



UNICAMP

defesa de dissertação 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

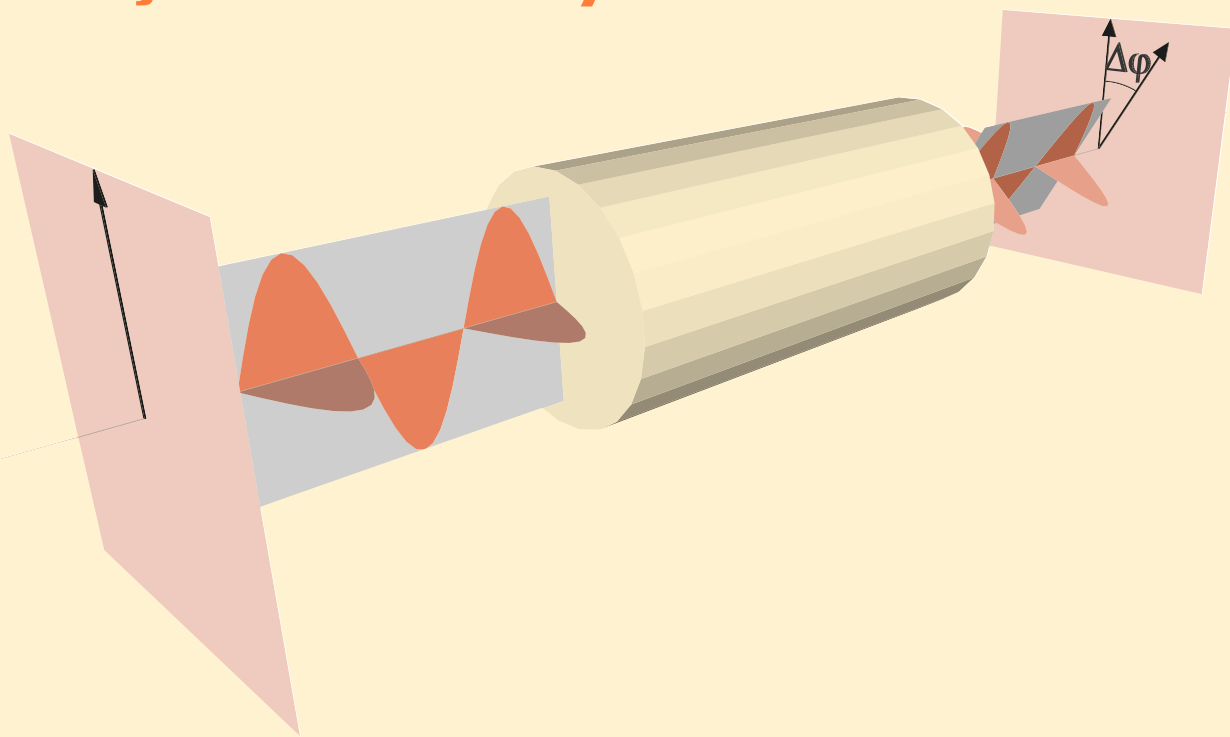
- ♦ **intensidade** e **estrutura** dos campos no meio intergaláctico e interestelar
- ♦ relação com a **distribuição de gás**

como estudar campos magnéticos cósmicos?

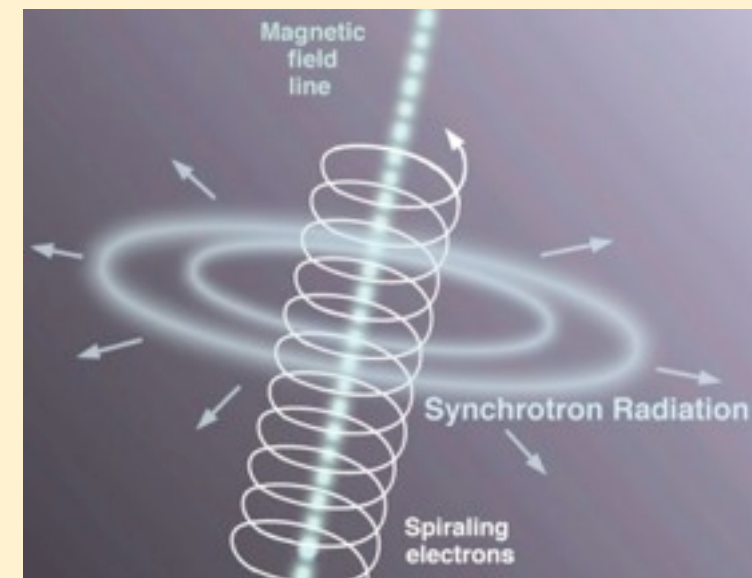
polarização da luz estelar

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

rotação de Faraday



polarização da luz síncrotron



efeito Zeeman

- ♦ desdobramento das linhas espectrais

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

raios cósmicos e campos magnéticos

raios cósmicos

- ♦ defletem em campos magnéticos cósmicos dependendo de sua energia e composição
- ♦ raios cósmicos ultra-energéticos (uhecrs) $\rightarrow$ raio de Larmor $>$ comprimento de coerência
- ♦ propagação $\rightarrow$ depende dos campos interventores

campos magnéticos cósmicos

- ♦ pouco compreendidos devido a dificuldades de medição
- ♦ determinam a propagação dos raios cósmicos

raios cósmicos e campos magnéticos

raios cósmicos

- ♦ defletem em campos magnéticos cósmicos dependendo de sua energia e composição
- ♦ raios cósmicos ultra-energéticos (uhecrs) $\rightarrow$ raio de Larmor $>$ comprimento de coerência
- ♦ propagação $\rightarrow$ depende dos campos interventores

propagação



campos magnéticos cósmicos

- ♦ pouco compreendidos devido a dificuldades de medição
- ♦ determinam a propagação dos raios cósmicos

raios cósmicos e campos magnéticos

raios cósmicos

- ♦ defletem em campos magnéticos cósmicos dependendo de sua energia e composição
- ♦ raios cósmicos ultra-energéticos (uhecrs) $\rightarrow$ raio de Larmor $>$ comprimento de coerência
- ♦ propagação $\rightarrow$ depende dos campos interventores

