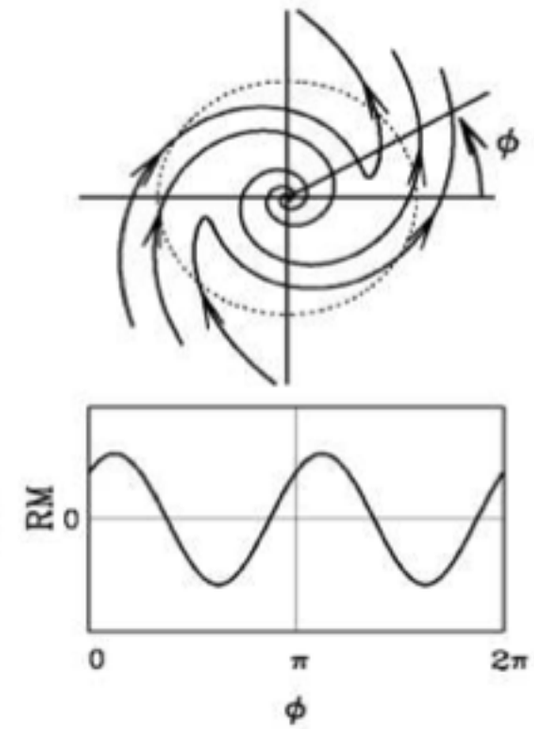



*Han et al. 2001*

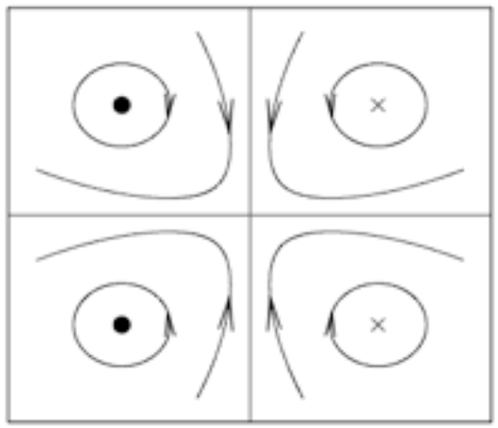
ASS (AxisSymmetric Spiral)
par em θ



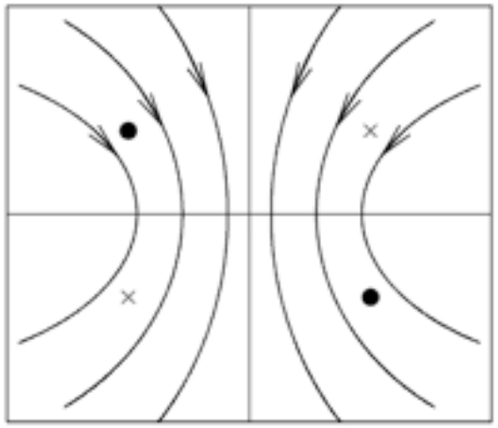

BSS (BiSymmetric Spiral)
ímpar em θ




Symmetric (-S)
[par em z]



Antissymmetric (-A)
[ímpar em z]



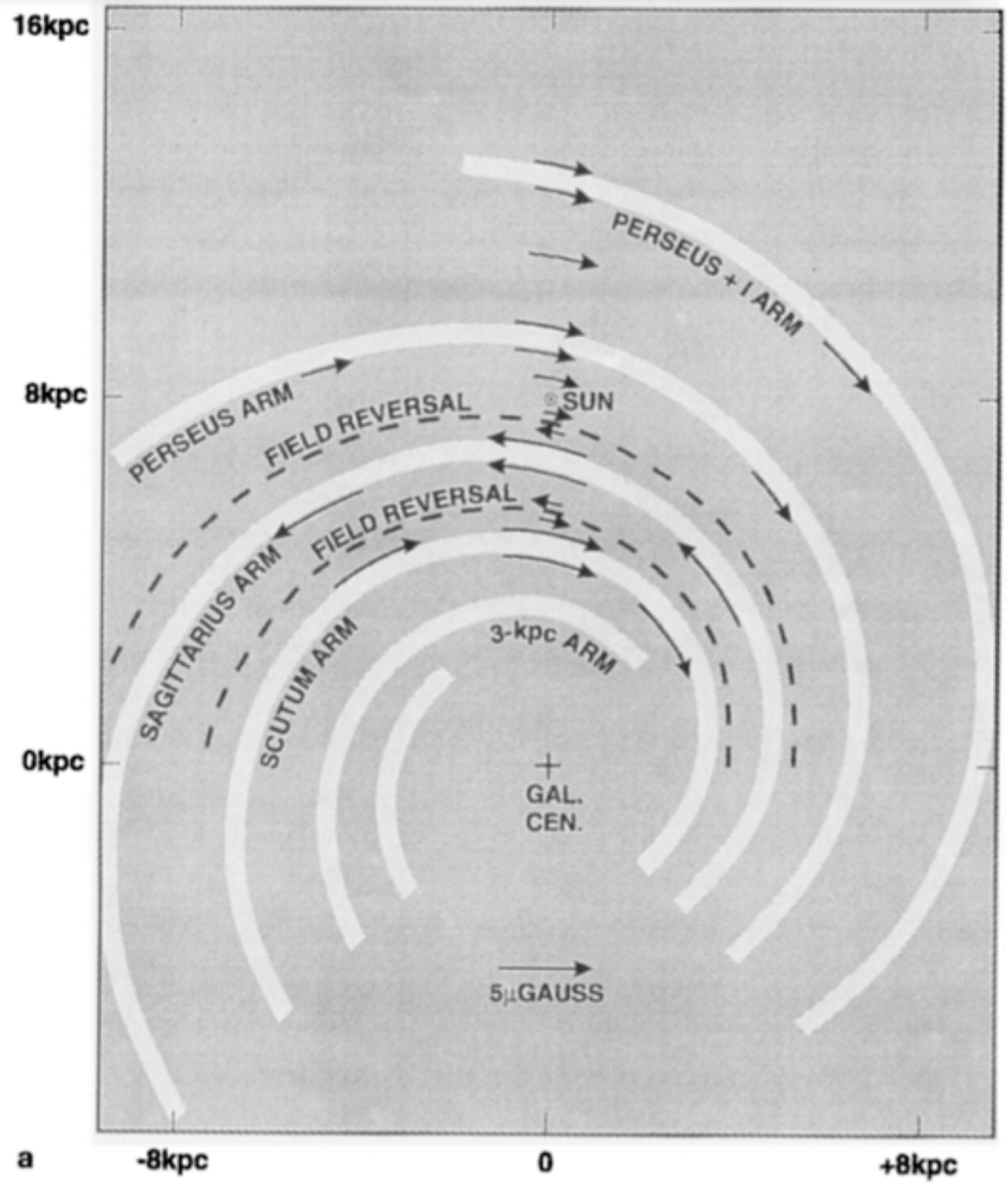
# reversões do campo

## panorama geral

✦ teorias de dínamo produzem modelos ASS com, no máximo, 3 reversões ou BSS com várias reversões de campo entre os braços espirais

✦ modelos BSS com 2 braços espirais pode haver reversão do campo entre os braços

✦ modelos BSS com 4 braços espirais não permitem reversão do campo entre os braços (haveriam braços vizinhos com campo no mesmo sentido)




J.Vallée, 1998

# campo magnético galáctico: o que sabemos?

✦ o campo magnético está orientado no sentido horário na parte externa e anti-horário em algumas partes internas do disco galáctico (Brown *et al.*, 2007; Noutsos *et al.*, 2008)

✦ é possível que um único modelo possa não ser capaz de descrever o campo magnético em larga escala (Men *et al.*, 2008).

✦ existe um campo no halo galáctico, mas não se pode inferir sua (anti)simetria (Sun *et al.*, 2008)

✦ o campo no halo tem intensidade ~ 1-2 μG (Sun *et al.*, 2008; Mao *et al.*, 2009)

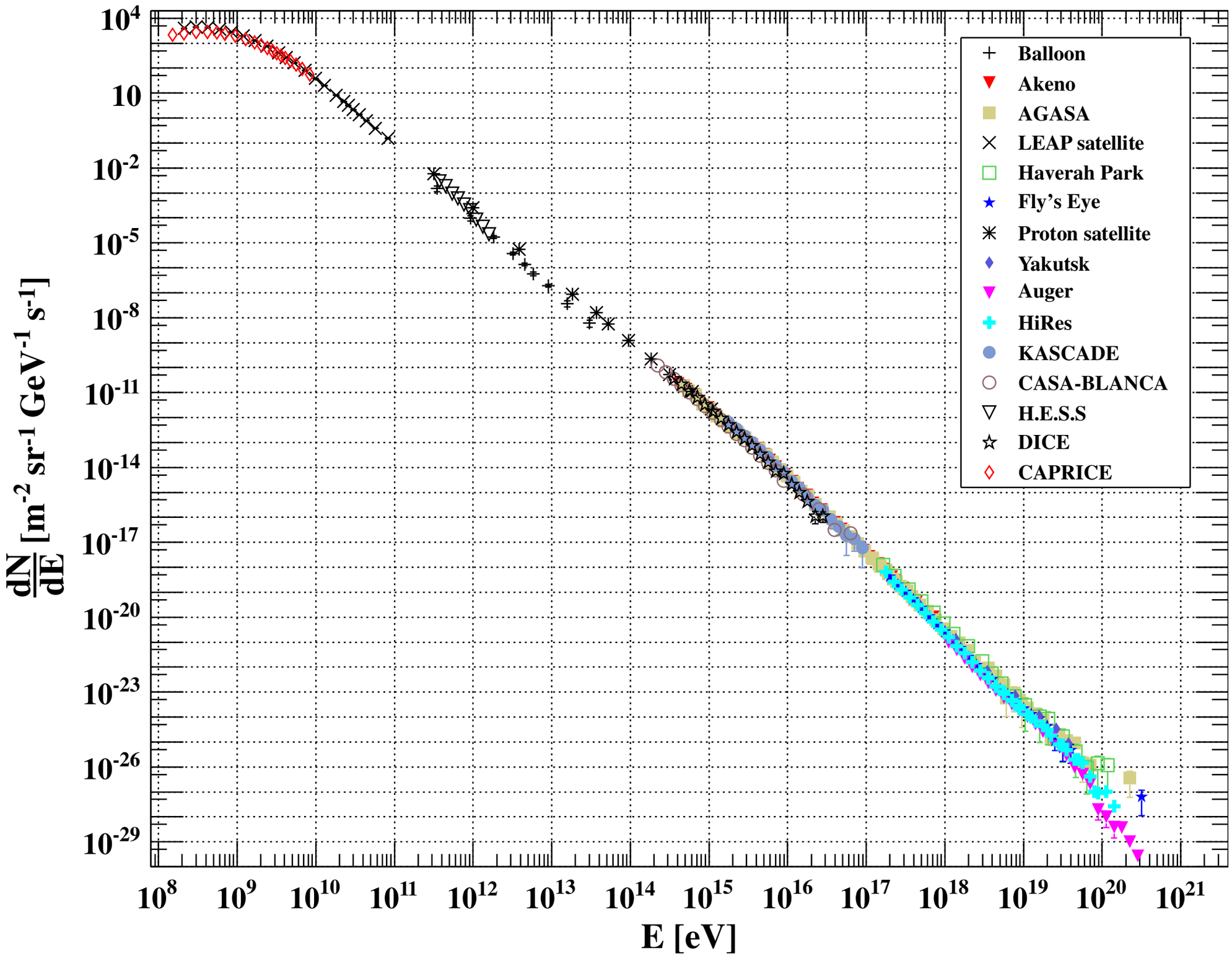
✦ a componente turbulenta: intensidade e comprimento de coerência dependente da localização na galáxia (Haverkorn *et al.*, 2008)

✦ Perspectivas:

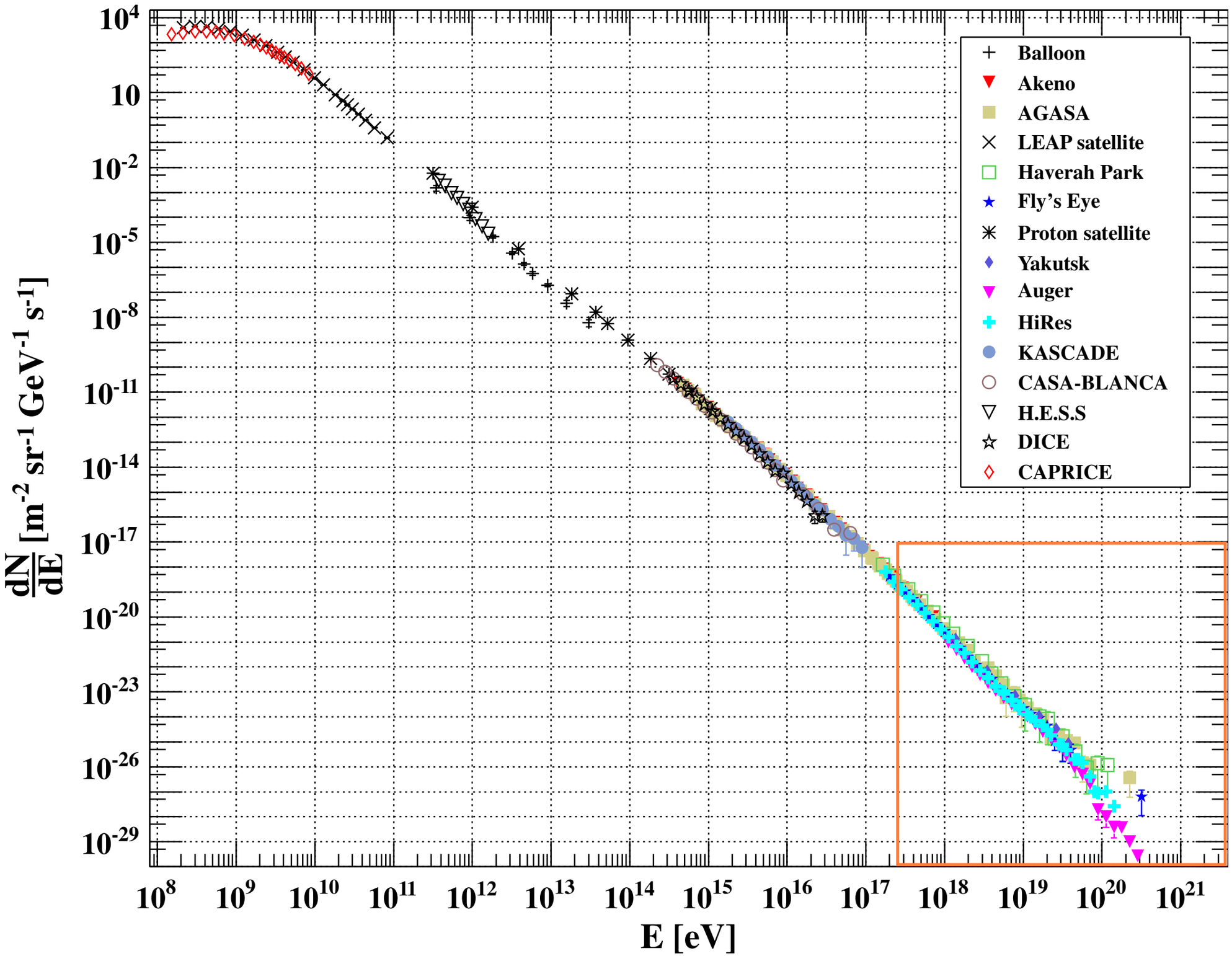
- ➡ GALFACTS, GMIMS, ATA, LOFAR, MWA, ASKAP, SKA
- ➡ informações complementares: Fermi, Planck e Auger

*Slide adaptado da apresentação de Gaensler, Ringberg, 2009.*

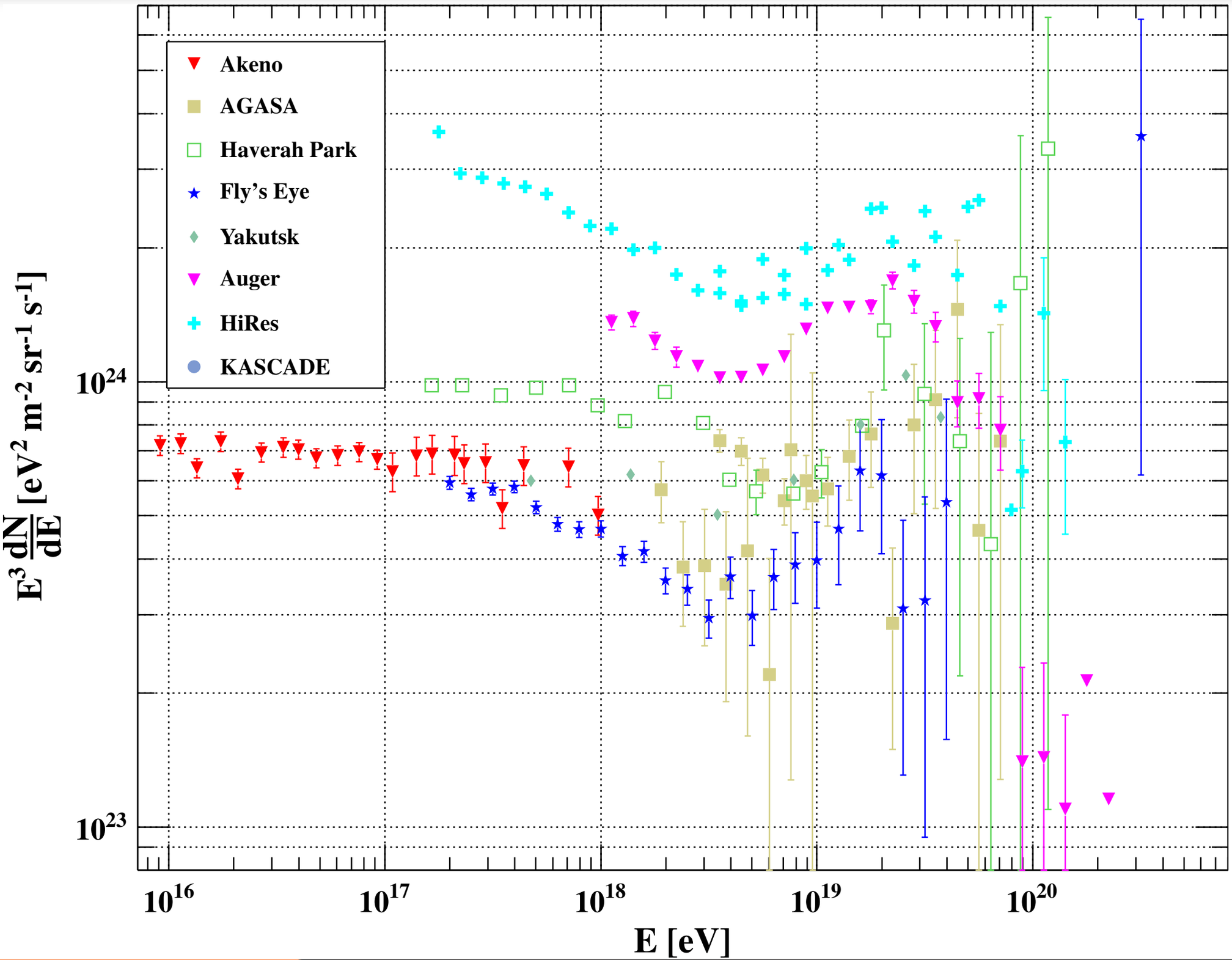
# um pouco sobre raios cósmicos: espectro