propagação



deflexão



campos magnéticos cósmicos

- ♦ pouco compreendidos devido a dificuldades de medição
- ♦ determinam a propagação dos raios cósmicos

raios cósmicos e campos magnéticos

raios cósmicos

- ♦ defletem em campos magnéticos cósmicos dependendo de sua energia e composição
- ♦ raios cósmicos ultra-energéticos (uhecrs) $\rightarrow$ raio de Larmor $>$ comprimento de coerência
- ♦ propagação $\rightarrow$ depende dos campos interventores

propagação



deflexão



campos magnéticos cósmicos

- ♦ pouco compreendidos devido a dificuldades de medição
- ♦ determinam a propagação dos raios cósmicos

o campo magnético galáctico

a Via Láctea

- ♦ galáxia espiral barrada
- ♦ raio aproximado: 15 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

modelos para a componente regular

- ♦ Stanev
- ♦ Harari, Mollerach e Roulet (HMR)
- ♦ Tinyakov e Tkachev (TT)
- ♦ Prouza e Šmída (PS)
- ♦ Kalcherieß, Serpico e Teshima (KST)
- ♦ Sun, Reich, Waelkens e Enßlin (SRWE)
- ♦ outros

forma do campo

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

o campo magnético galáctico

- ♦ disco → espiral logarítmica

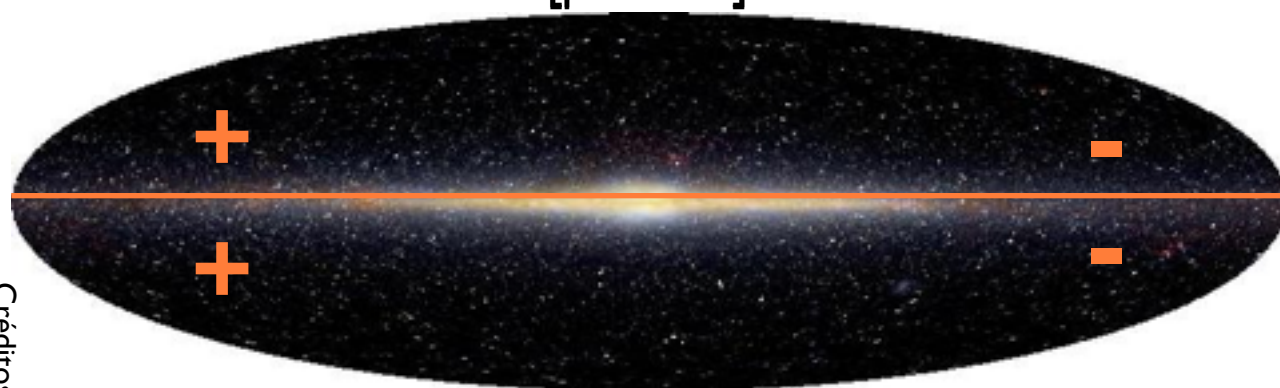
$$R_{\text{espiral}} = R_0 \exp(\theta \tan p)$$

- ♦ este campo pode ser escrito como

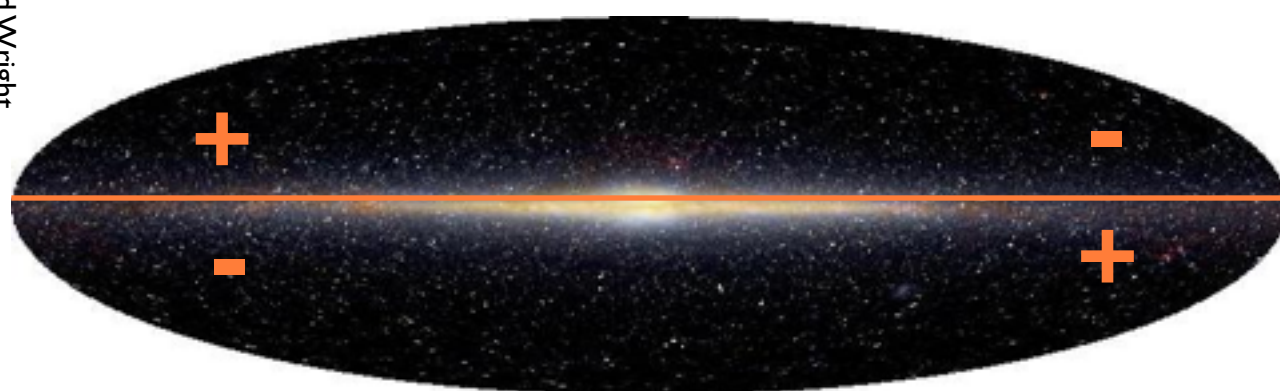
$$\vec{B}(r, \theta) = B(r, \theta) (\hat{\theta} \cos p + \hat{r} \sin p)$$

onde $B(r, \theta)$ depende do modelo adotado.

Symmetric (-S)
[par em z]

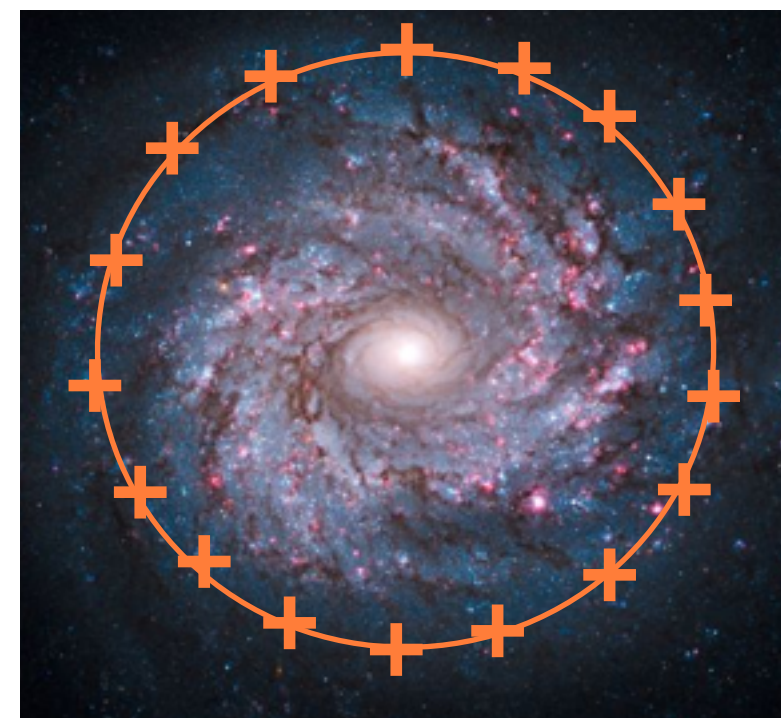


Antisymmetric (-A)
[ímpar em z]



Créditos: COBE - Ned Wright

ASS (Axisymmetric Spiral)
par em θ

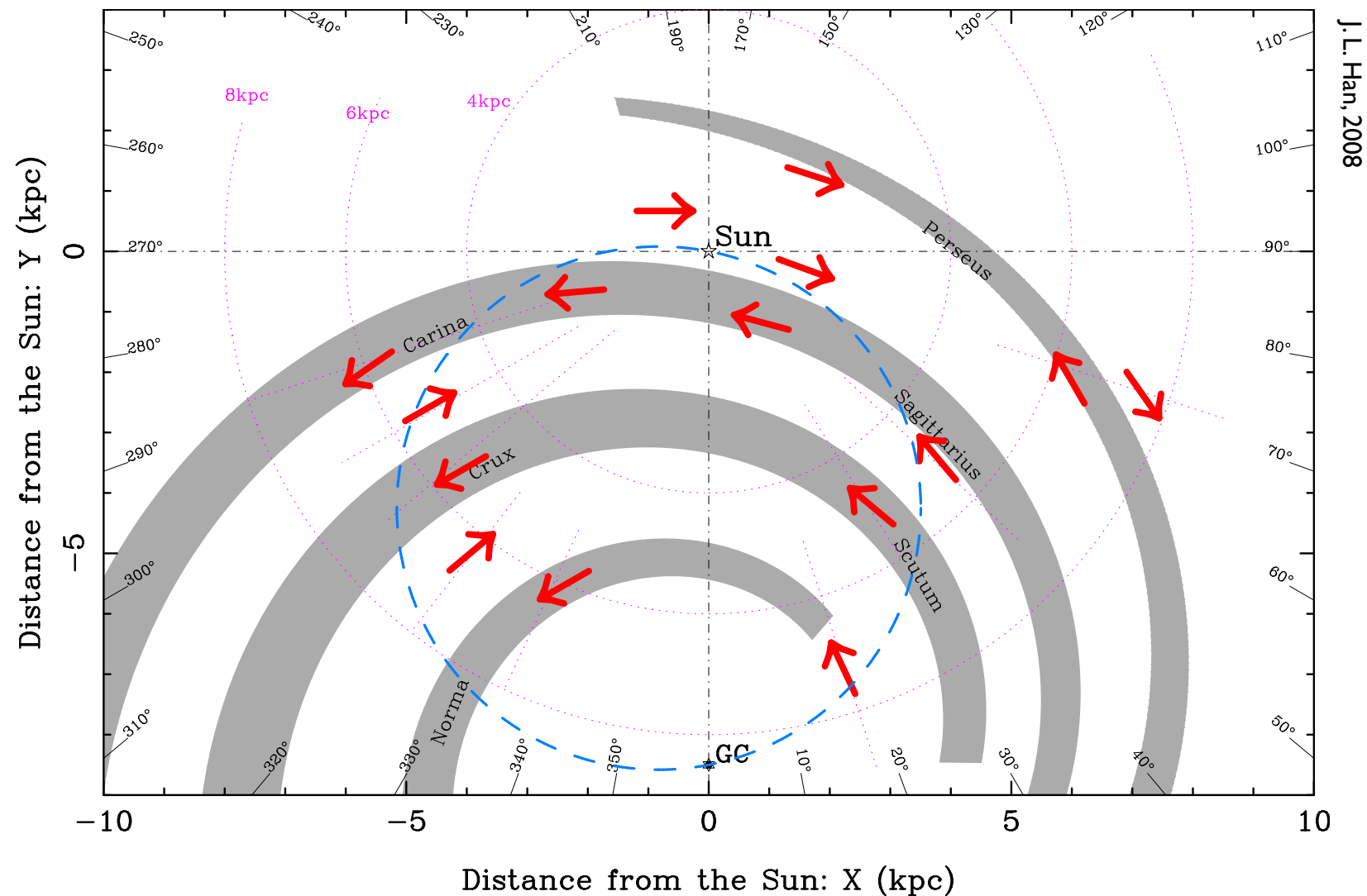


Créditos: NASA/ESA

BSS (Bisymmetric Spiral)
ímpar em θ



reversões do campo



panorama geral

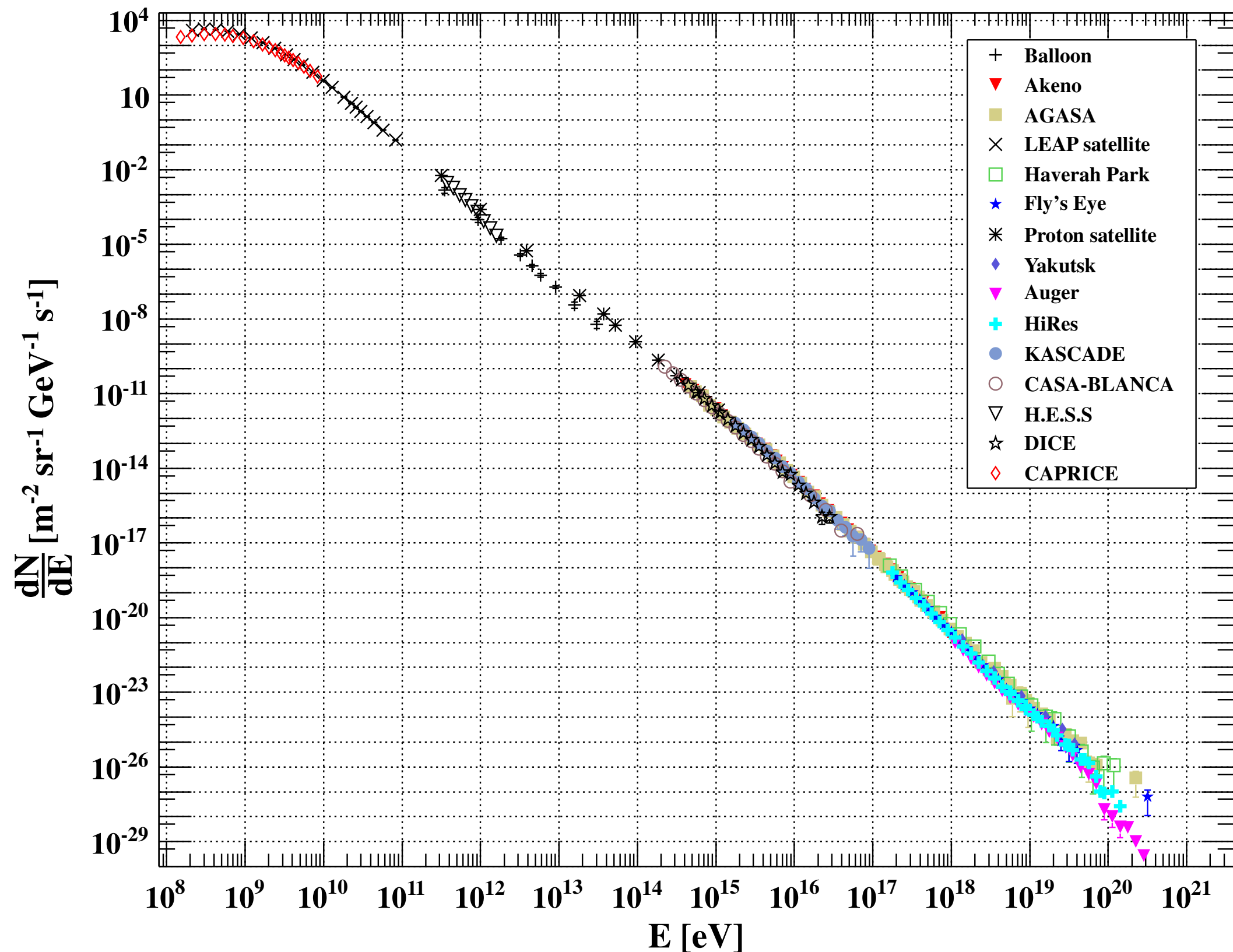
- ♦ teorias de dínamo → ASS (máximo 3 reversões);
- ♦ teorias de dínamo → BSS (várias reversões)
- ♦ BSS com 2 braços espirais → pode haver reversão do campo entre os braços
- ♦ BSS com 4 braços espirais → não há reversão do campo entre os braços

campo magnético galáctico: o que sabemos?