# um pouco sobre raios cósmicos: espectro



# um pouco sobre raios cósmicos: espectro



# um pouco sobre uhecrs: possíveis fontes

**condição de Hillas**

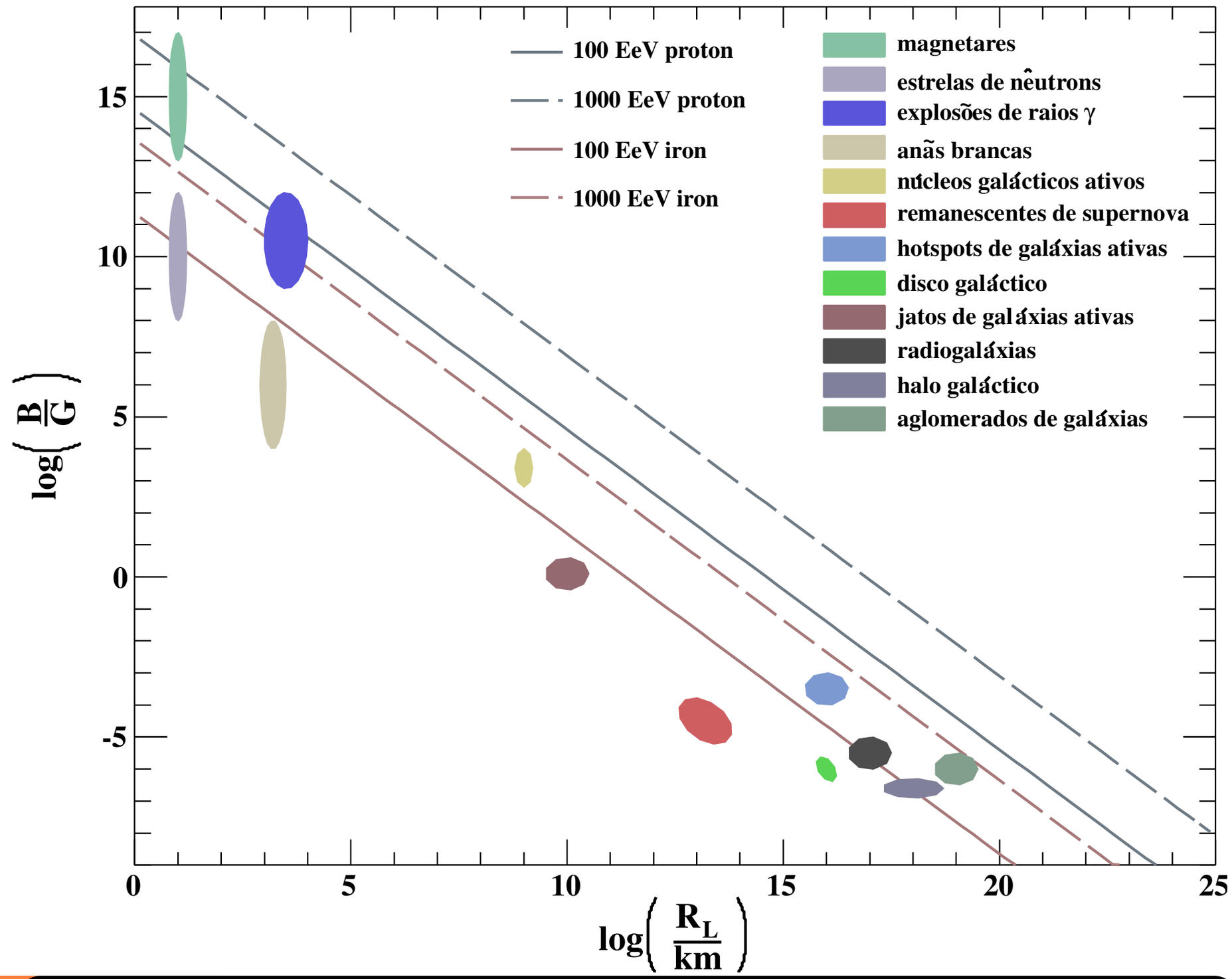
$$E_{max} \sim 2\beta c Z e B R_L$$

**espectro das fontes**

$$\frac{dN}{dE} = E^{-\alpha}$$

compatível com modelos de aceleração estocástica através de choques

**diagrama de Hillas**



# um pouco sobre uhecrs: interação

**prótons**

- ✦ fotoprodução de píons
- ✦ processos de Bethe-Heitler
- ✦ expansão do universo

**nucleons**

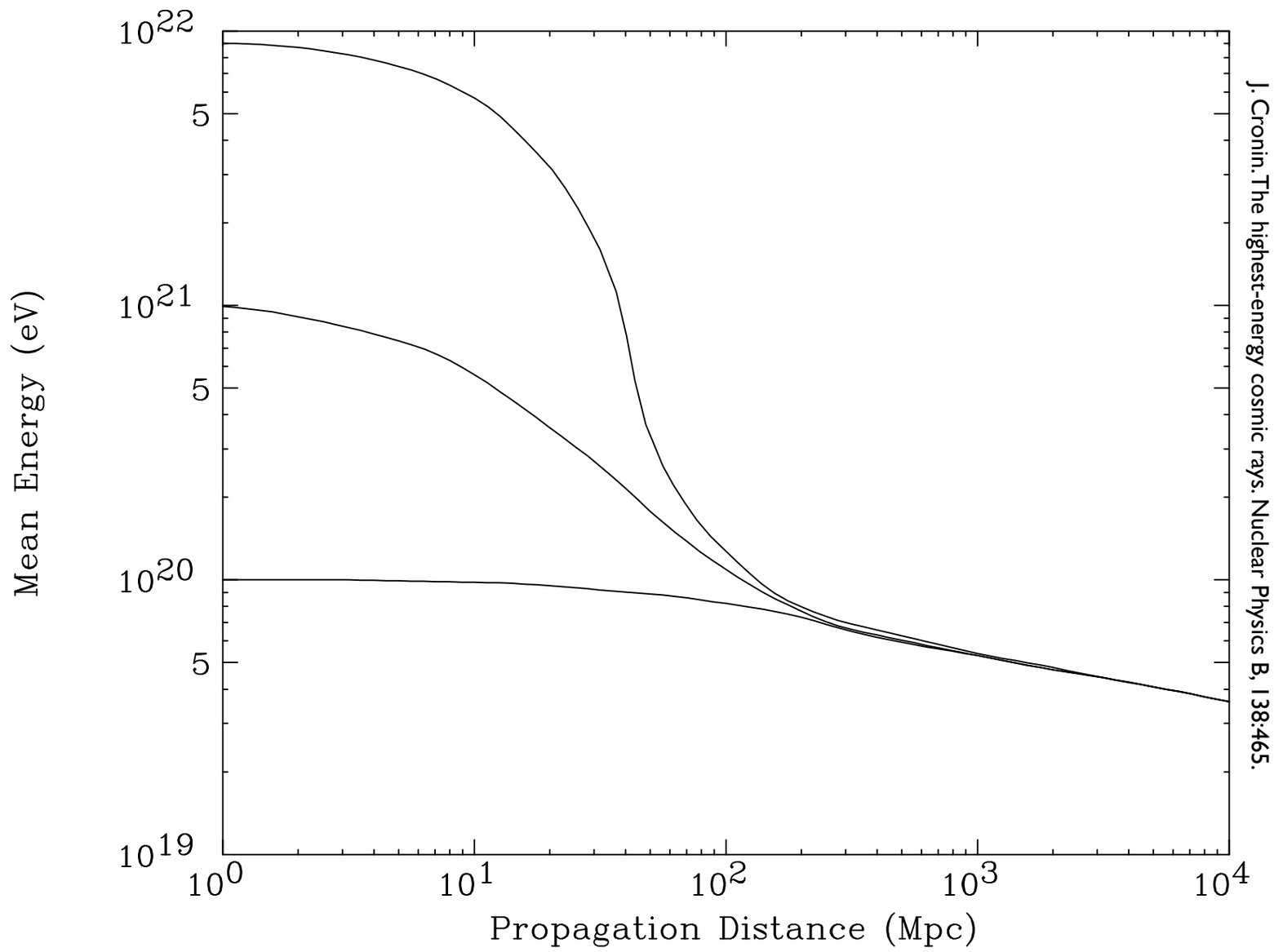
- ✦ fotoprodução de píons
- ✦ processos de Bethe-Heitler
- ✦ expansão do universo
- ✦ fotodesintegração

**efeito GZK**

$$\gamma + p \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$$

$$\gamma + p \rightarrow \Delta^+ \rightarrow n + \pi^+$$

- ✦ limiar GZK: $6 \times 10^{19}$ eV
- ✦ fontes com energia superior devem estar a menos de 75 Mpc



# um pouco sobre uhecrs: deflexões

## campo magnético extragaláctico: regular

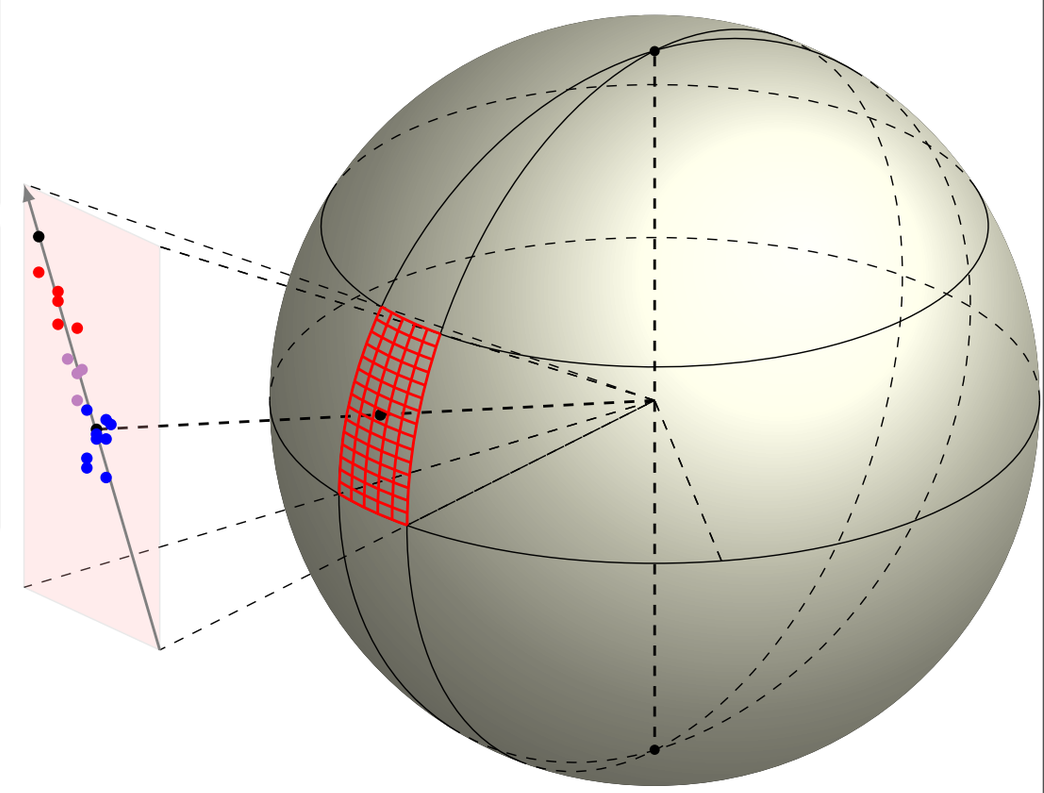
$$\delta_{EGMF} \approx 0,53^\circ Z \left(\frac{D}{100\ \mathrm{Mpc}}\right)\left(\frac{100\ \mathrm{EeV}}{E}\right)\left(\frac{\langle B\rangle}{10^{-2}\ \mathrm{nG}}\right)$$

## campo magnético extragaláctico: turbulento

$$\delta_{rms} = 0,01^\circ Z \frac{L_c}{L}\left(\frac{\mathrm{EeV}}{E}\right)\left(\frac{B_{rms}}{5\ \mu\mathrm{G}}\right)\left(\frac{L}{2\ \mathrm{kpc}}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{50\ pc}{L_c}}$$

## campo magnético galáctico: regular

$$\delta_{reg} = 16^\circ \frac{20\ \mathrm{EeV}}{E/Z}\left|\int_0^L \frac{d\vec{l}}{3\ \mathrm{kpc}} \times \frac{\vec{B}}{2\ \mu\mathrm{G}}\right|$$



## campo magnético galáctico: turbulento

$$\delta_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{ZeB_{rms}}{E}\sqrt{LL_c} \approx 5,8^\circ \left(\frac{10^{19}\ \mathrm{eV}}{E/Z}\right)\left(\frac{B_{rms}}{4\ \mu\mathrm{G}}\right)\sqrt{\frac{L}{3\ \mathrm{kpc}}}\sqrt{\frac{L_c}{50\ \mathrm{kpc}}}$$

# um pouco sobre uhecrs: deflexões

**campo magnético extragaláctico: regular**

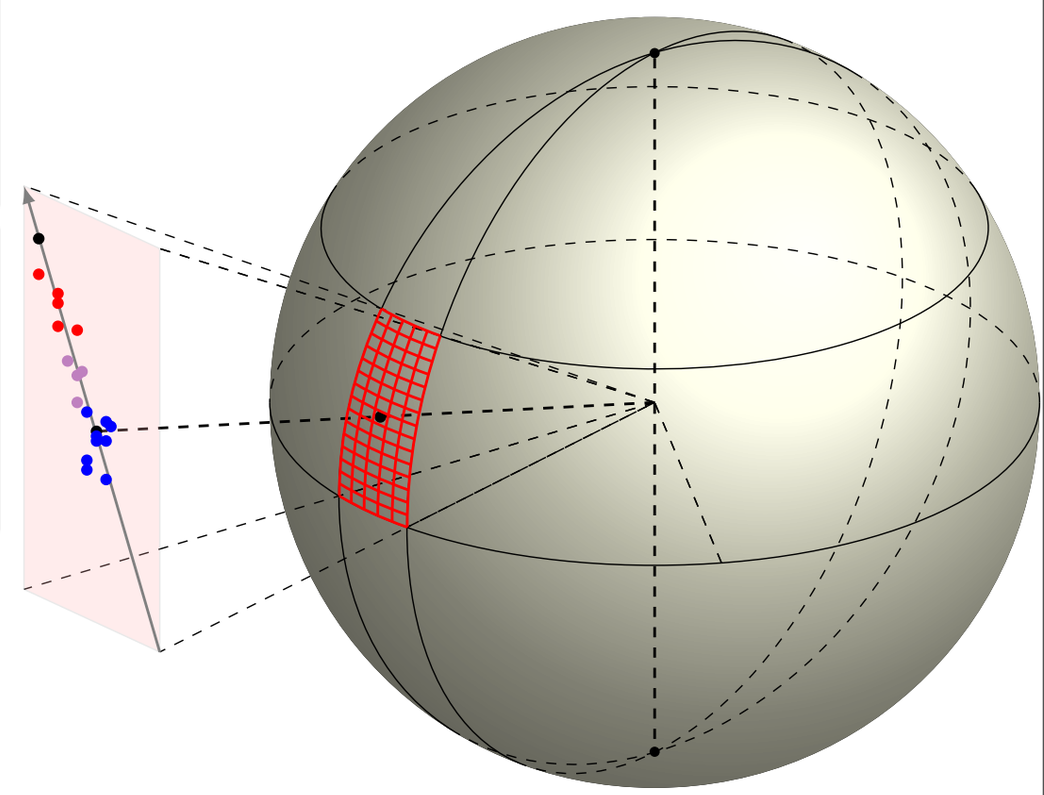
$$\delta_{EGMF} \approx 0,53^\circ Z \left(\frac{D}{100\ \mathrm{Mpc}}\right)\left(\frac{100\ \mathrm{EeV}}{E}\right)\left(\frac{\langle B\rangle}{10^{-2}\ \mathrm{nG}}\right)$$

**campo magnético extragaláctico: turbulento**

$$\delta_{rms} = 0,01^\circ Z \frac{L_c}{L}\left(\frac{\mathrm{EeV}}{E}\right)\left(\frac{B_{rms}}{5\ \mu\mathrm{G}}\right)\left(\frac{L}{2\ \mathrm{kpc}}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{50\ pc}{L_c}}$$

**campo magnético galáctico: regular**

$$\delta_{reg} = 16^\circ \frac{20\ \mathrm{EeV}}{E/Z}\left|\int_0^L \frac{d\vec{l}}{3\ \mathrm{kpc}} \times \frac{\vec{B}}{2\ \mu\mathrm{G}}\right|$$



**campo magnético galáctico: turbulento**

$$\delta_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{ZeB_{rms}}{E}\sqrt{LL_c} \approx 5,8^\circ \left(\frac{10^{19}\ \mathrm{eV}}{E/Z}\right)\left(\frac{B_{rms}}{4\ \mu\mathrm{G}}\right)\sqrt{\frac{L}{3\ \mathrm{kpc}}}\sqrt{\frac{L_c}{50\ \mathrm{kpc}}}$$

# um pouco sobre uhecrs: deflexões

**campo magnético extragaláctico: regular**

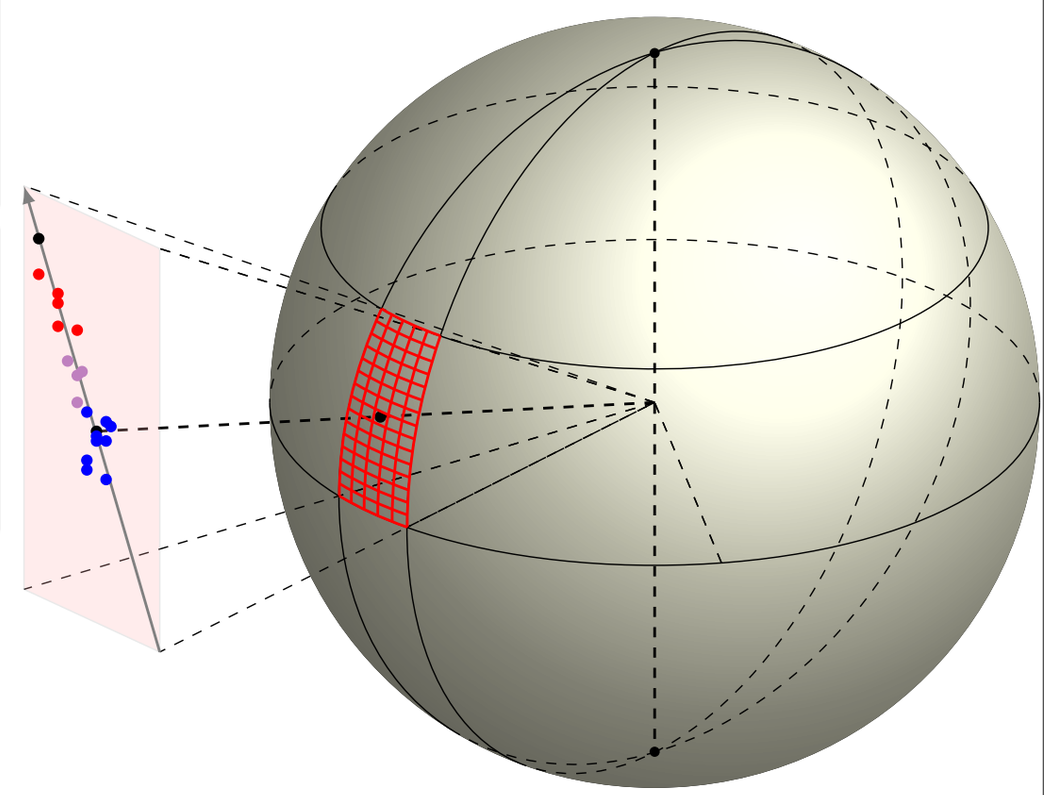
$$\delta_{EGMF} \approx 0,53^\circ Z \left(\frac{D}{100\ \mathrm{Mpc}}\right)\left(\frac{100\ \mathrm{EeV}}{E}\right)\left(\frac{\langle B\rangle}{10^{-2}\ \mathrm{nG}}\right)$$

**campo magnético extragaláctico: turbulento**

$$\delta_{rms} = 0,01^\circ Z \frac{L_c}{L}\left(\frac{\mathrm{EeV}}{E}\right)\left(\frac{B_{rms}}{5\ \mu\mathrm{G}}\right)\left(\frac{L}{2\ \mathrm{kpc}}\right)^{\frac{3}{2}}\sqrt{\frac{50\ pc}{L_c}}$$

**campo magnético galáctico: regular**

$$\delta_{reg} = 16^\circ \frac{20\ \mathrm{EeV}}{E/Z}\left|\int_0^L \frac{d\vec{l}}{3\ \mathrm{kpc}} \times \frac{\vec{B}}{2\ \mu\mathrm{G}}\right|$$



$$\delta \propto E^{-1}$$

**campo magnético galáctico: turbulento**

$$\delta_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{ZeB_{rms}}{E}\sqrt{LL_c} \approx 5,8^\circ \left(\frac{10^{19}\ \mathrm{eV}}{E/Z}\right)\left(\frac{B_{rms}}{4\ \mu\mathrm{G}}\right)\sqrt{\frac{L}{3\ \mathrm{kpc}}}\sqrt{\frac{L_c}{50\ \mathrm{kpc}}}$$

# reconhecendo padrões na esfera

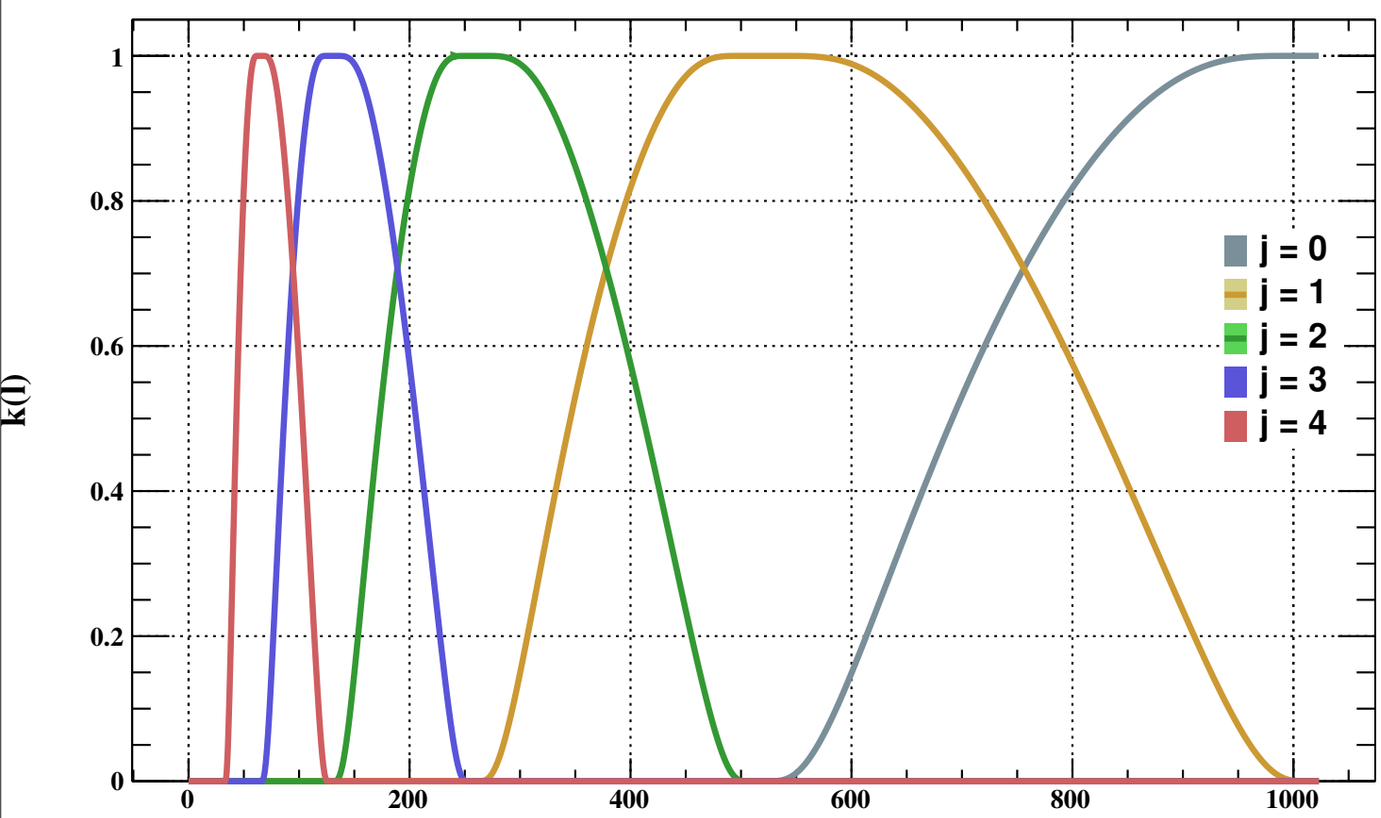
## algoritmo de reconhecimento de padrões

✦ f(θ,φ) → padrão buscado; h(θ,φ) → sinal

✦ correlação de h com versões rotacionadas de f

$$C = \int_{\mathbb{S}^2} f(\omega)\overline{\Lambda(g)h(\omega)}d(\cos\theta)d\varphi$$

✦ se f é uma wavelet, a equação acima corresponde à transformada de wavelets na esfera do sinal h




✦ as wavelets utilizadas neste trabalho são direcionáveis, i.e, fatoráveis no espaço harmônico:

$$b_{lm} = k(l)S_{lm}$$

✦ a otimização do algoritmo é feita escrevendo f e h em termos de harmônicos esférico

$$f(\theta,\varphi) = \sum_{l=0}^{B-1}\sum_{|m|\leq l} a_{lm}Y_{lm}(\theta,\varphi)$$

✦ assim a correlação é dada por:

$$C = \sum_{l=0}^{B-1}\sum_{|m|\leq l}\sum_{|m'|\leq l} \overline{a_{lm}}b_{lm'}D^{l}_{mm'}(\alpha,\beta,\gamma)$$

B: limite de banda

J=logαa: número de escalas

α: parâmetro de escala (fixo em 2)

j: escala qualquer

N: limite de banda azimutal

# reconhecendo padrões na esfera

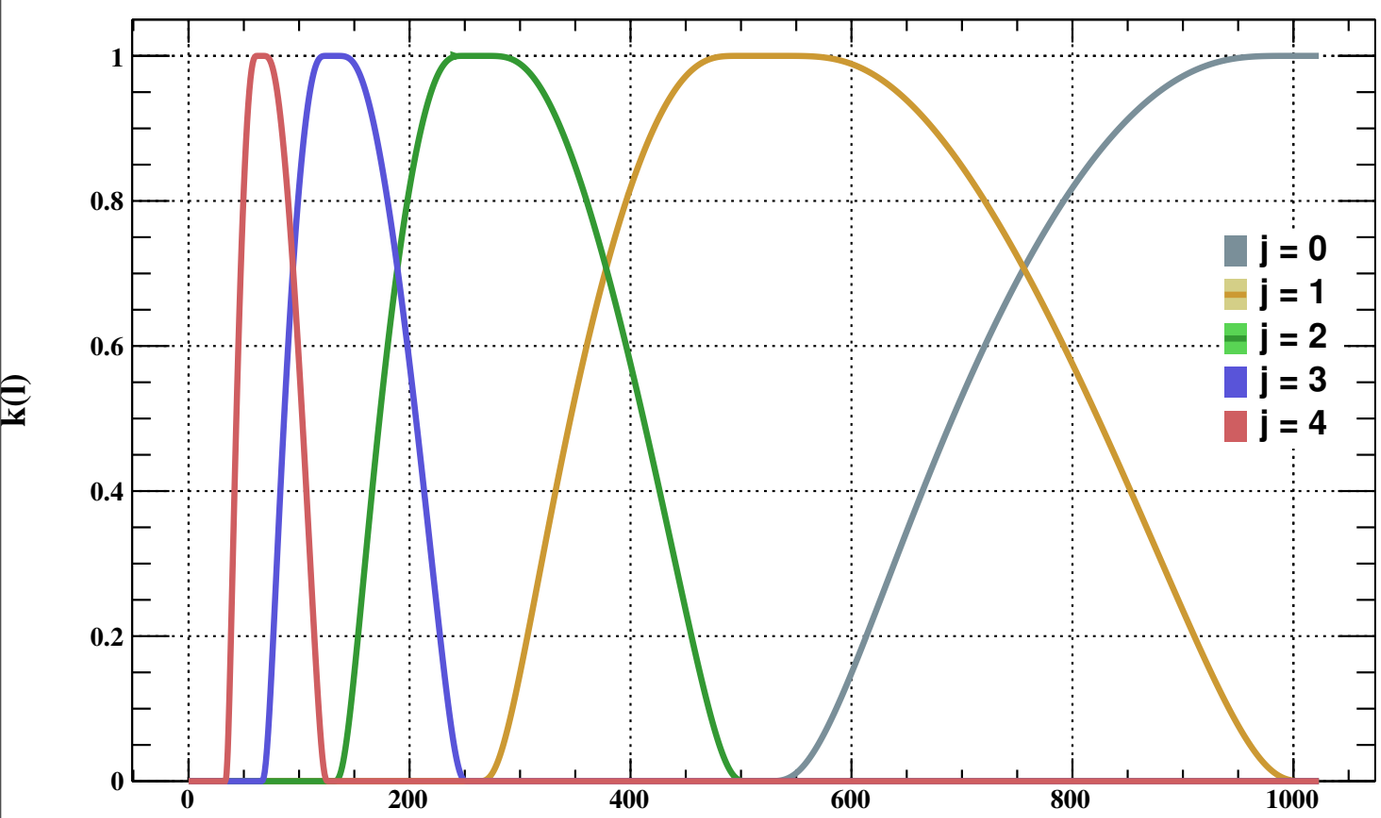
## algoritmo de reconhecimento de padrões

✦ f(θ,φ) → padrão buscado; h(θ,φ) → sinal

✦ correlação de h com versões rotacionadas de f

$$C = \int_{\mathbb{S}^2} f(\omega)\overline{\Lambda(g)h(\omega)}d(\cos\theta)d\varphi$$

✦ se f é uma wavelet, a equação acima corresponde à transformada de wavelets na esfera do sinal h




✦ as wavelets utilizadas neste trabalho são direcionáveis, i.e, fatoráveis no espaço harmônico:

$$b_{lm} = k(l)S_{lm}$$

✦ a otimização do algoritmo é feita escrevendo f e h em termos de harmônicos esférico

$$f(\theta,\varphi) = \sum_{l=0}^{B-1}\sum_{|m|\leq l} a_{lm}Y_{lm}(\theta,\varphi)$$

✦ assim a correlação é dada por:

$$C = \sum_{l=0}^{B-1}\sum_{|m|\leq l}\sum_{|m'|\leq l} \overline{a_{lm}}b_{lm'}D^{l}_{mm'}(\alpha,\beta,\gamma)$$

B: limite de banda

J=logαa: número de escalas

α: parâmetro de escala (fixo em 2)

j: escala qualquer

N: limite de banda azimutal

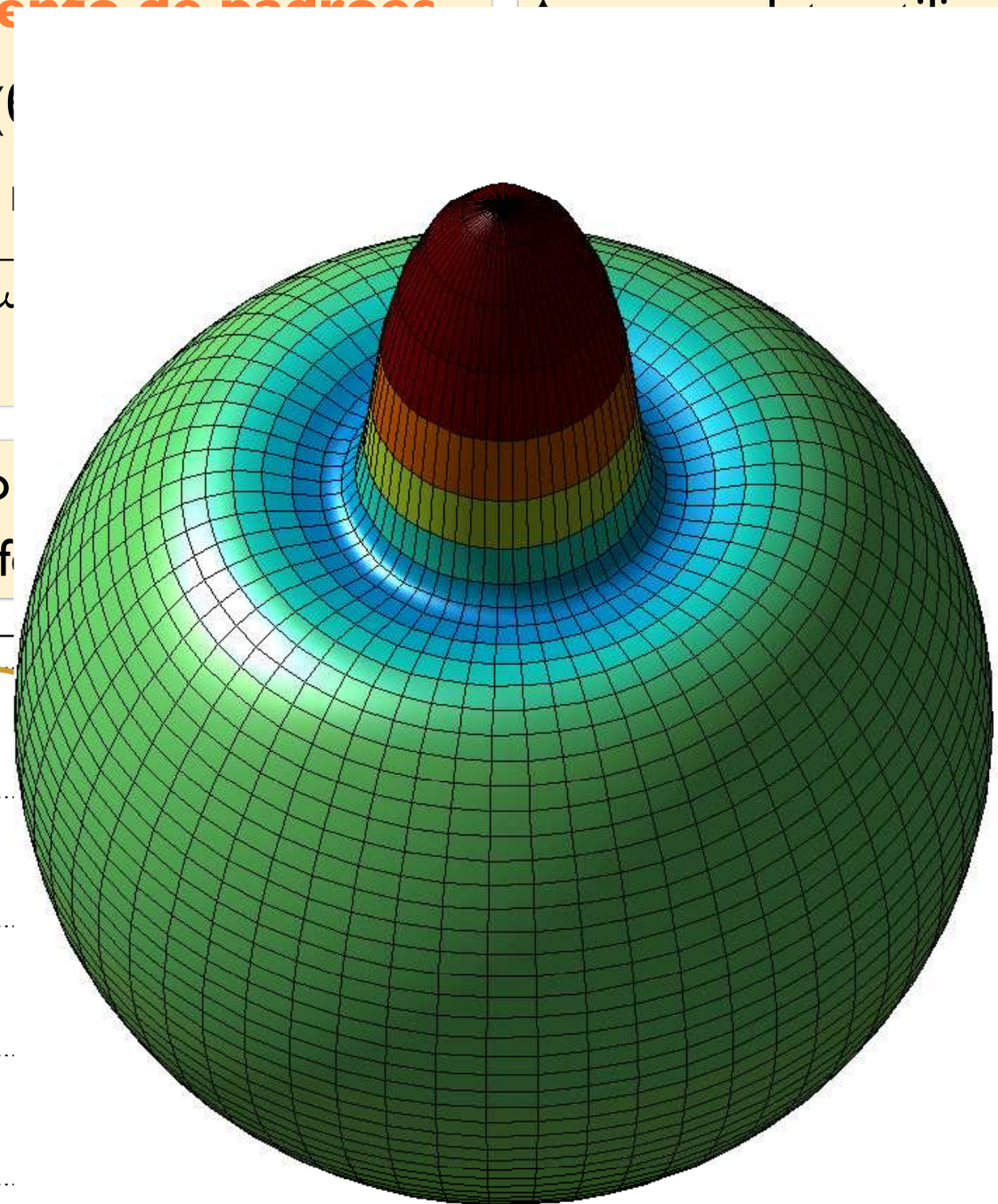
# reconhecendo padrões na esfera

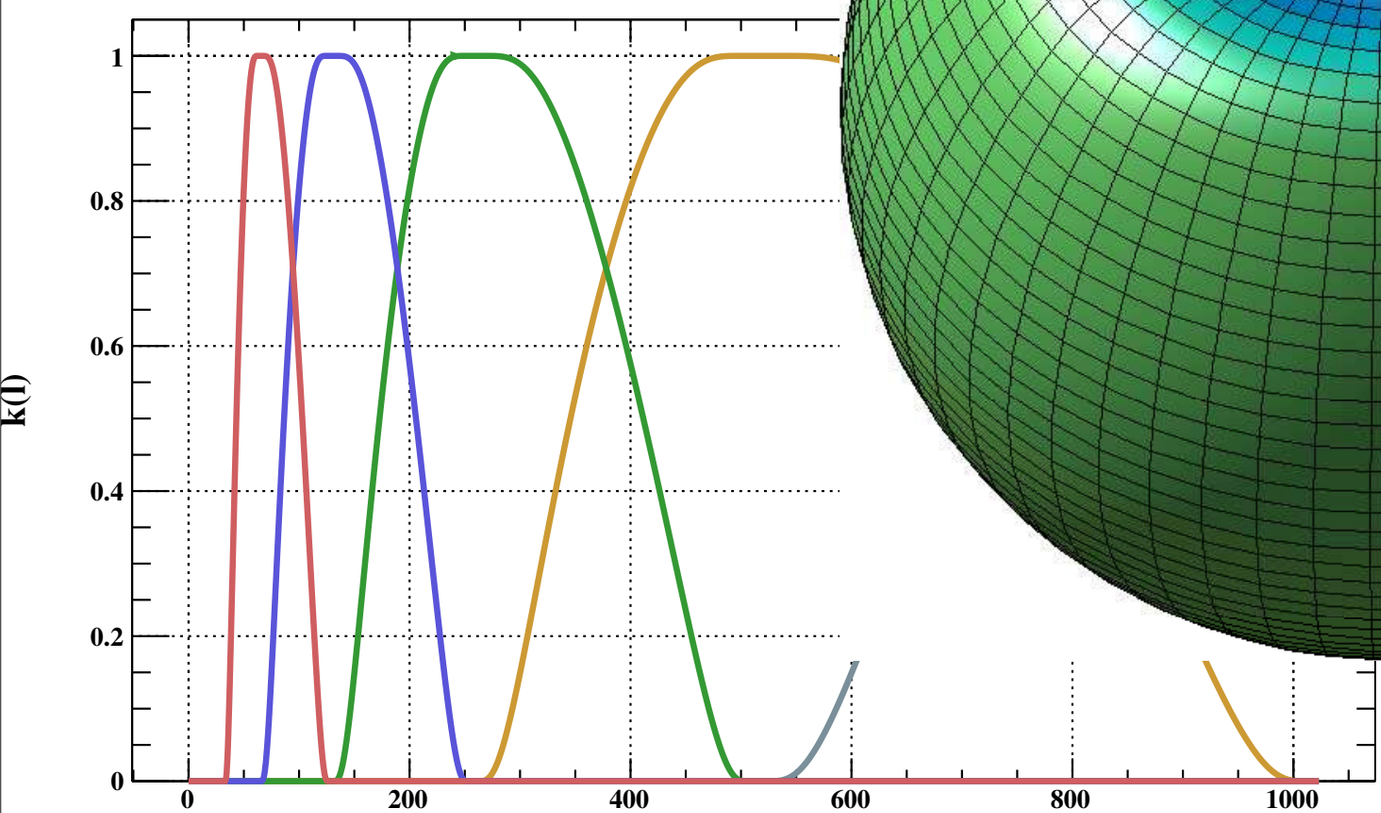
## algoritmo de reconhecimento de padrões

- f(θ,φ) → padrão buscado; h(
- correlação de h com versões

$$C = \int_{\mathbb{S}^2} f(\omega)\overline{\Lambda(g)h(\omega}$$

- se f é uma wavelet, a equação
transformada de wavelets na esf






das neste trabalho são
atoráveis no espaço

$$= k(l)S_{lm}$$

o algoritmo é feita
termos de harmônicos

$$\sum_{|m|\leq l} a_{lm}Y_{lm}(\theta,\varphi)$$

é dada por:

$$\overline{a_{lm}}b_{lm'}D^l_{mm'}(\alpha,\beta,\gamma)$$

$l$

scalas

a (fixo em 2)

j: escala qualquer

N: limite de banda azimutal

# reconhecendo padrões na esfera

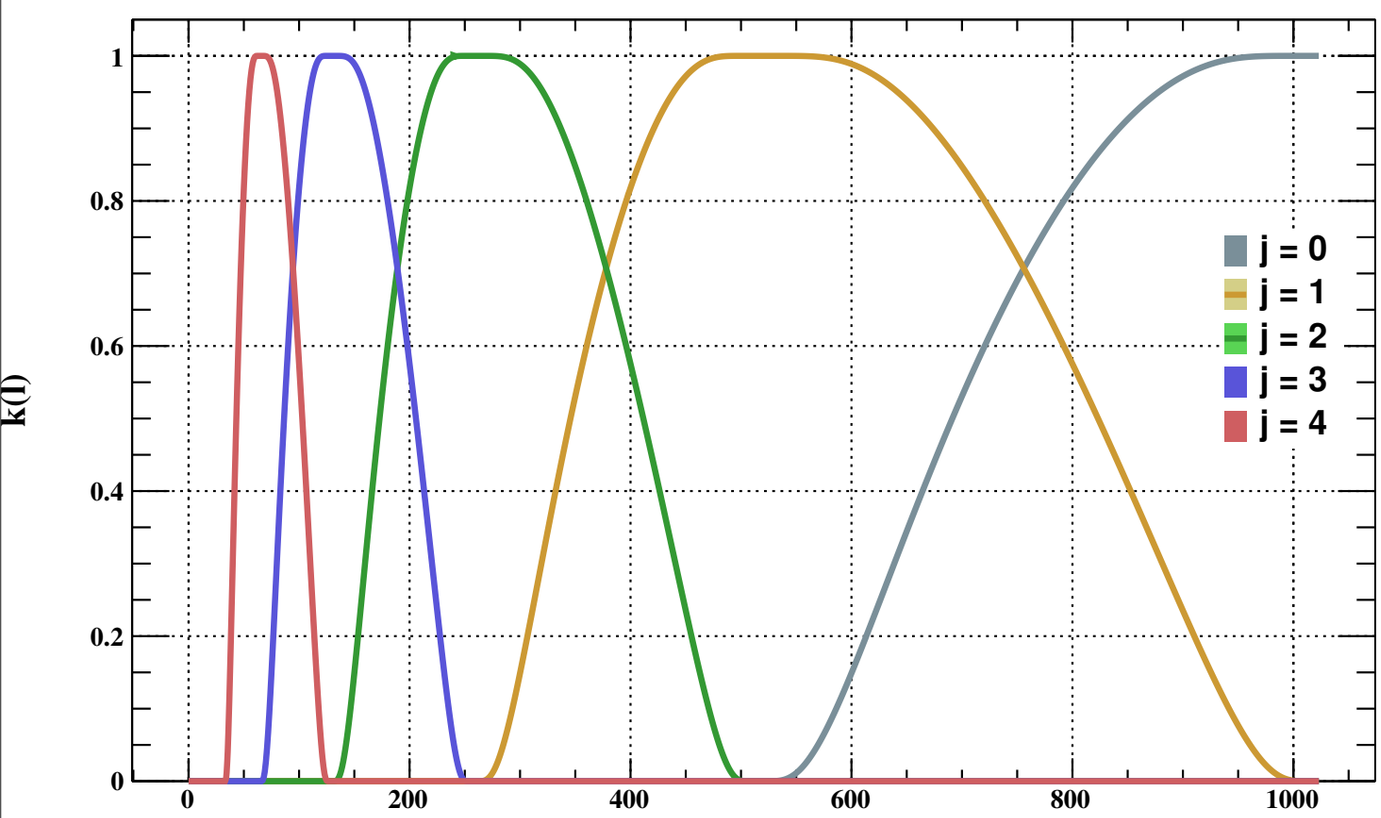
## algoritmo de reconhecimento de padrões

✦ f(θ,φ) → padrão buscado; h(θ,φ) → sinal

✦ correlação de h com versões rotacionadas de f

$$C = \int_{\mathbb{S}^2} f(\omega)\overline{\Lambda(g)h(\omega)}d(\cos\theta)d\varphi$$

✦ se f é uma wavelet, a equação acima corresponde à transformada de wavelets na esfera do sinal h




✦ as wavelets utilizadas neste trabalho são direcionáveis, i.e, fatoráveis no espaço harmônico:

$$b_{lm} = k(l)S_{lm}$$

✦ a otimização do algoritmo é feita escrevendo f e h em termos de harmônicos esférico

$$f(\theta,\varphi) = \sum_{l=0}^{B-1}\sum_{|m|\leq l} a_{lm}Y_{lm}(\theta,\varphi)$$