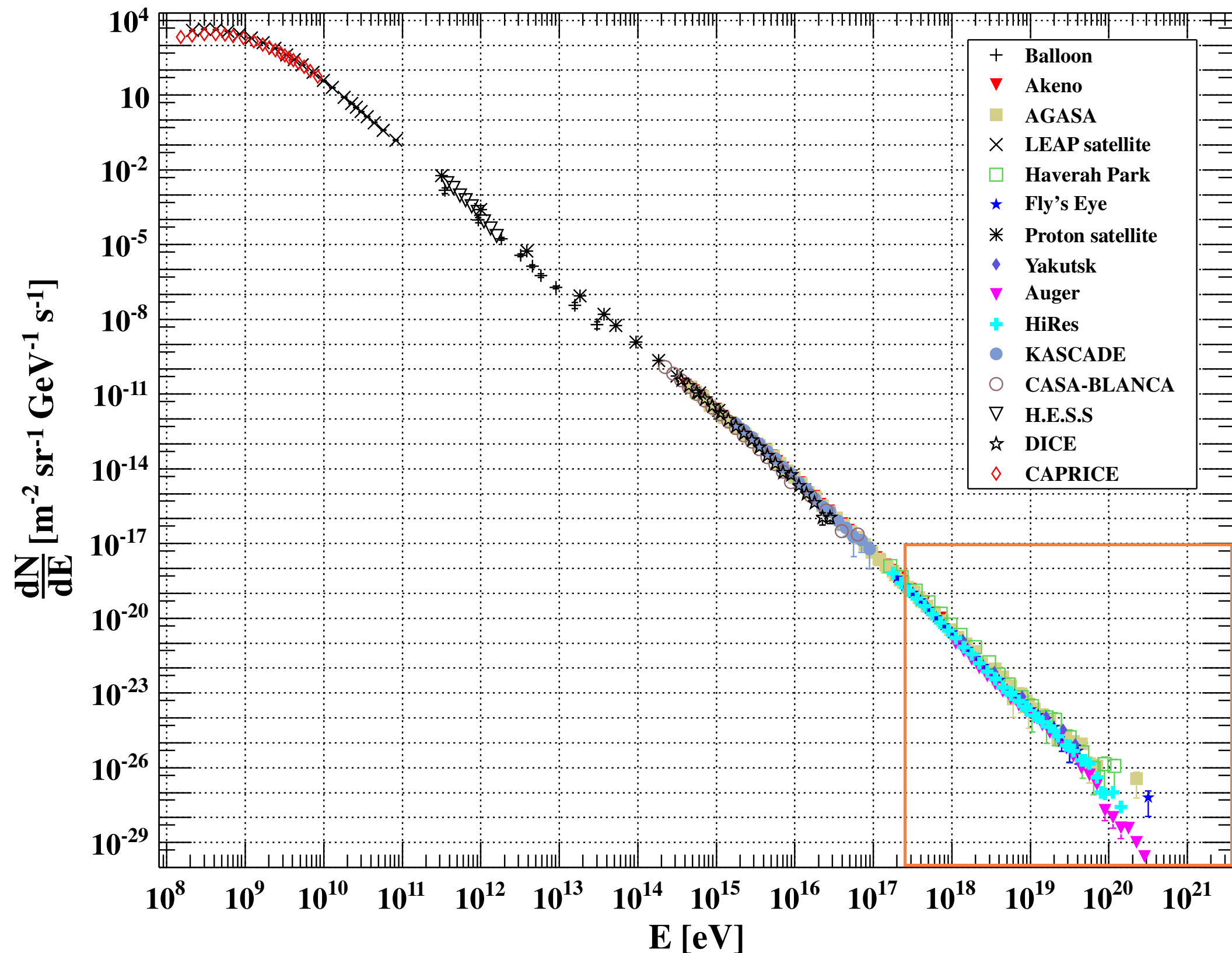
- ♦ o campo magnético está orientado no sentido horário na parte externa e anti-horário em algumas partes internas do disco galáctico (Brown *et al.*, 2007; Noutsos *et al.*, 2008)
- ♦ é possível que um único modelo possa não ser capaz de descrever o campo magnético em larga escala (Men *et al.*, 2008).
- ♦ existe um campo no halo galáctico, mas não se pode inferir sua (anti)simetria (Sun *et al.*, 2008)
- ♦ o campo no halo tem intensidade $\sim 1\text{-}2 \mu\text{G}$ (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.