✦ assim a correlação é dada por:

$$C = \sum_{l=0}^{B-1}\sum_{|m|\leq l}\sum_{|m'|\leq l} \overline{a_{lm}}b_{lm'}D^{l}_{mm'}(\alpha,\beta,\gamma)$$

B: limite de banda

J=logαa: número de escalas

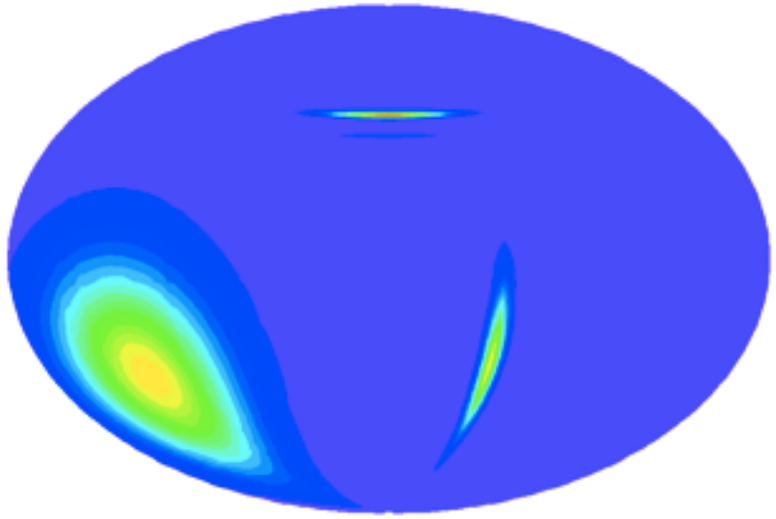
α: parâmetro de escala (fixo em 2)

j: escala qualquer

N: limite de banda azimutal

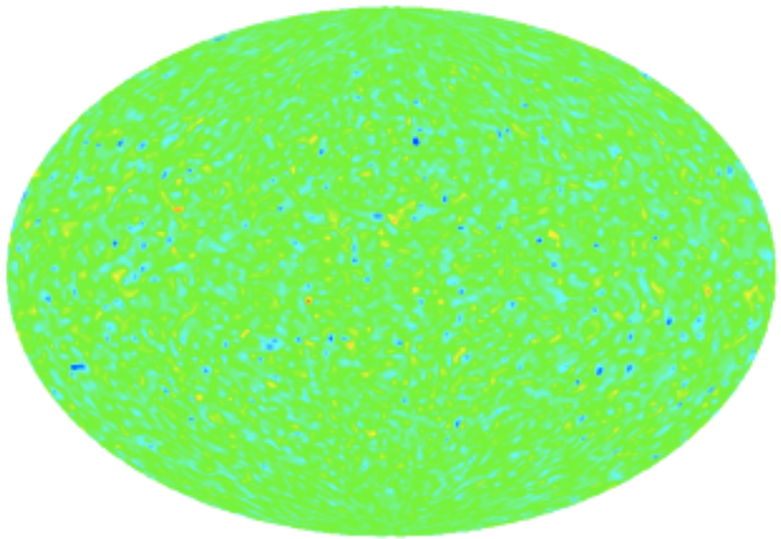
# reconhecendo padrões na esfera

sinal



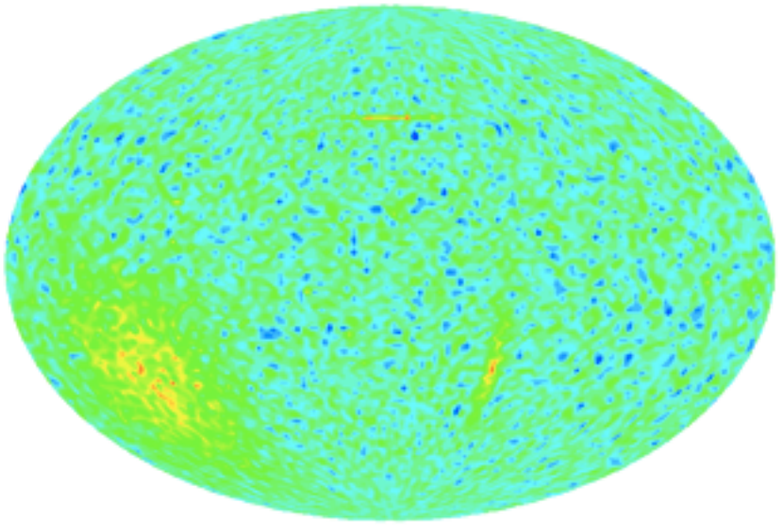
+

ruído

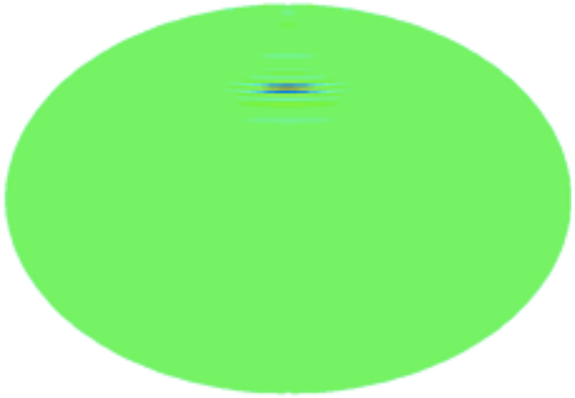


=

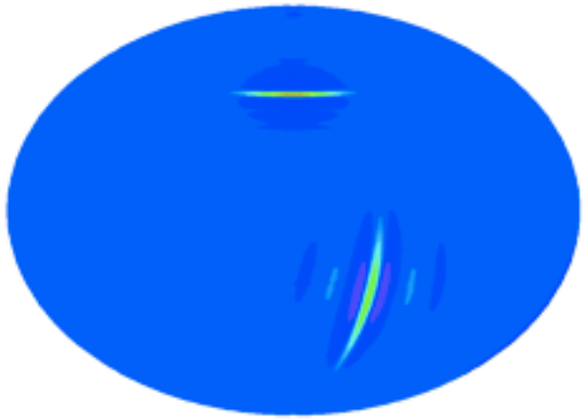
soma



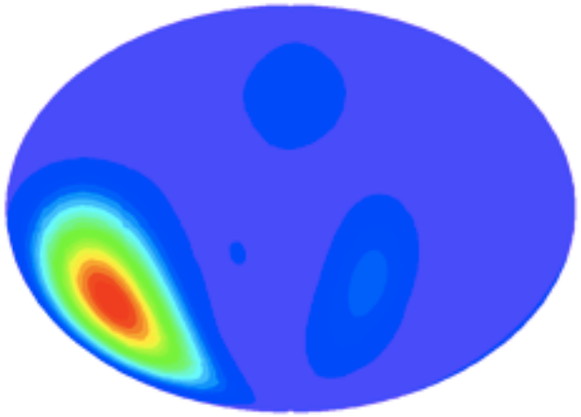
B=256, $j_{min}$=0, $j_{max}$=0



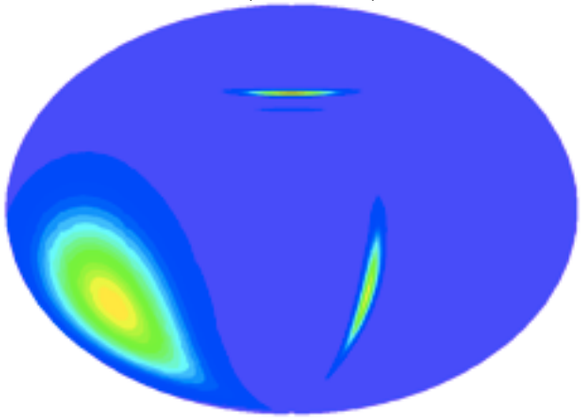
B=256, $j_{min}$=0, $j_{max}$=3



B=256, $j_{min}$=5, $j_{max}$=7



B=256, $j_{min}$=0, $j_{max}$=7

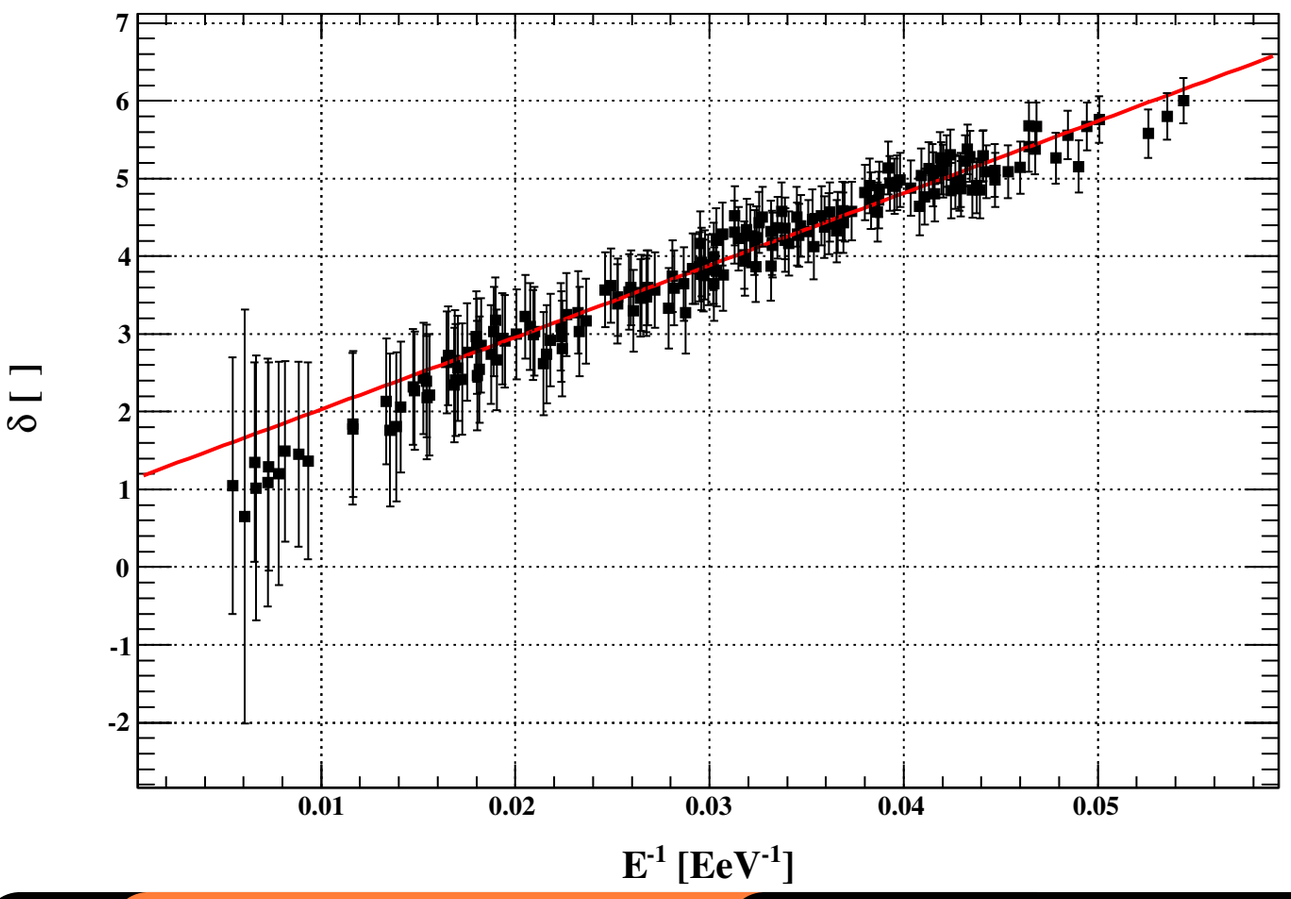


# identificando multipletos

✦ procura-se uma versão rotacionada de um determinado padrão

✦ quando a o coeficiente de wavelet tem um valor alto, isto indica que o padrão foi localizado

✦ obtem-se ângulos de Euler, sendo um deles associado à orientação do candidato a multipleto

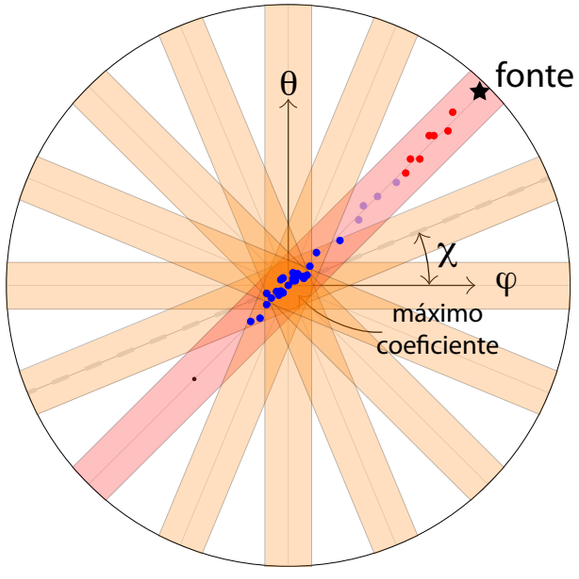



✤ para eventos provenientes da mesma fonte, tem-se que:

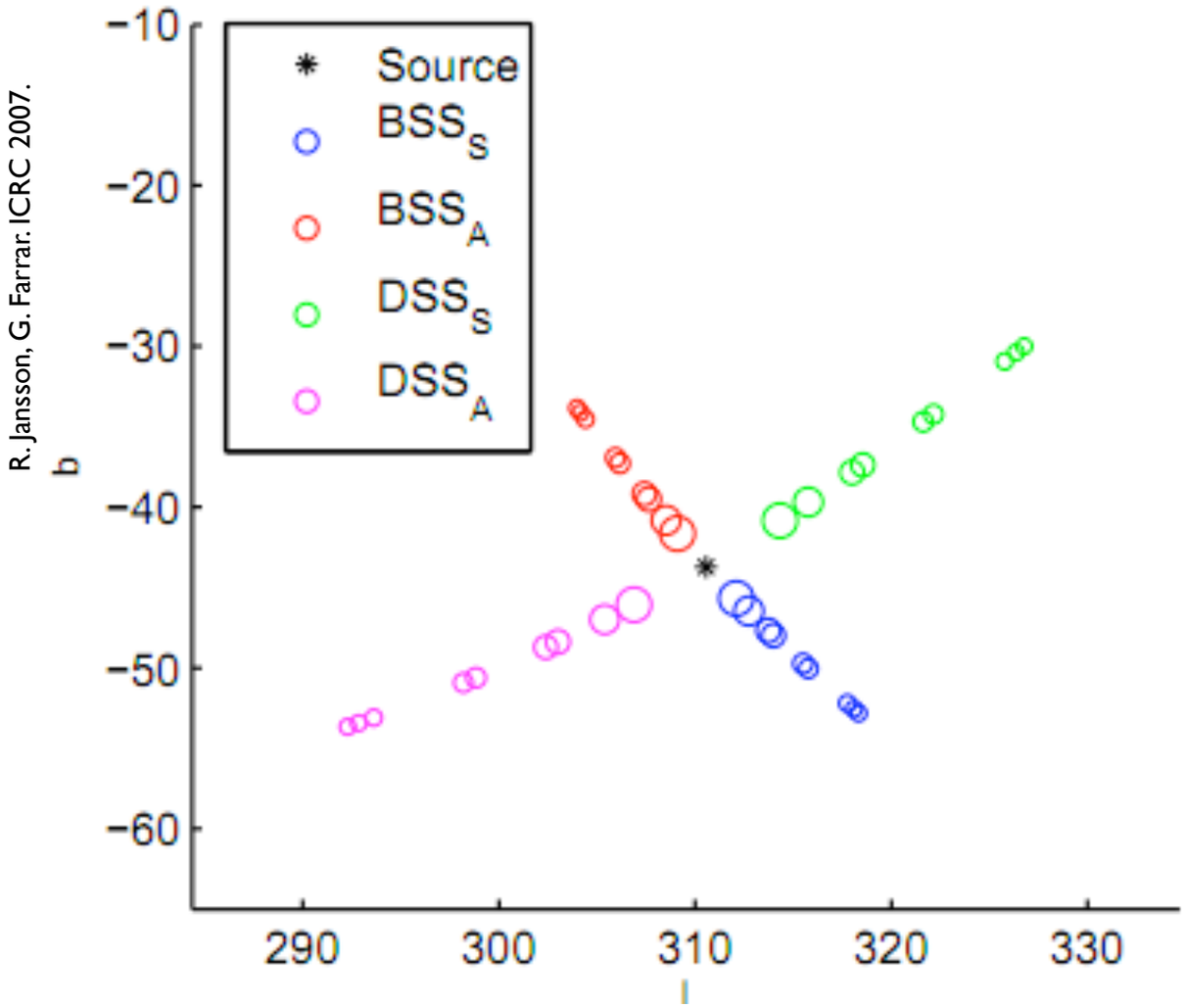
$$\delta = \frac{Ze}{E} \int_0^L d\vec{l} \times \vec{B}$$

✦ para multipletos espera-se um alto valor para o coeficiente de correlação do gráfico da deflexão pelo inverso da energia

✦ se o coeficiente é alto, busca-se um faixa ao redor do multipleto, de modo a maximizar a contagem de eventos dentro desta



# campo magnético galáctico e multipletos




R. Jansson, G. Farrar. ICRC 2007.

**conclusão**

✤ a orientação dos multipletos no céu pode contribuir para impor limites em modelos de campo magnético galáctico

**simulações de referência**

✦ Stanev (ASS-A, BSS-S)

✦ HMR (ASS-A, ASS-S, BSS-A, BSS-S)

✦ SRWE (BSS, ASS+RING)

**expectativas**

✦ espera-se observar a orientação de multipletos simulados nos supracitados modelos

**ligando com a realidade**

✦ a busca e identificação de multipletos em dados do Auger permitirá restringir modelos de campo magnético galáctico, caso estes sejam realmente identificados.

# modelo de Stanev

**BSS-S**

$$B(r,\theta) = B_0(r)\cos\left(\theta - \frac{1}{\tan p}\ln\frac{r}{r_0}\right)$$

**ASS-A**

$$B(r,\theta) = B_0(r)\left|\cos\left(\theta - \frac{1}{\tan p}\ln\frac{r}{r_0}\right)\right|$$

**campo no halo**

$$|B(r,\theta,z)| = |B(r,\theta)|\exp\left(-\frac{|z|}{z_0}\right)$$

**componente radial**

$$B_0(r) = \frac{3R}{r}\ \mu\mathrm{G}$$

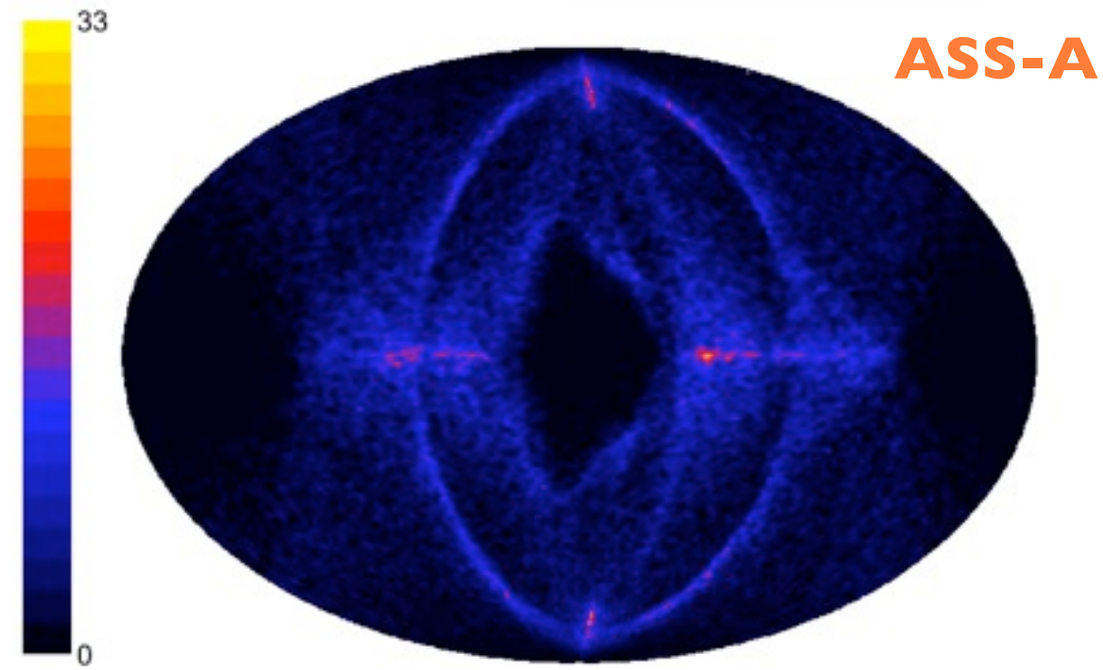
**parâmetros**

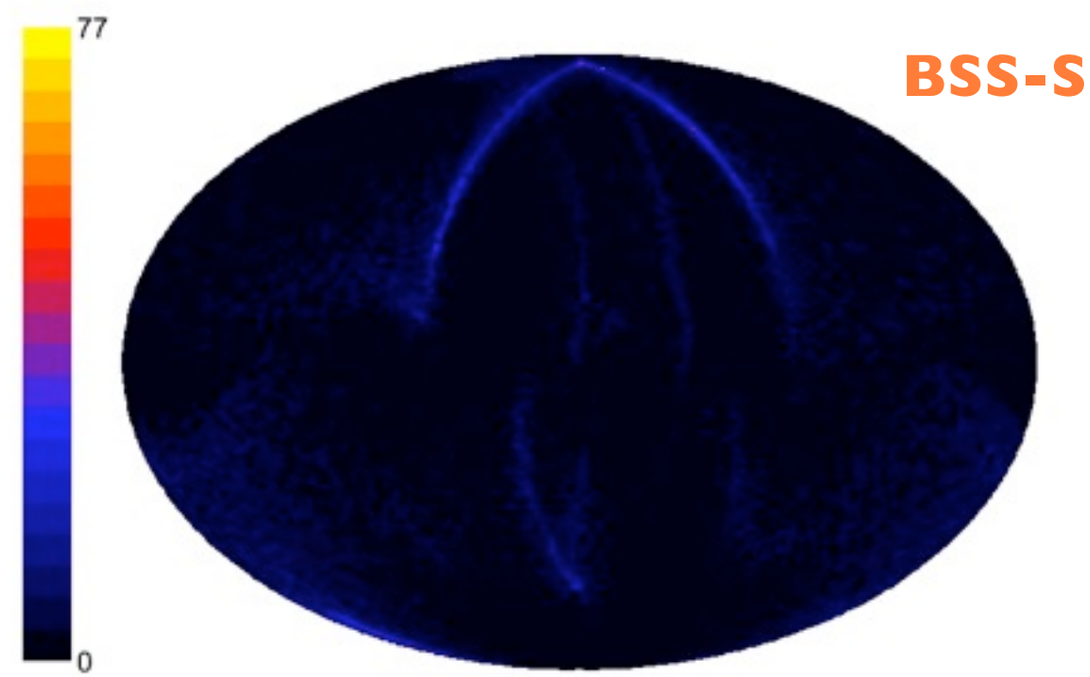
$z_0$=1 kpc se |z|<0,5 kpc e 4 kpc caso contrário

p=-10°

$r_0$=10,55 kpc

R=8,5 kpc



# modelo de Harari, Mollerach e Roulet

**BSS**

$$B(r,\theta) = B_0(r)\cos^2\left(\theta - \frac{1}{\tan p}\ln\frac{r}{r_0}\right)$$

**ASS**

$$B(r,\theta) = B_0(r)\cos\left(\theta - \frac{1}{\tan p}\ln\frac{r}{r_0}\right)$$

**componente radial**

$$B_0(r) = \frac{3R}{r}\tanh^3\left(\frac{r}{r_1}\right)\ \mu\mathrm{G}$$

**campo no halo**

$$\vec{B}_{-S}(r,\theta,z) = \vec{B}(r,\theta)\left[\frac{1}{2\cosh\left(\frac{z}{z_0}\right)} + \frac{1}{2\cosh\left(\frac{z}{z_1}\right)}\right]$$

$$\vec{B}_{-A}(r,\theta,z) = \vec{B}_{-A}(r,\theta,z)\tanh\left(\frac{z}{z_2}\right)$$

**parâmetros**

$z_0$=4 kpc

$z_1$=0.3 kpc

$z_2$=20 pc

p=-12°

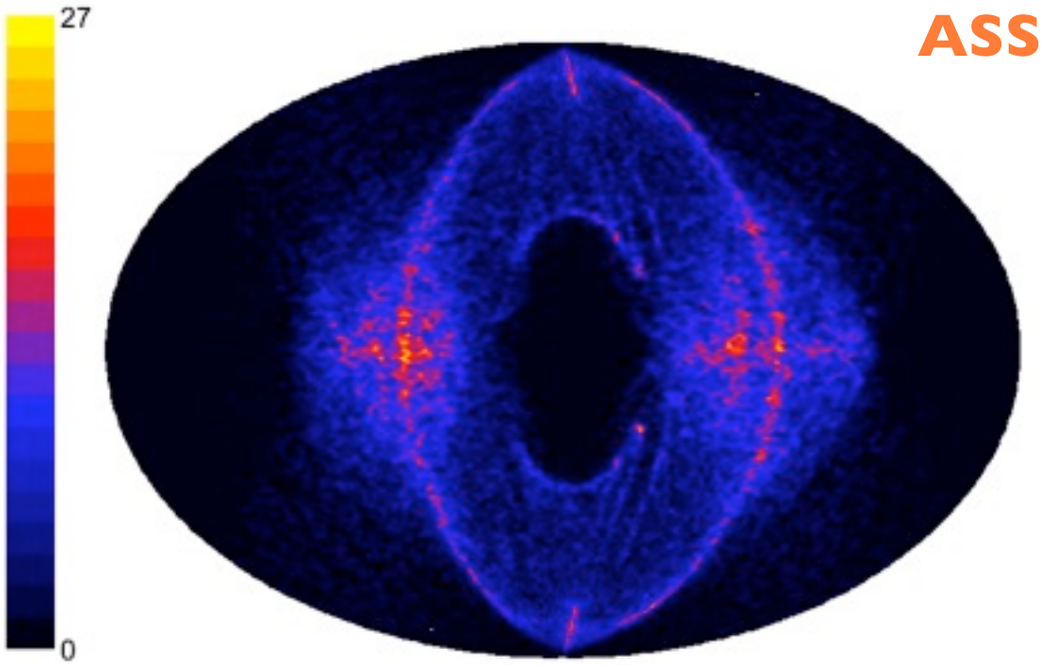
$r_0$=10,55 kpc

$r_1$=2 kpc

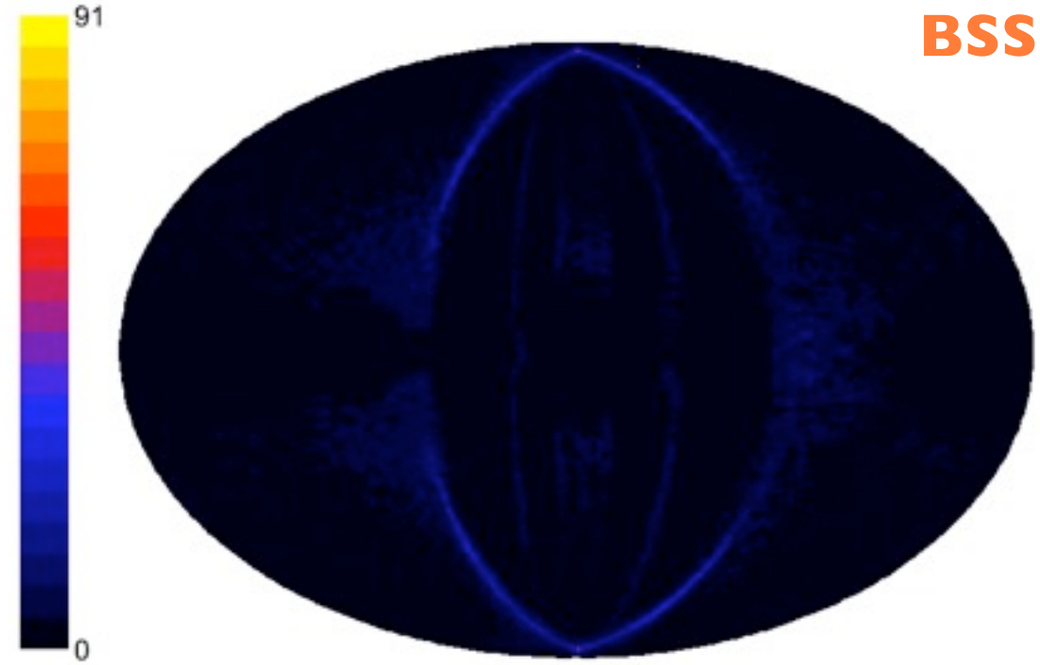
R=8,5 kpc

- modelo semelhante ao de Stanev
- evita descontinuidades no campo e suas derivadas

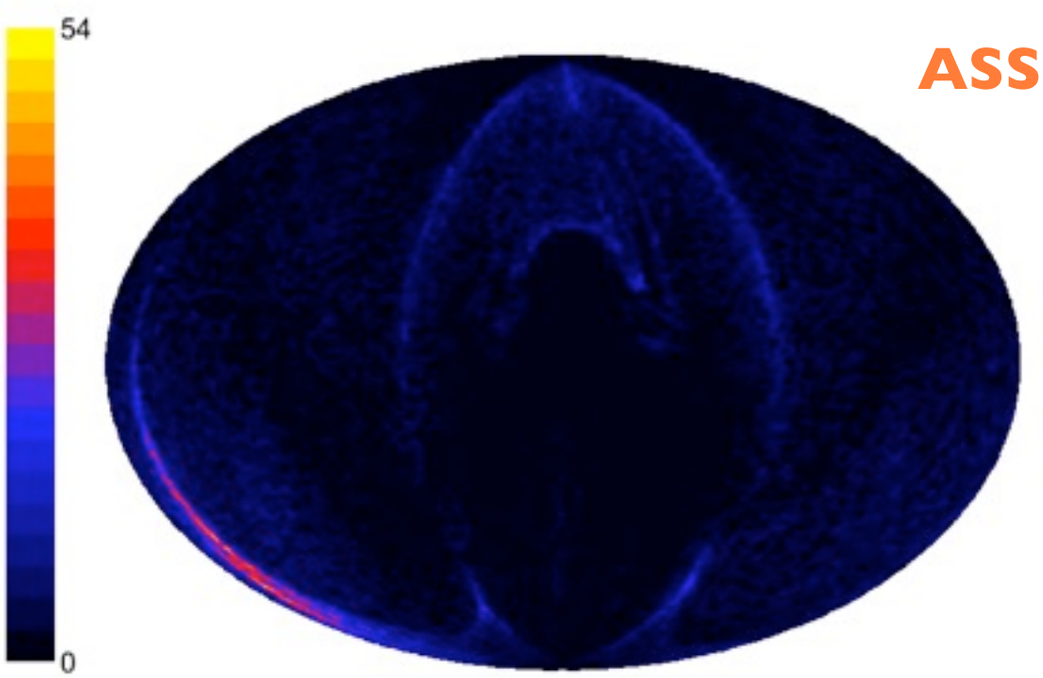
# modelo de Harari, Mollerach e Roulet



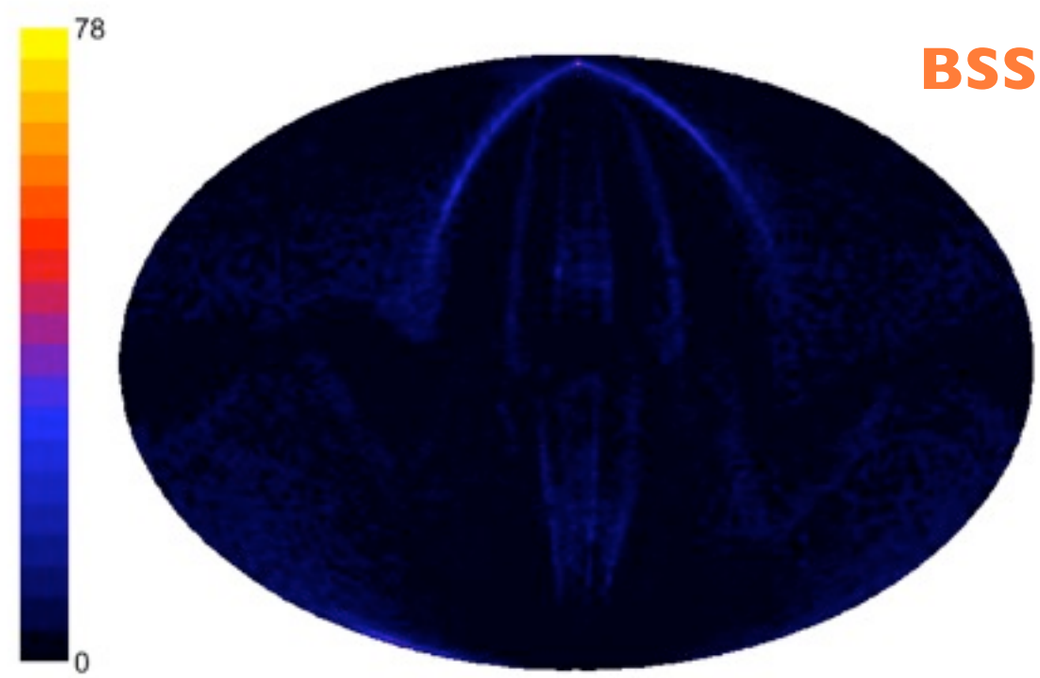

ASS-A




BSS-A




ASS-S




BSS-S

# modelo de Sun, Reich, Waelkens e Enβlin

**BSS**

$$B(r,\theta) = B_0 \cos\left(\theta + \frac{1}{\tan p} \ln \frac{r}{r_0}\right)$$

**ASS+RING**

$$B(r,\theta) = \begin{cases} B_0 \Xi(r) \exp\left(-\frac{r-R_0}{R_0}\right) & r > R_c \\ B_0 \; r \leq R_c \end{cases}$$

**componente radial**

$$\Xi(r) = \begin{cases} +1 & \mathrm{r} > 7,5 \text{ kpc}; \; 5 < \mathrm{r} \leq 6 \text{ kpc} \\ -1 & \mathrm{r} \leq 5 \text{ kpc}; \; 6 < \mathrm{r} \leq 7,5 \text{ kpc} \end{cases}$$

**campo no halo**

$$|B(r,\theta,z)| = |B(r,\theta)| \exp\left(-\frac{|z|}{z_0}\right)$$

**parâmetros**

$z_0$=1 kpc

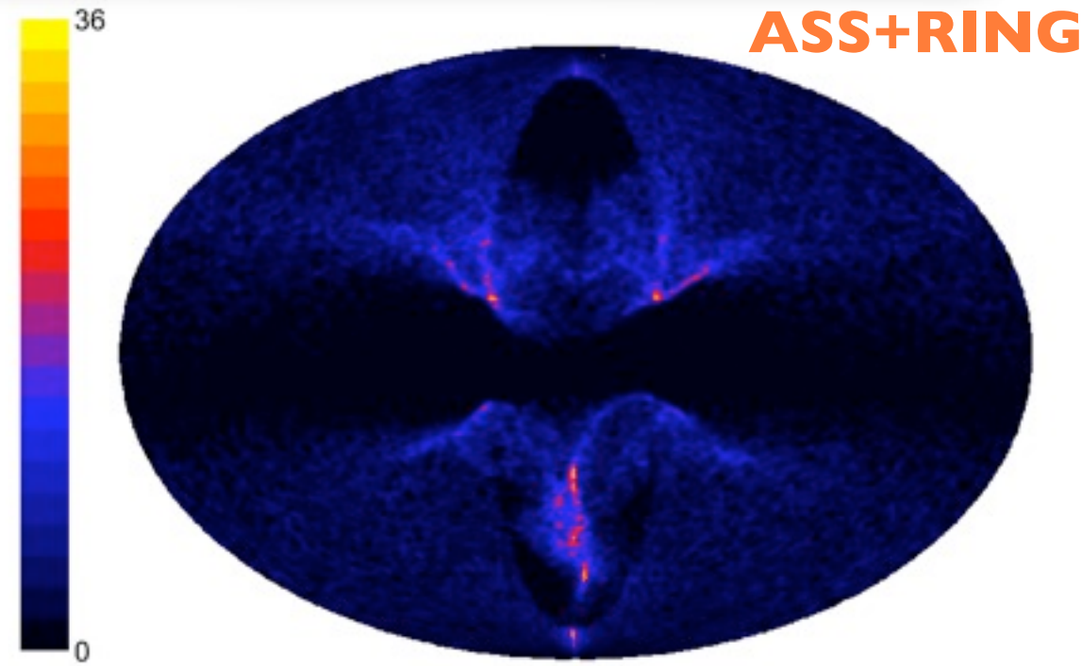
$B_0$=2 μG $R_0$= 9 kpc r<6

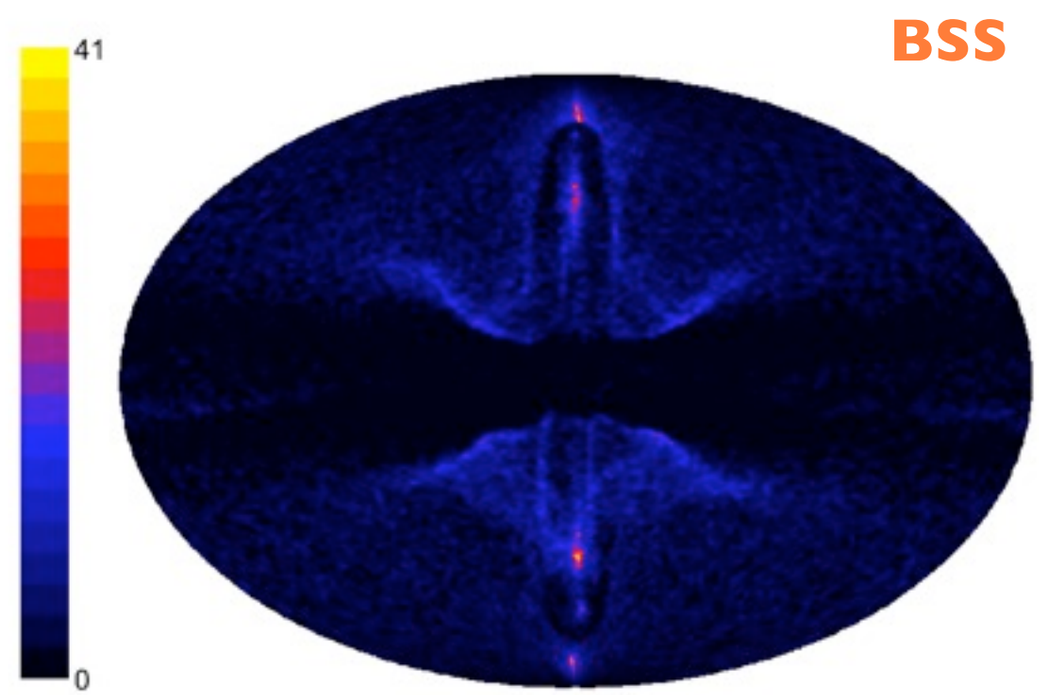
$R_0$= 6 kpc r>6

R=8,5 kpc

p=-10° se r<6

p=-15° p/ r>6



# simulações realizadas

## fontes I

- l=-180°, -165°,..., 0°,15°,..., 180°
- b=-10°, 0°, 10°

## fontes II

- l=-180°,-135°,..., 0°,45°,..., 180°
- b=-90°, -45°, 0°,45°,90°

## campos

- Stanev (ASS-A, BSS-S)
- HMR (ASS-A, ASS-S, BSS-A, BSS-S)
- SRWE (BSS, ASS+RING)

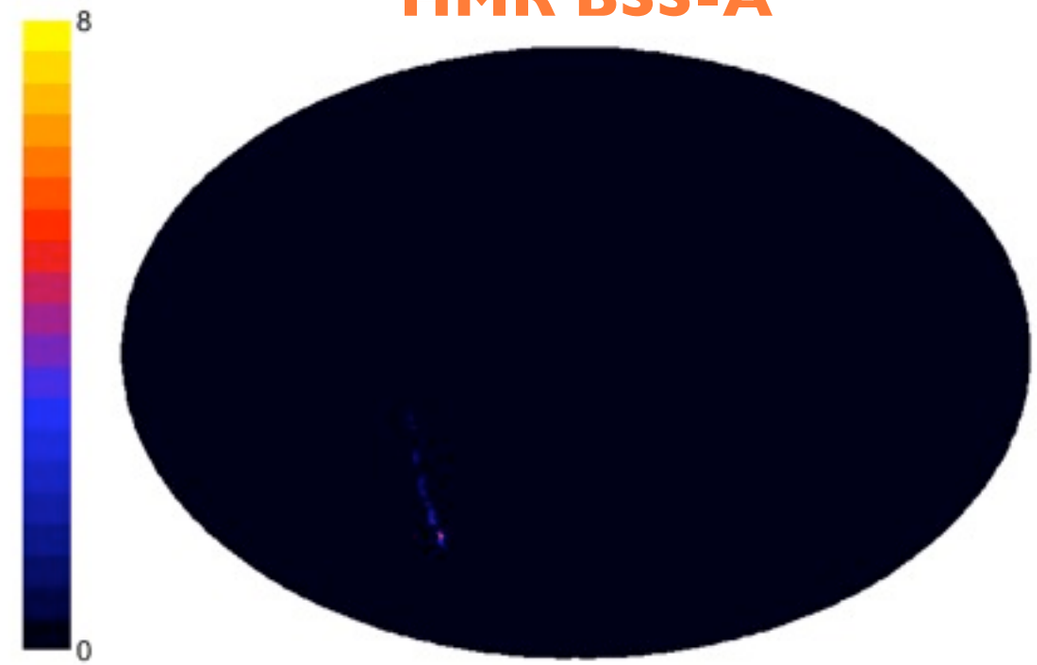
## informações eventos

- foram simulados 50 eventos
- utilizou-se o CRT
- as fontes foram simuladas a partir da Terra até uma distância de 20 kpc (backtracking)
- o índice espectral das fontes simuladas foi fixado em -2,7
- os eventos têm energia entre 20 e 200 EeV