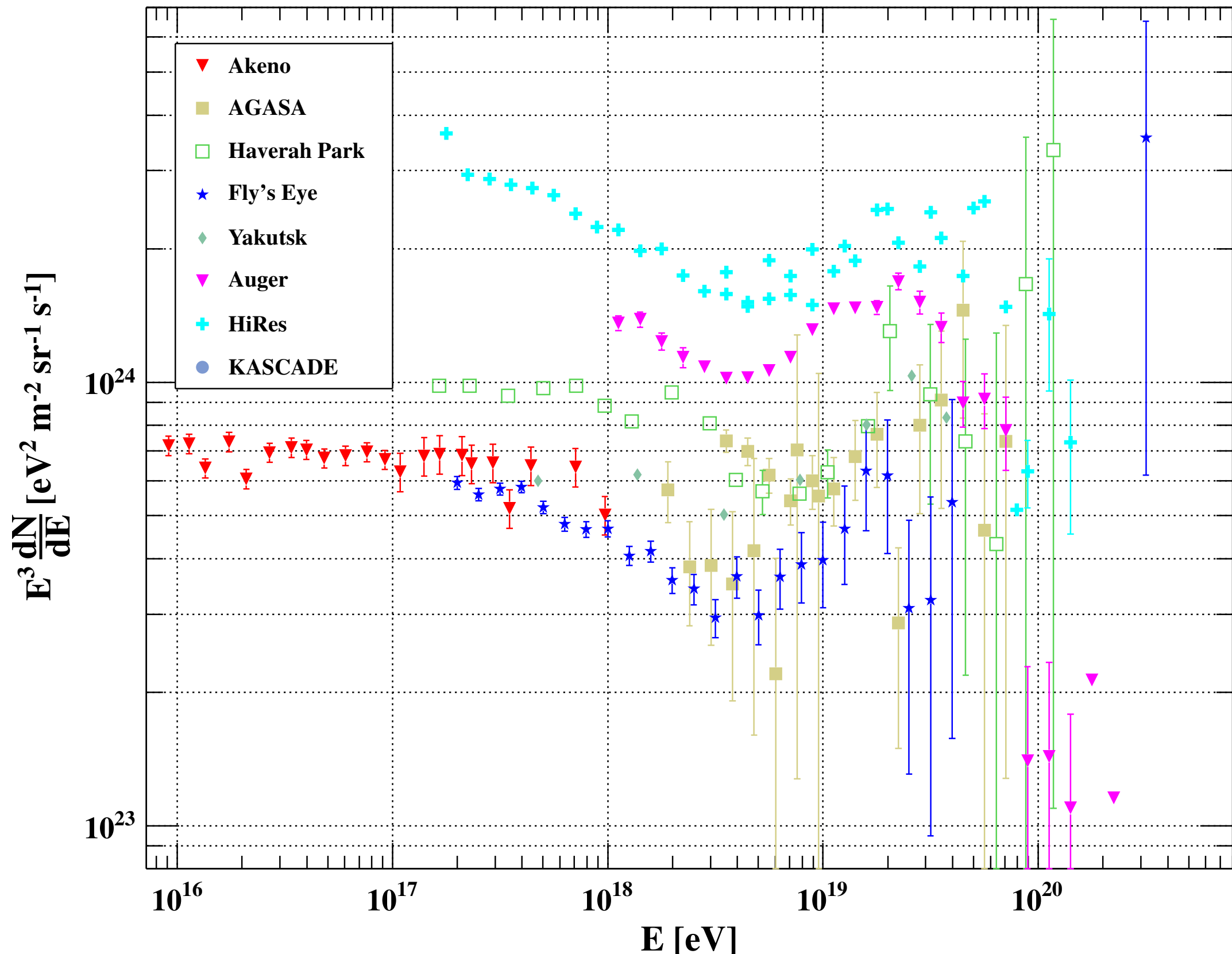
um pouco sobre raios cósmicos: espectro



um pouco sobre raios cósmicos: espectro

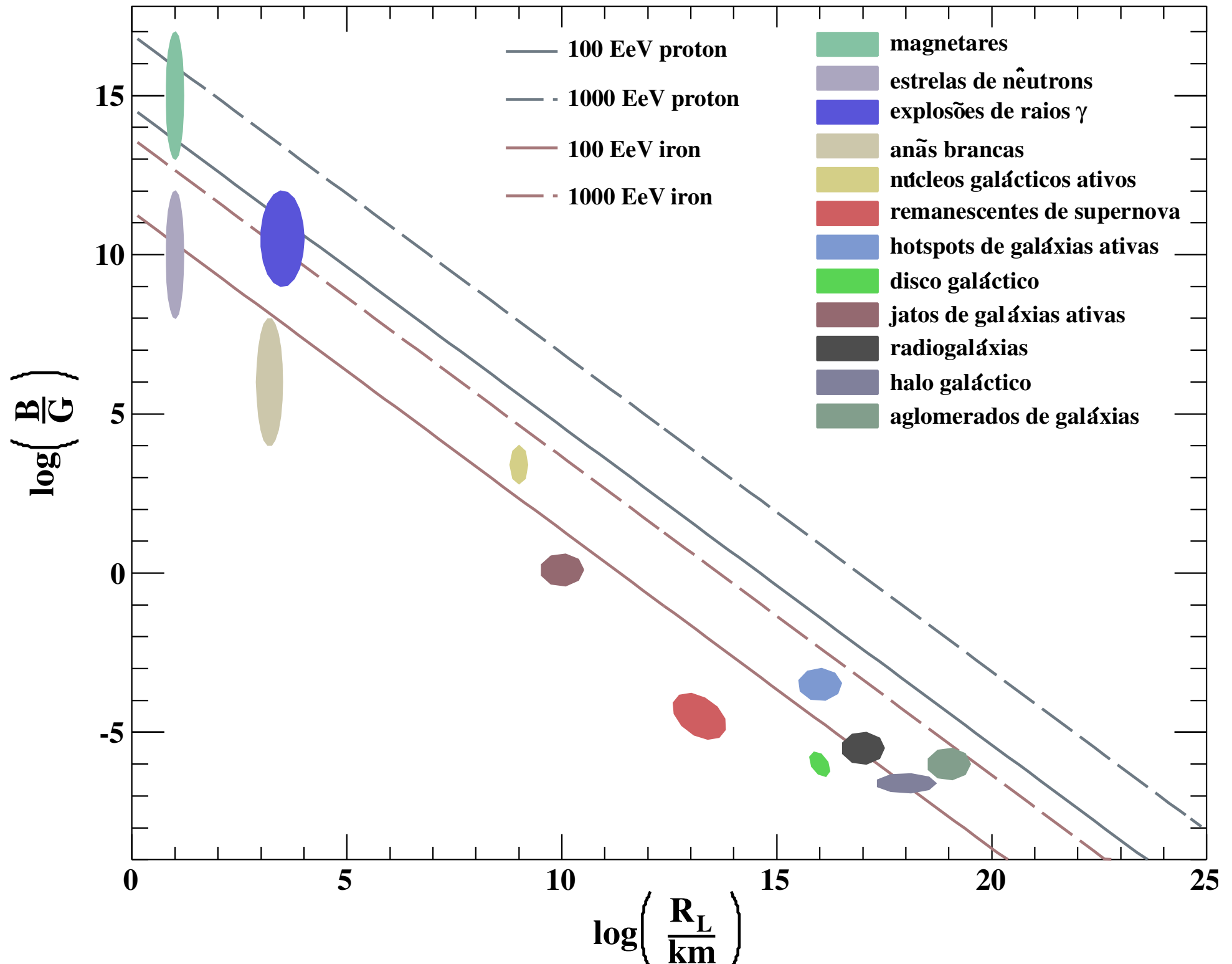


um pouco sobre raios cósmicos: espectro



um pouco sobre uhecrs: possíveis fontes

diagrama de Hillas



condição de Hillas

$$E_{max} \sim 2\beta cZeBR_L$$

espectro das fontes

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

compatível com
modelos de aceleração
estocástica através de
choques

um pouco sobre uhecrs: interação

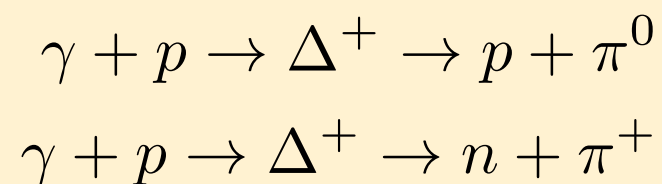
prótons

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

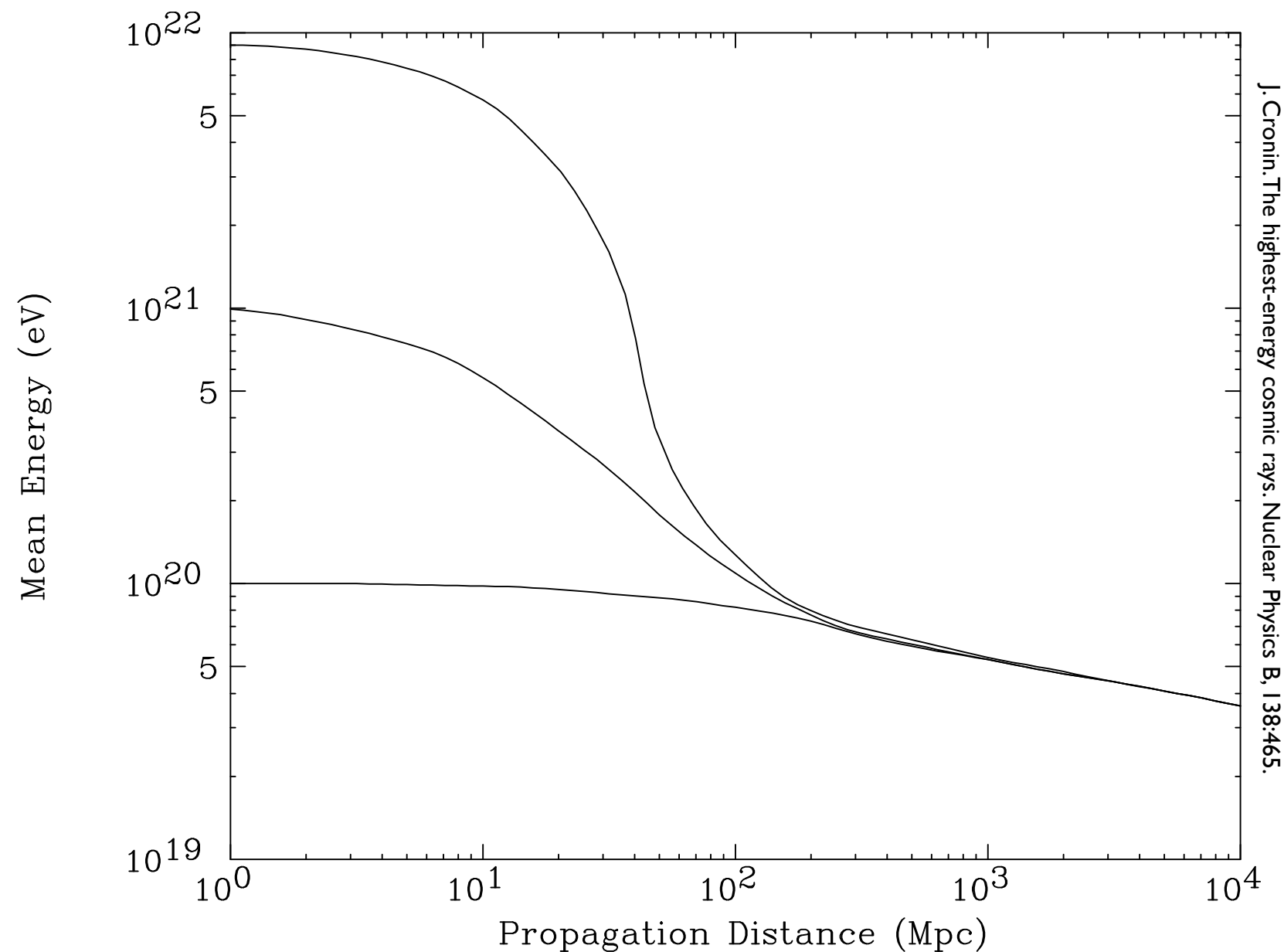