# simulações ilustrativas

**Stanev ASS-A**

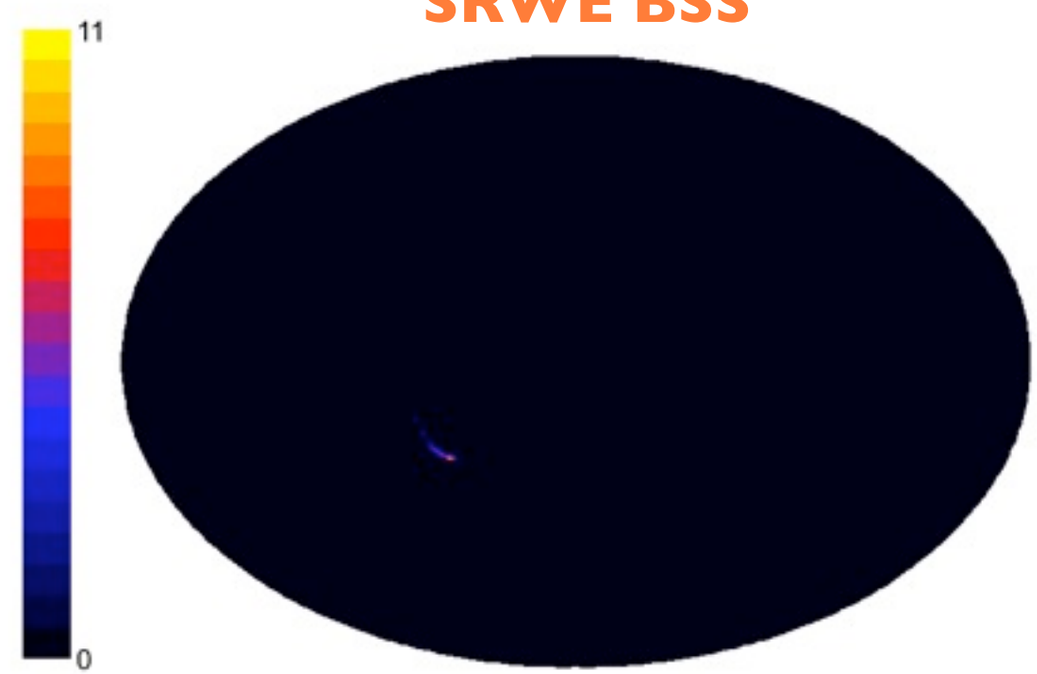
**HMR BSS-A**




fonte: (l,b)=(-60˚,-10˚)

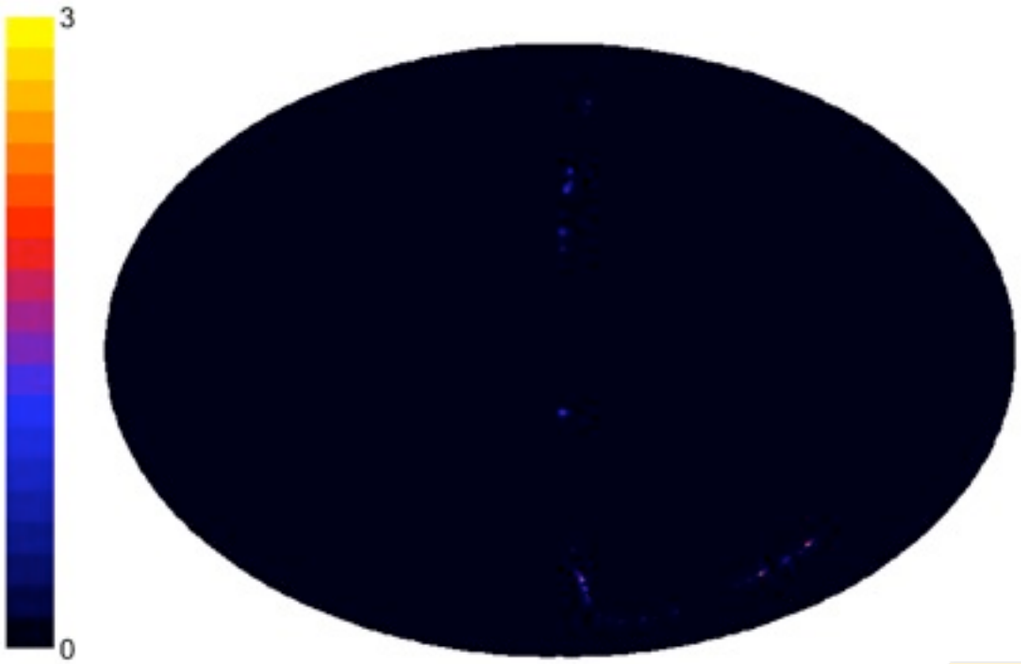
**Stanev BSS-S**

**SRWE BSS**

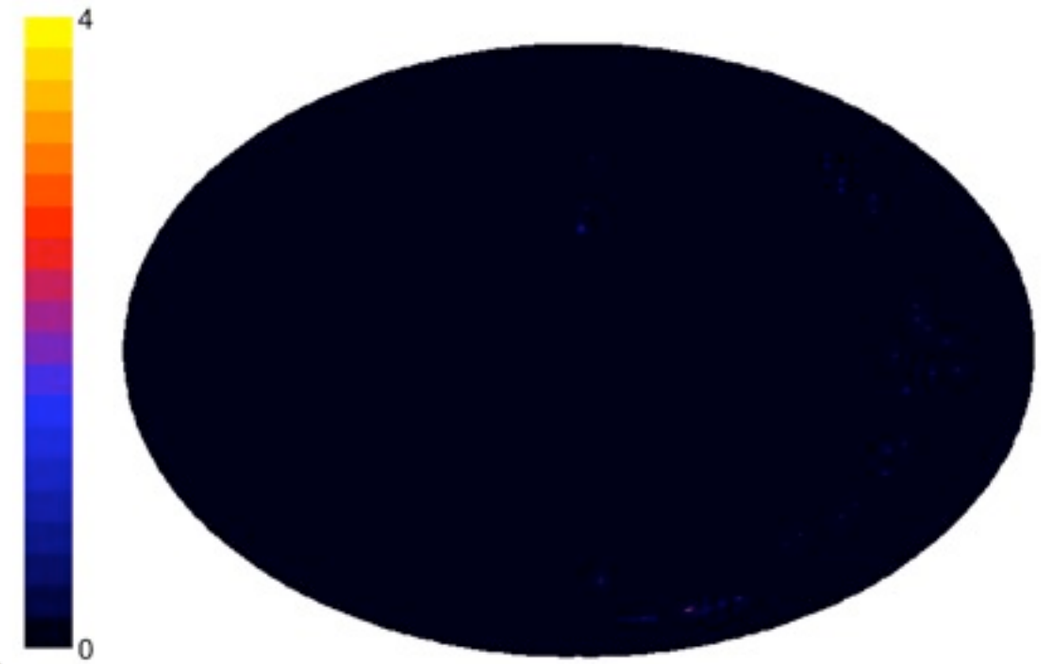


# simulações ilustrativas

**Stanev ASS-A**

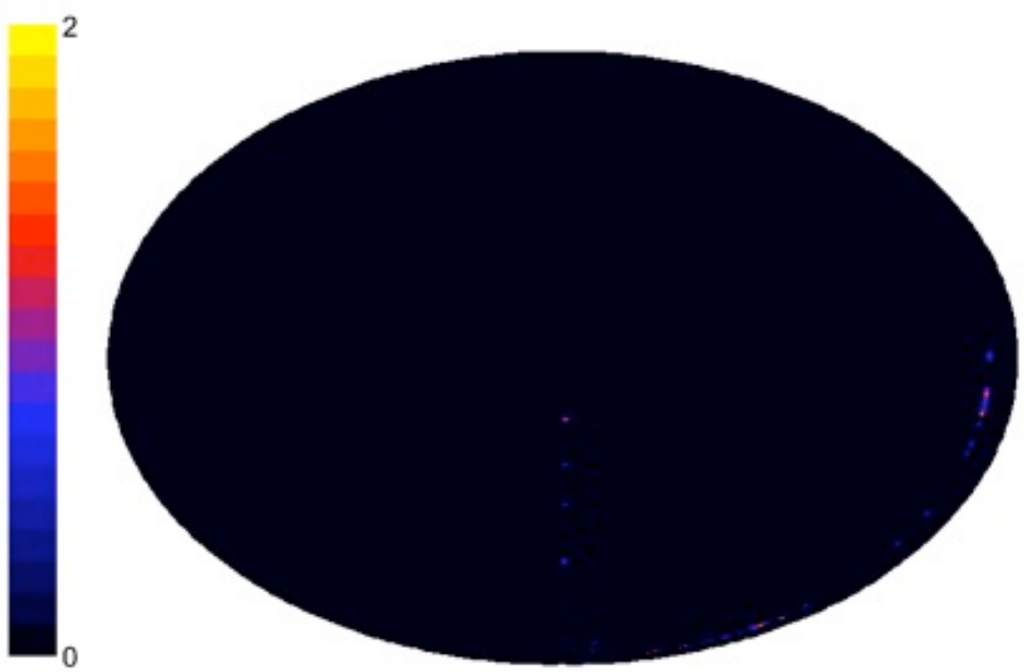



**HMR ASS-A**

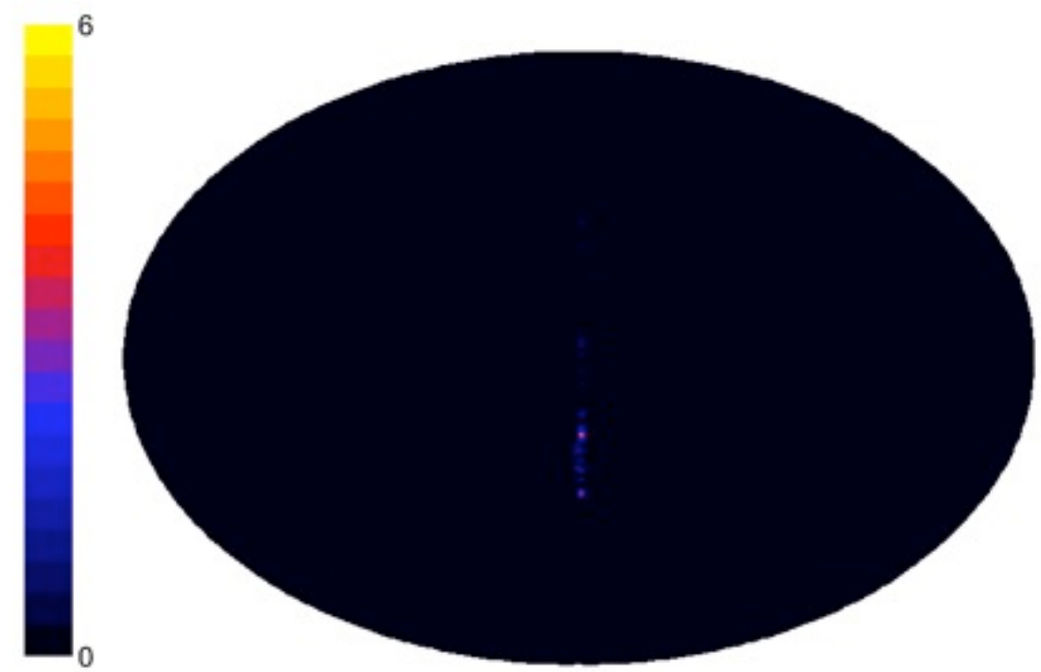



fonte: (l,b)=(0˚,-10˚)