núcleos

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

efeito GZK



- ♦ limiar GZK: 6×10^{19} eV
- ♦ fontes com energia superior devem estar a menos de 75 Mpc



um pouco sobre uhecrs: deflexões

campo magnético extragaláctico: regular

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

campo magnético extragaláctico: turbulento

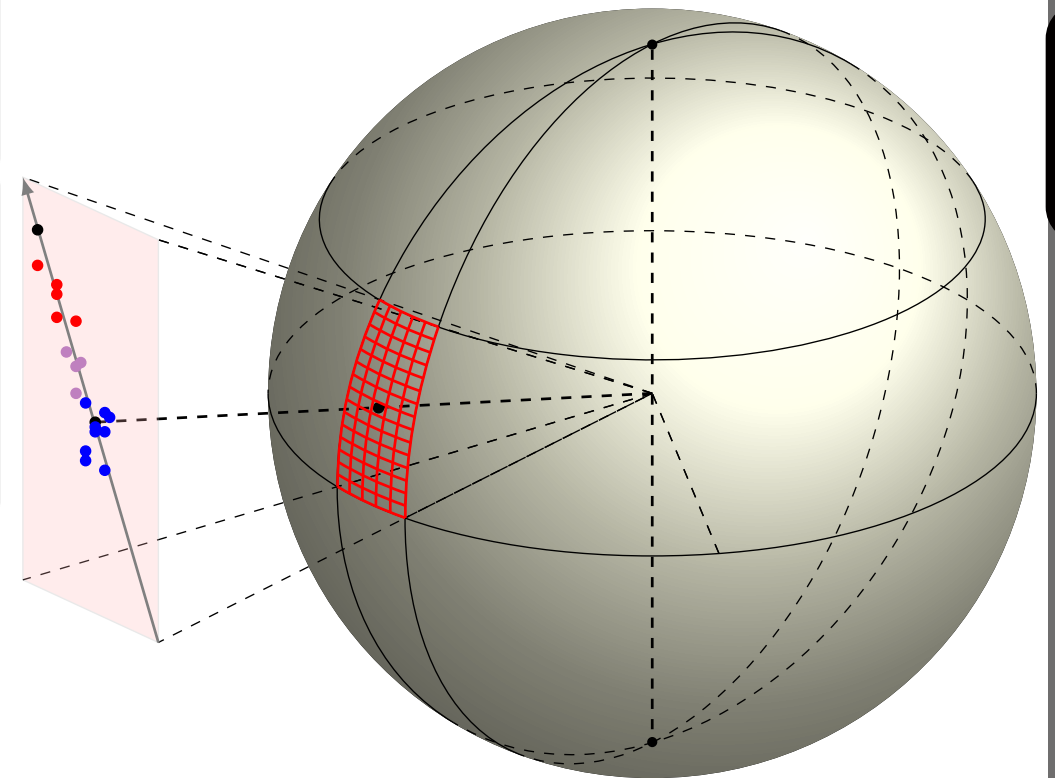
$$\delta_{rms} = 0,01^\circ Z \frac{L_c}{L} \left(\frac{\text{EeV}}{E} \right) \left(\frac{B_{rms}}{5 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{L}{2 \text{ kpc}} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{50 \text{ pc}}{L_c}}$$

campo magnético galáctico: regular

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

campo magnético galáctico: turbulento

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



um pouco sobre uhecrs: deflexões

campo magnético extragaláctico: regular

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

campo magnético extragaláctico: turbulento

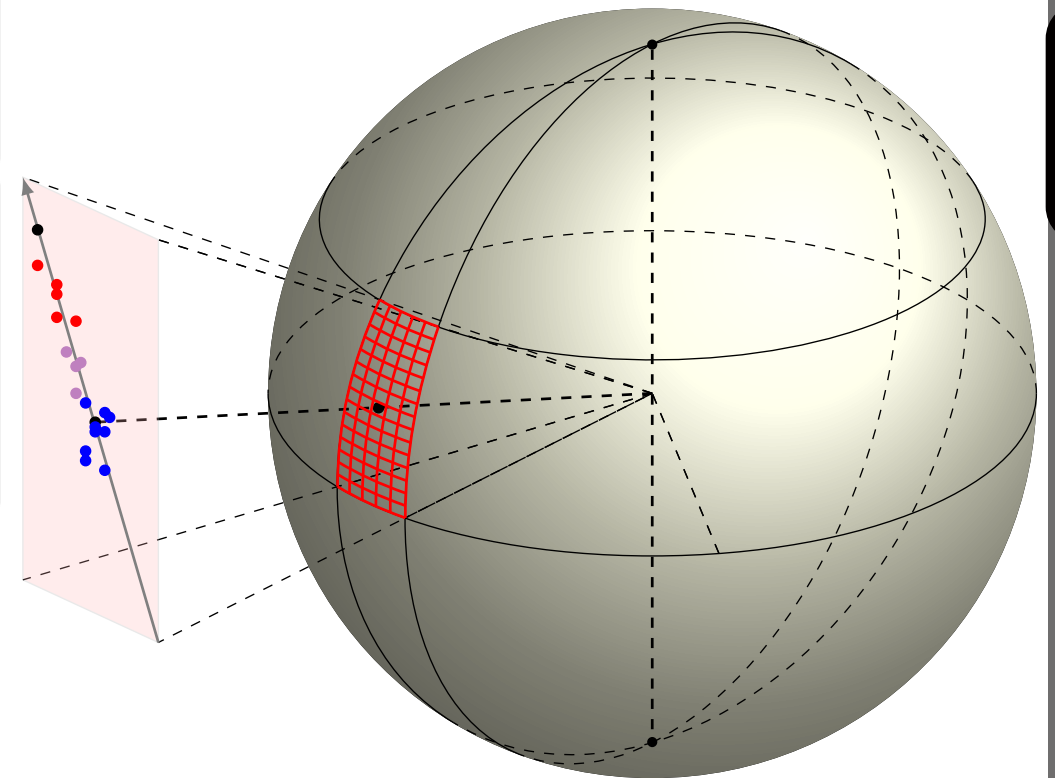
$$\delta_{rms} = 0,01^\circ Z \frac{L_c}{L} \left(\frac{\text{EeV}}{E} \right) \left(\frac{B_{rms}}{5 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{L}{2 \text{ kpc}} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{50 \text{ pc}}{L_c}}$$