**HMR ASS-S**

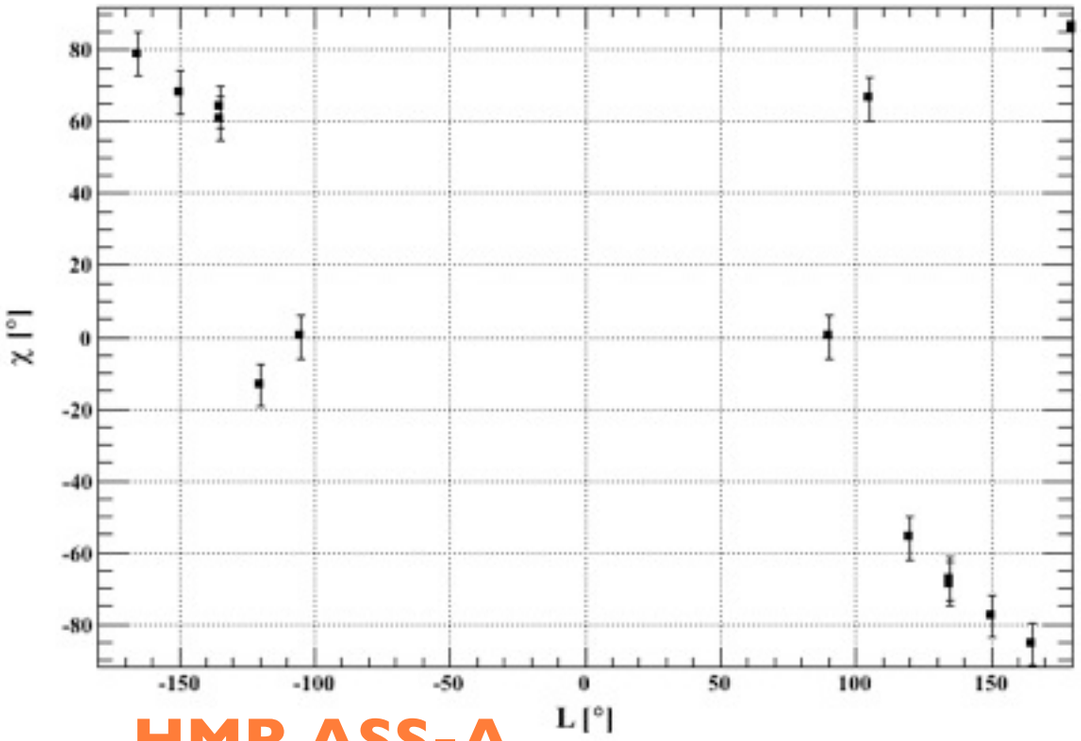



**SRWE BSS**

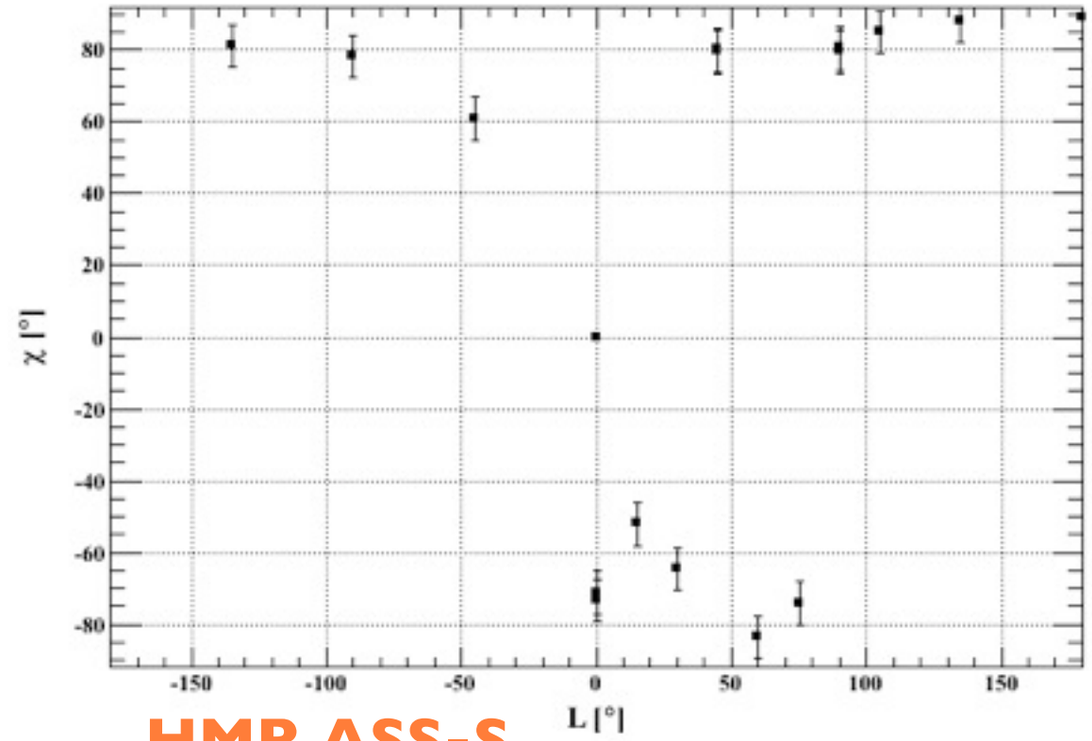


# orientações dos multipletos (b=0°)

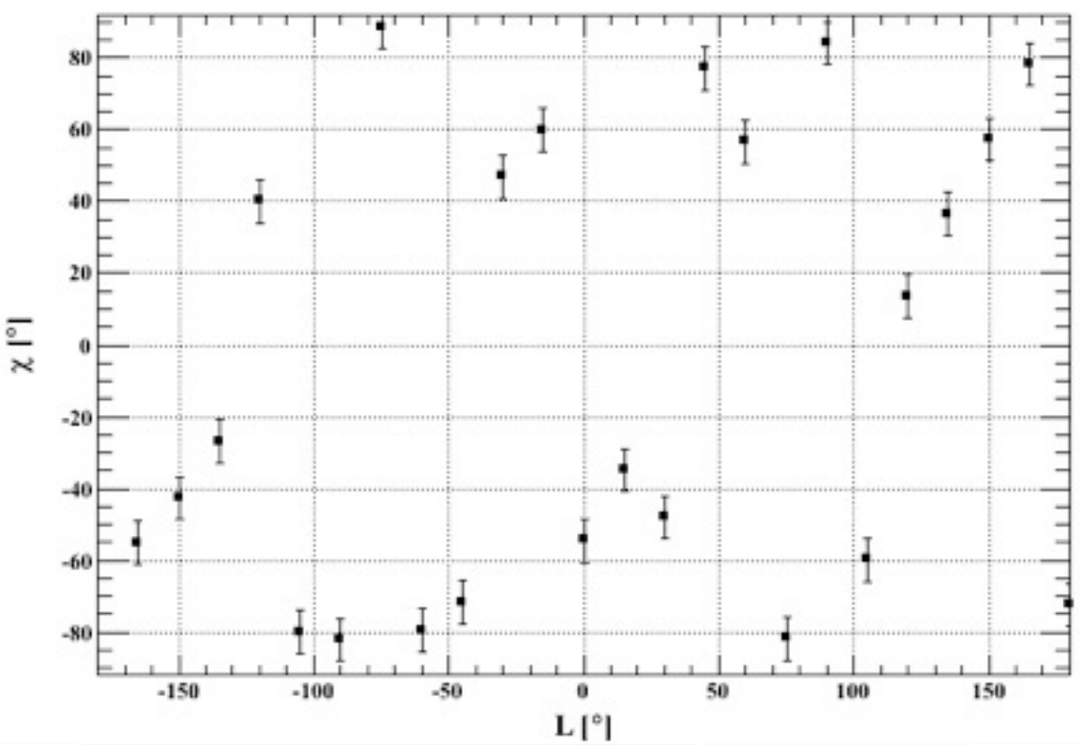
## Stanev ASS-A



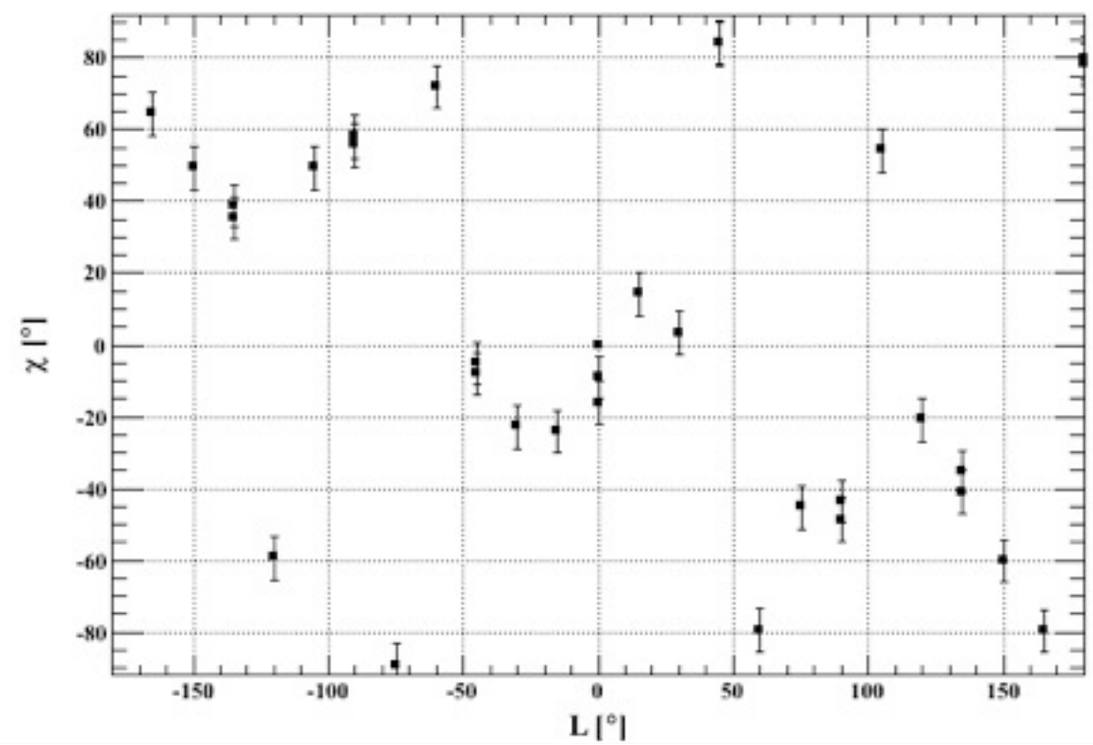

## Stanev BSS-S




## HMR ASS-A

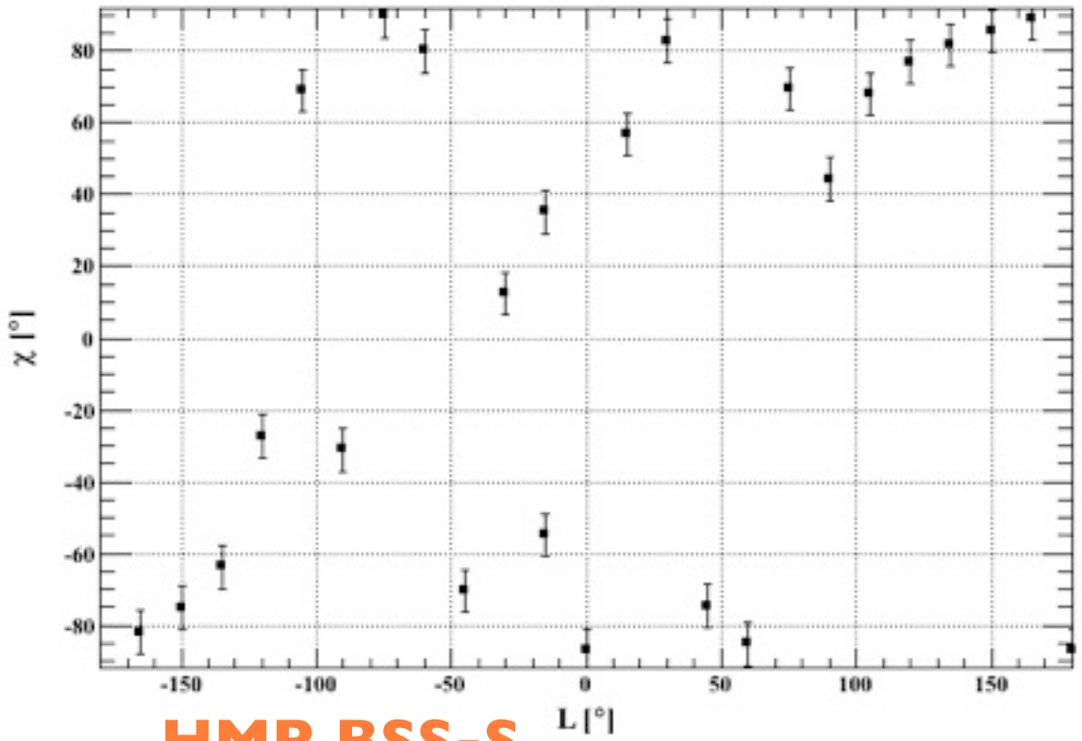



## HMR ASS-S

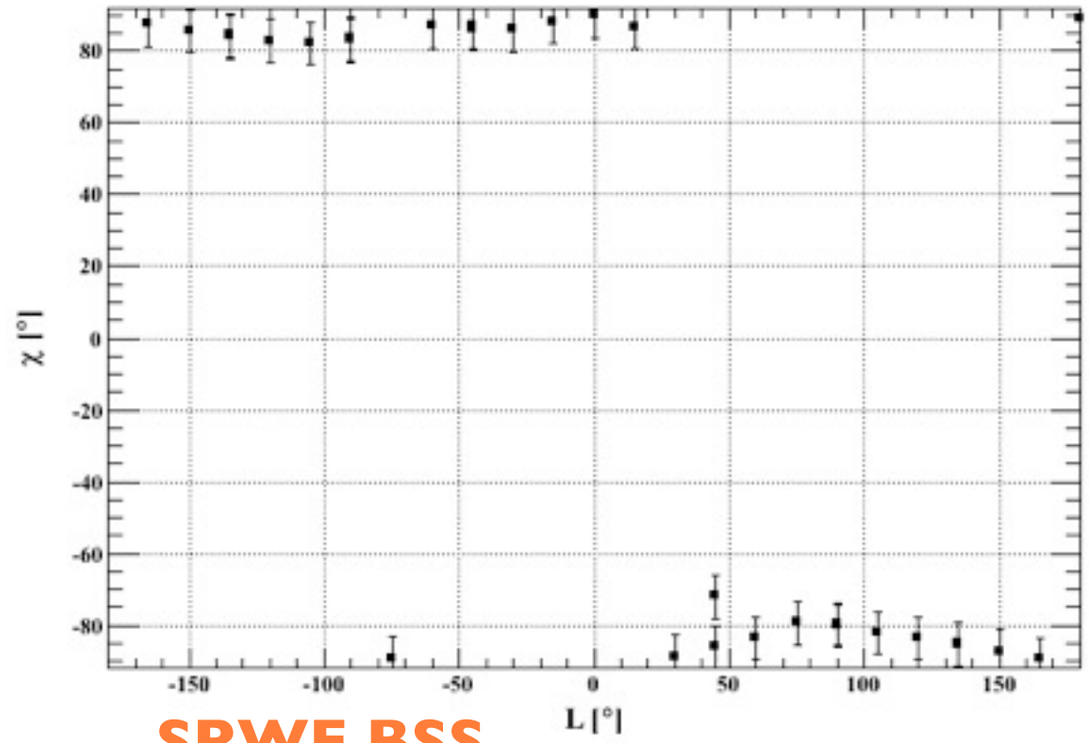


# orientações dos multipletos (b=0°)

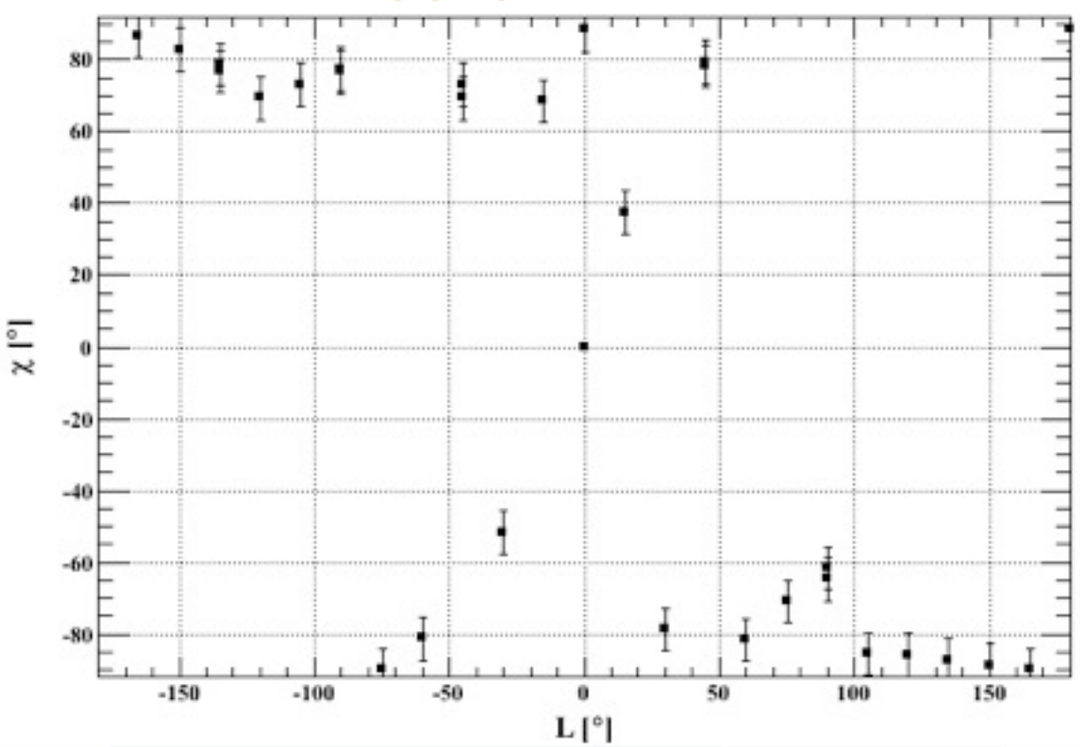
## HMR BSS-A



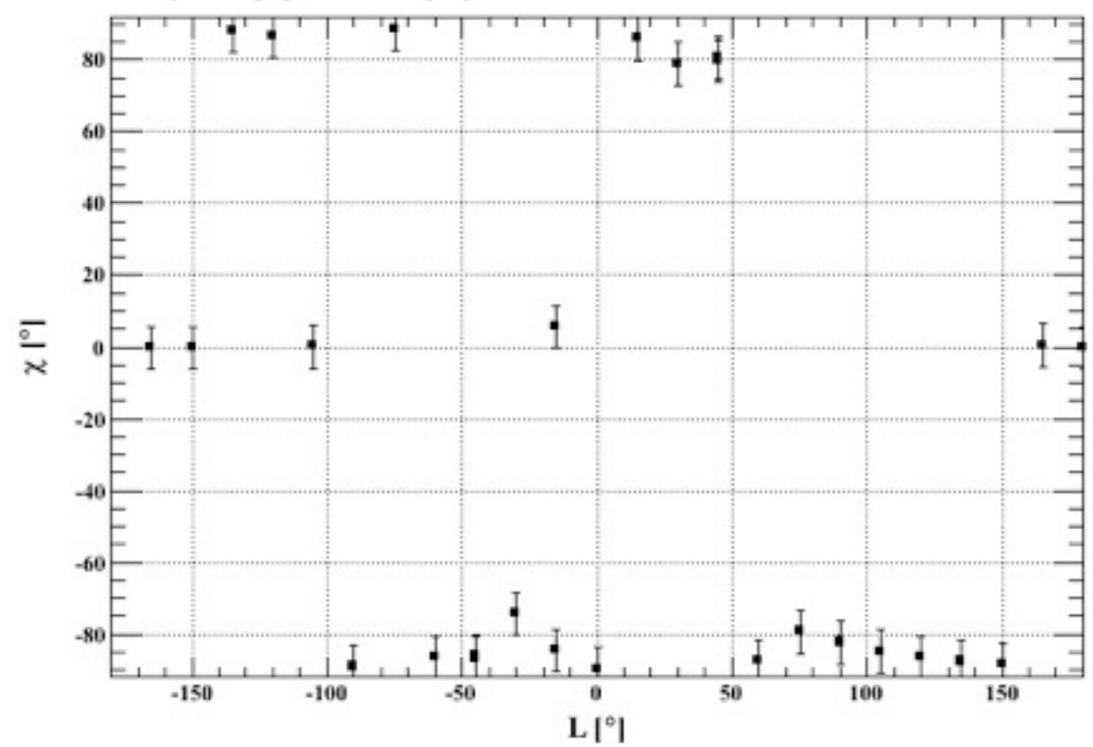

## SRWE ASS+RING



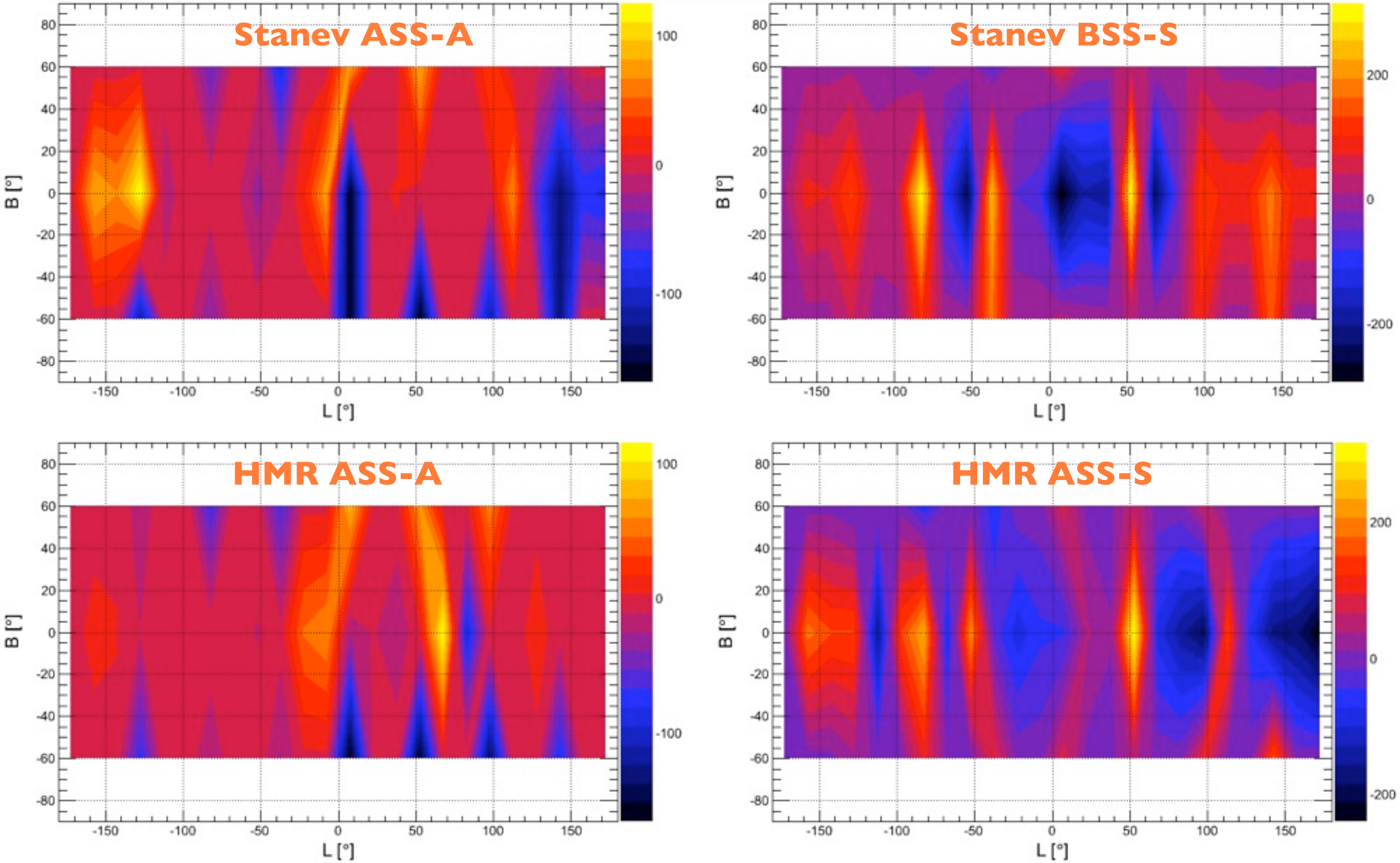

## HMR BSS-S



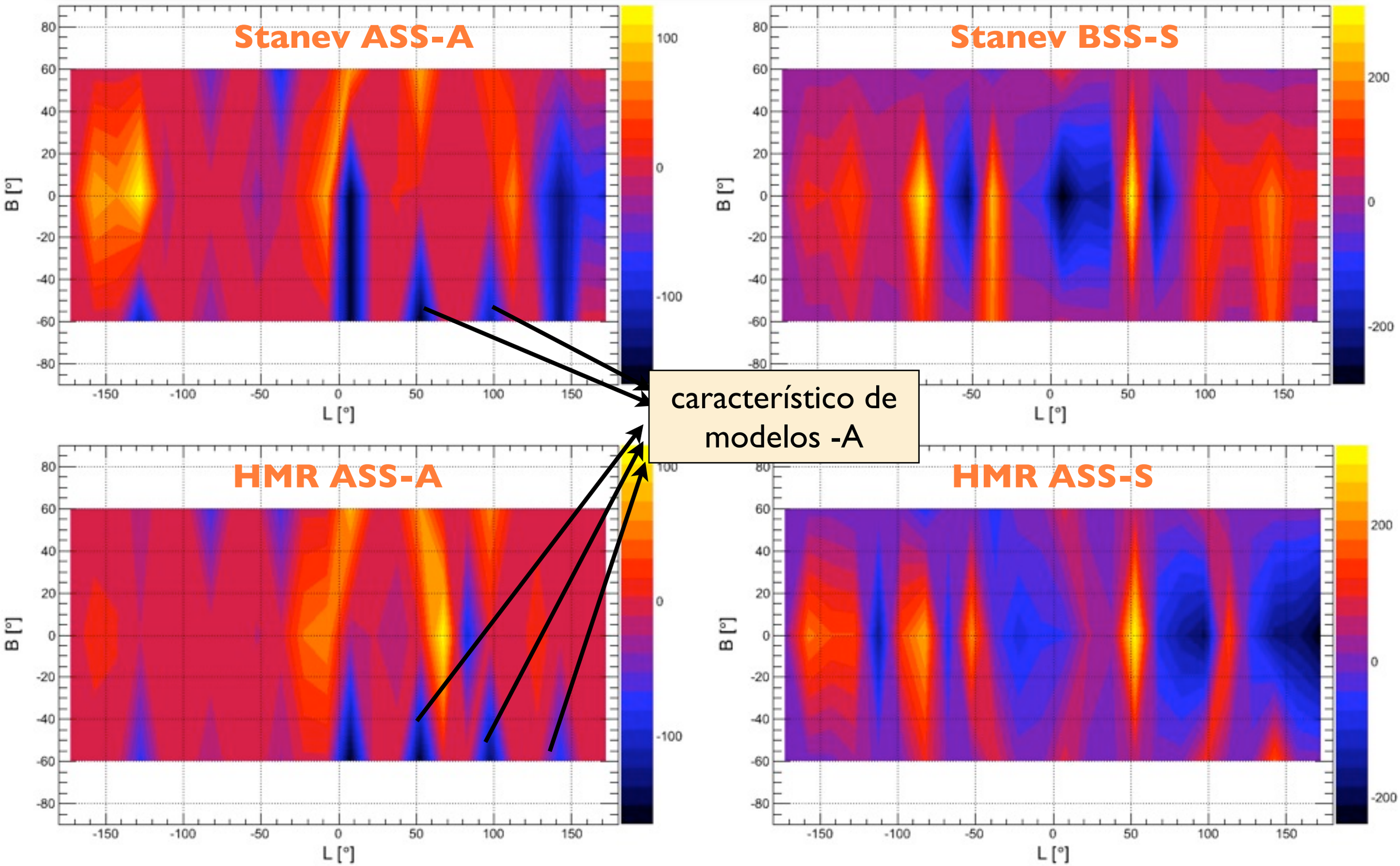

## SRWE BSS



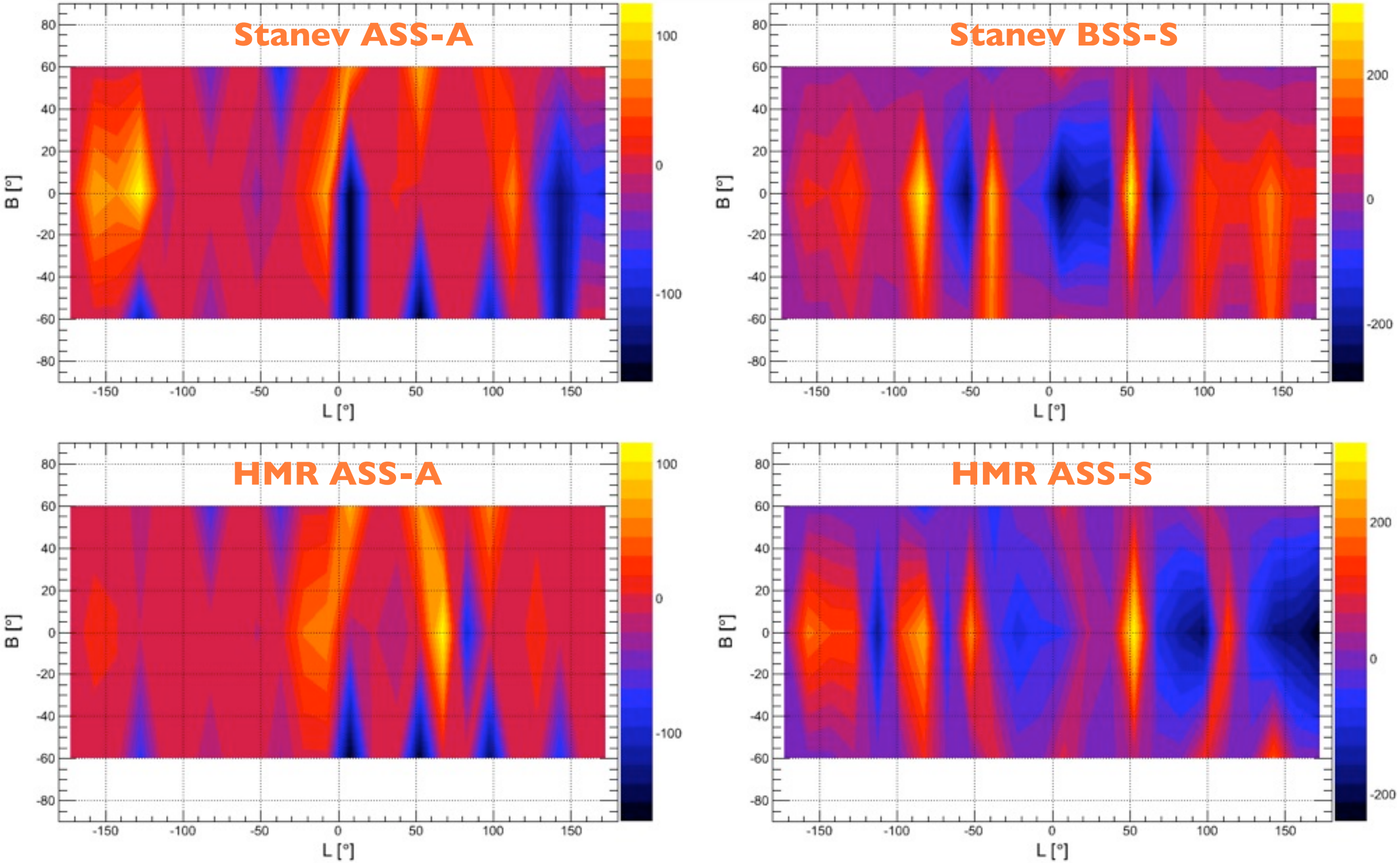
# orientações dos multipletos - compilação



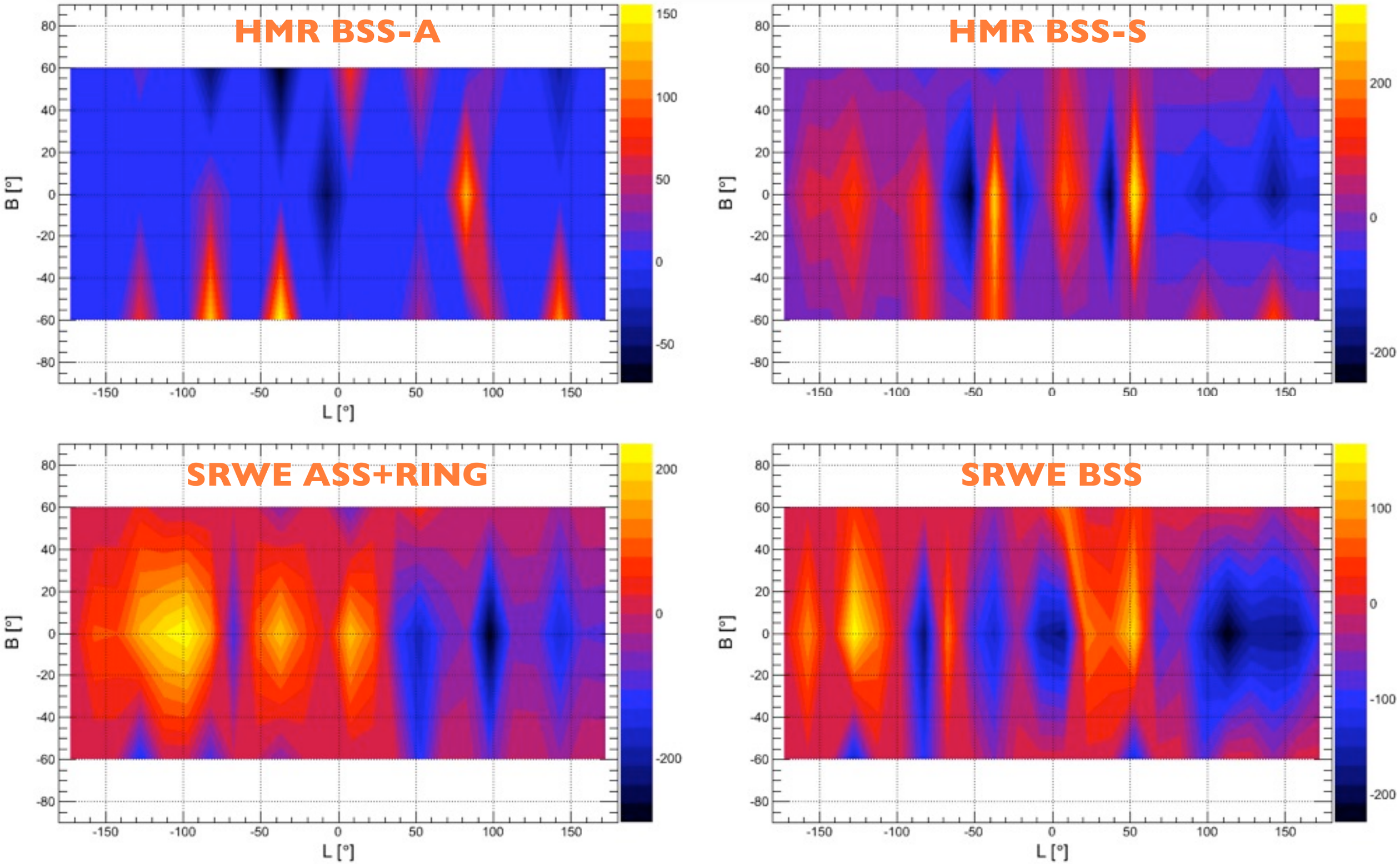
# orientações dos multipletos - compilação



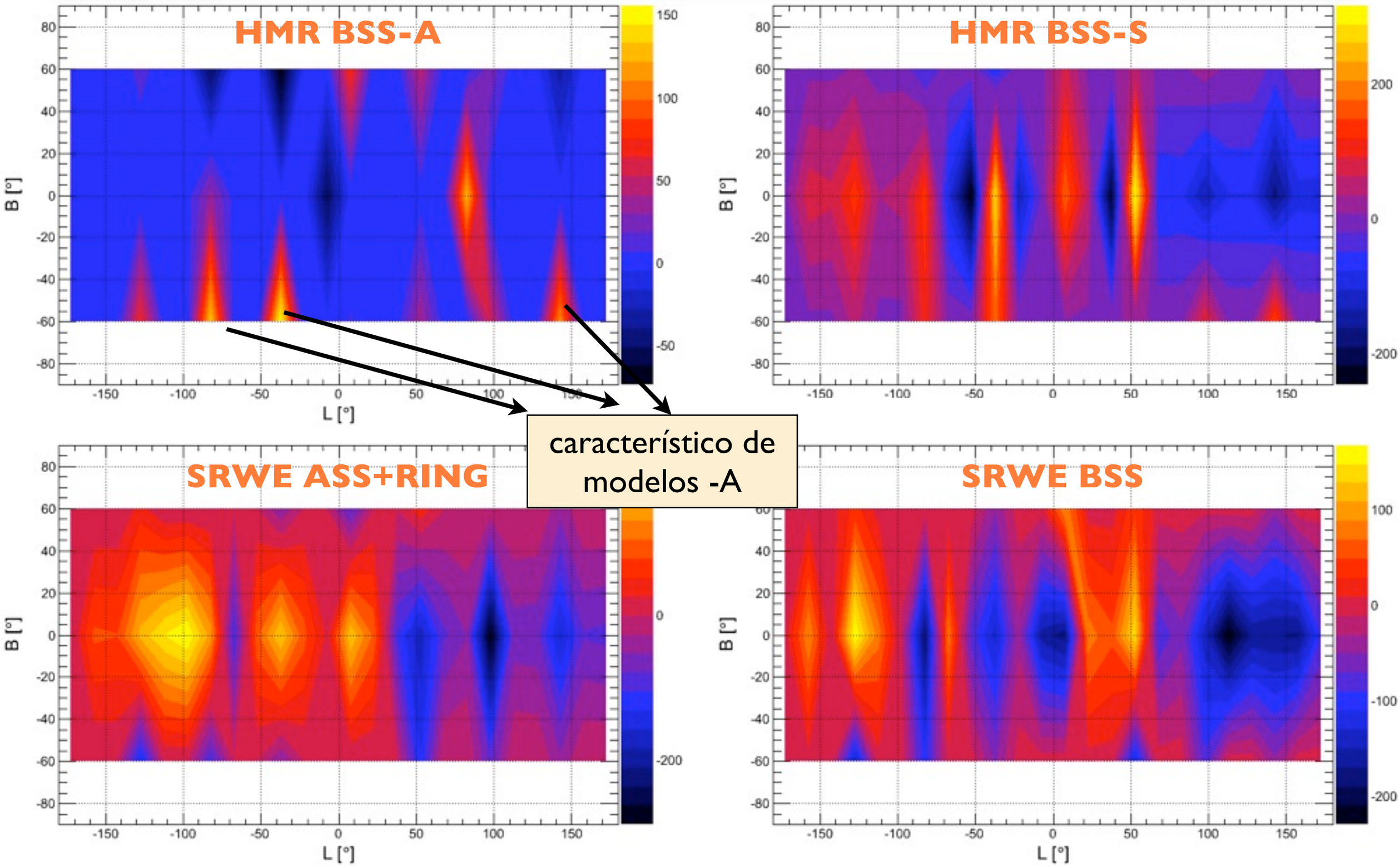
# orientações dos multipletos - compilação



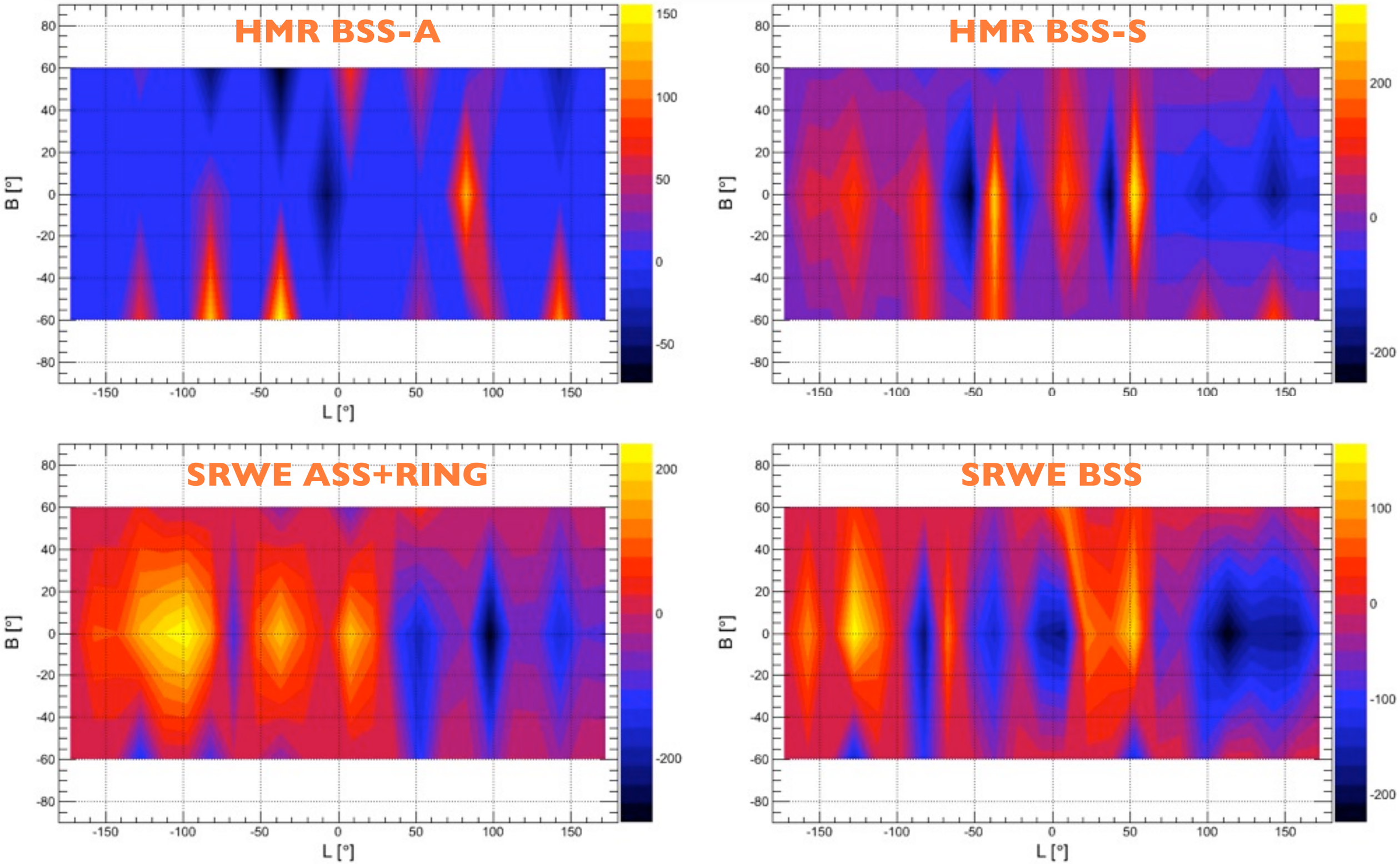
# orientações dos multipletos - compilação



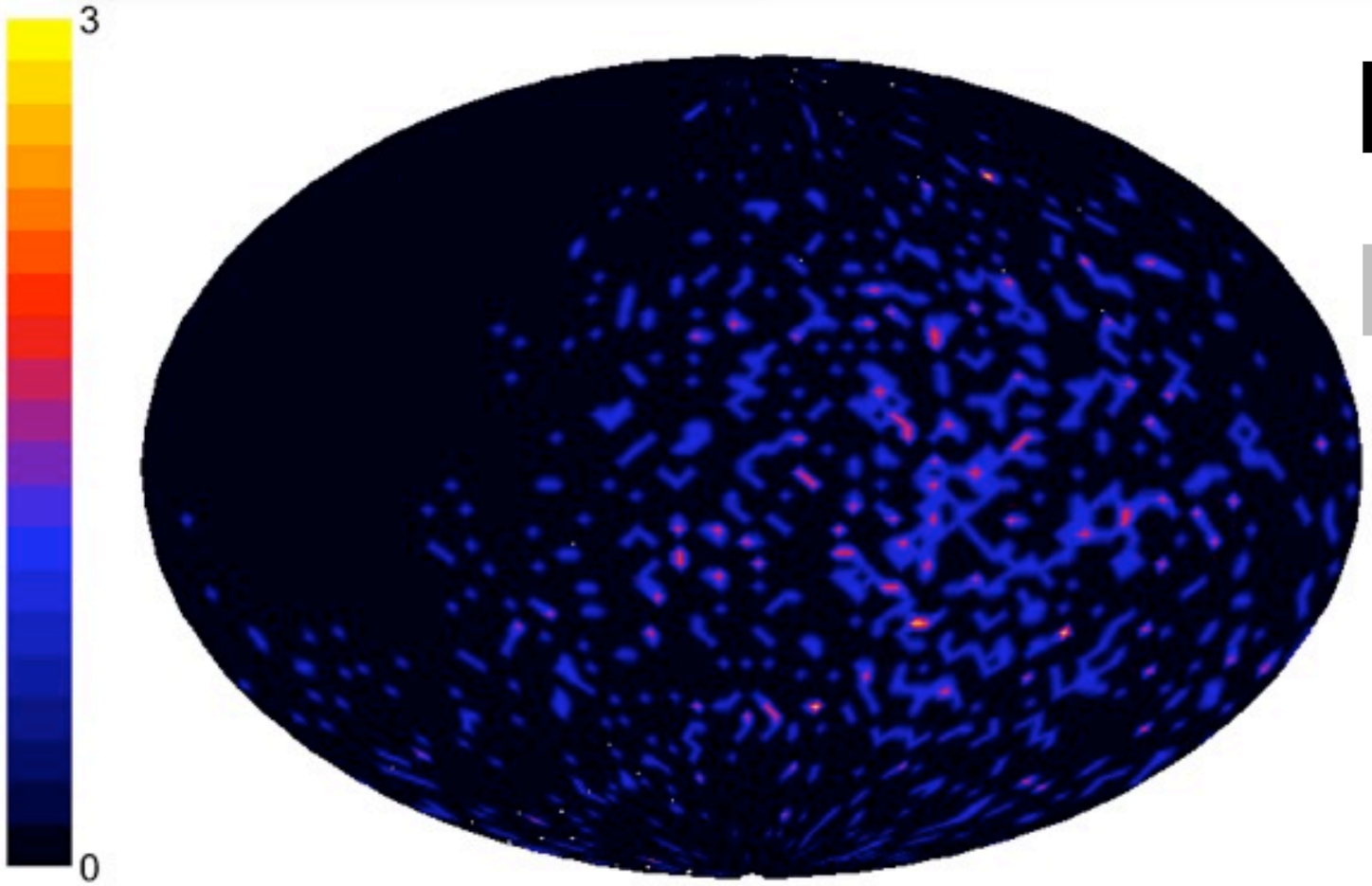
# orientações dos multipletos - compilação



# orientações dos multipletos - compilação



# aplicação a dados do Auger




| n-pleto | correlação | orientação | posição |
|---|---|---|---|
| 6 | 0,85 | 8,2° | (114,6°,9,1°) |
| 7 | 0,87 | 12,9° | (124,3°,-81,6°) |

**cortes aplicados**

- período: jan/2004 a 12/2011
- energia E>20 EeV
- tamanho das tiras: 12°x1,5°
- j=1, N=80
- |C|>0,85

**comparação com simulações**

- nos setores próximos às posições encontradas, a orientação dos multipletos em todos os modelos é negativa
- dos modelos considerados, nenhum é capaz de explicar os resultados
- os resultados obtidos excluem modelos -A (orientações positivas acima e abaixo do disco, para a mesma faixa de longitude)

# conclusões

✦ foi desenvolvido um novo método para a identificação de estruturas em mapas de uhecrs

✦ o método baseia-se na transformada de wavelets na esfera e é capaz de identificar multipletos de uhecrs

✦ a orientação destes multipletos pode trazer informações sobre o modelo que melhor descreve o campo magnético galáctico

✦ foi realizada uma setorização do céu através da simulação de fontes de uhecrs em diferentes posições

✦ foi obtida orientação do multipleto simulado para cada fonte e modelo

✦ para as fontes simuladas foi possível observar uma relação entre a orientação do multipleto e sua localização no céu

✦ é possível observar claramente a distinção entre modelos -S e -A quanto à orientação dos multipletos formados

✦ foram encontrados dois candidatos a multipletos nos dados do Auger

✦ se os multipletos encontrados fosseem genuínos, isto excluiria modelos -A, pois não haveria mudança na orientação do multipleto acima e abaixo do plano galáctico

# perspectivas

# perspectivas

**para a tese...**

✦cálculo da probabilidade de um multipleto surgir ao acaso

✦ aplicação a dados do Auger em diferentes faixas de energia

# perspectivas

**para a tese...**

✦cálculo da probabilidade de um multipleto surgir ao acaso

✦ aplicação a dados do Auger em diferentes faixas de energia

**para a publicação...**

✦ aumentar estatística de eventos e número de setores

✦ criar subsetores dentro dos setores

# perspectivas

## para a tese...

✦cálculo da probabilidade de um multipleto surgir ao acaso

✦ aplicação a dados do Auger em diferentes faixas de energia

## para a publicação...

✦ aumentar estatística de eventos e número de setores

✦ criar subsetores dentro dos setores

## num futuro não muito distante...

✦ adaptar a ferramenta  para identificar estruturas não-lineares

✦ busca de lentes magnéticas em uhecrs para restrição de modelos de campo magnético

# Referências Bibliográficas


J. P. Vallée. Magnetic field reversals in the Milky Way- ”cherchez le champ magnetique”. Astronomy and Astrophysics, 308:433–440, April 1996.

R. Beck et al. Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives. Annual Review on Astronomy and Astrophysics, 34:155–206, 1996.

J. Han. Magnetic Fields in Our Galaxy: How much do we know? III. Progress in the Last Decade. Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics Supplement, 6(2):020000–217, December 2006.

L. A. Anchordoqui D. F. Torres. Astrophysical origins of ultrahigh energy cosmic rays. Reports on Progress in Physics, 67:1663–1730, September 2004.

J. Cronin. The highest-energy cosmic rays. Nuclear Physics B, 138:465.

T. Stanev. Ultra–High-Energy Cosmic Rays and the Large-Scale Structure of the Galactic Magnetic Field. The Astrophysical Journal, 479:290–+, April 1997.

X. H Sun et al. Radio observational constraints on Galactic 3D-emission models. Astronomy and Astrophysics, 477:573–592, January 2008.

E. Roulet D. Harari, S. Mollerach. The toes of the ultra high energy cosmic ray spectrum. Journal of High Energy Physics, 8:22–+, August 1999.

# Agradecimentos


- Marcelo Zimbres: ajuda com a transformada de wavelets na esfera
- Cluster de processamento IFSC/USP