campo magnético galáctico: regular

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

campo magnético galáctico: turbulento

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



um pouco sobre uhcrs: deflexões

campo magnético extragaláctico: regular

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

campo magnético extragaláctico: turbulento

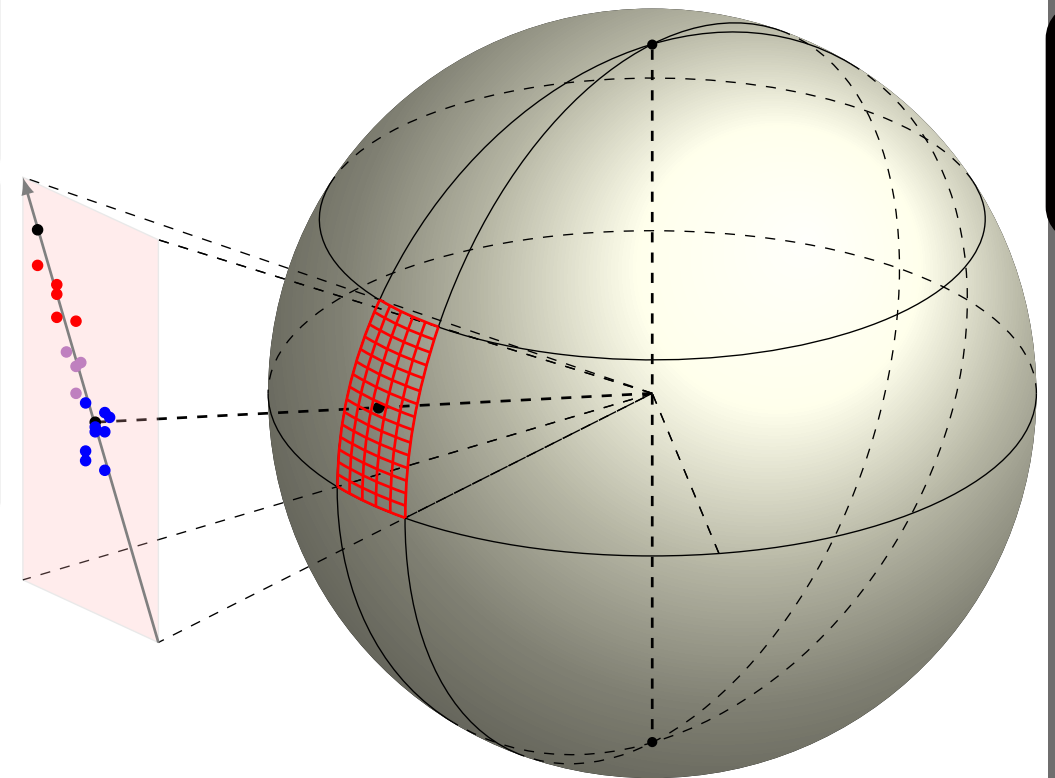
$$\delta_{rms} = 0,01^\circ Z \frac{L_c}{L} \left(\frac{\text{EeV}}{E} \right) \left(\frac{B_{rms}}{5 \mu\text{G}} \right) \left(\frac{L}{2 \text{ kpc}} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{50 \text{ pc}}{L_c}}$$

campo magnético galáctico: regular

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

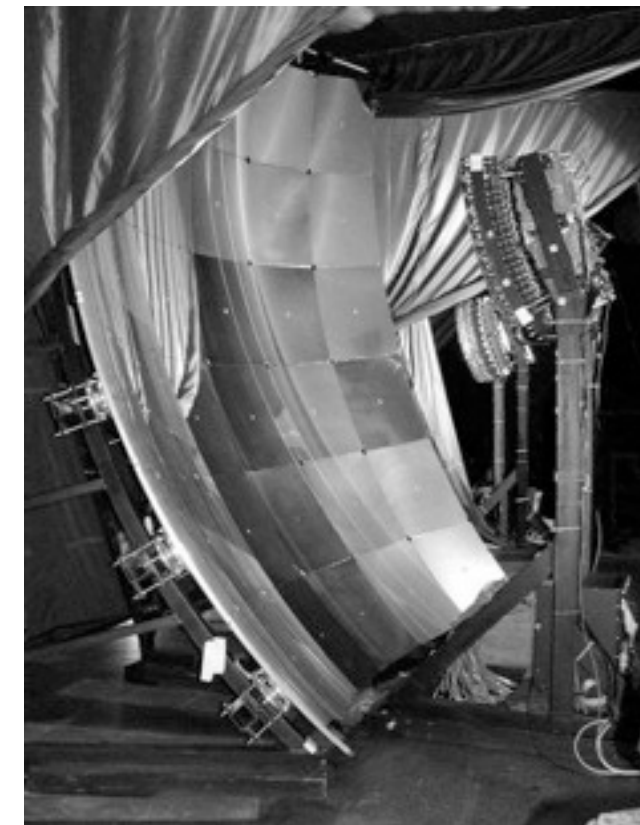
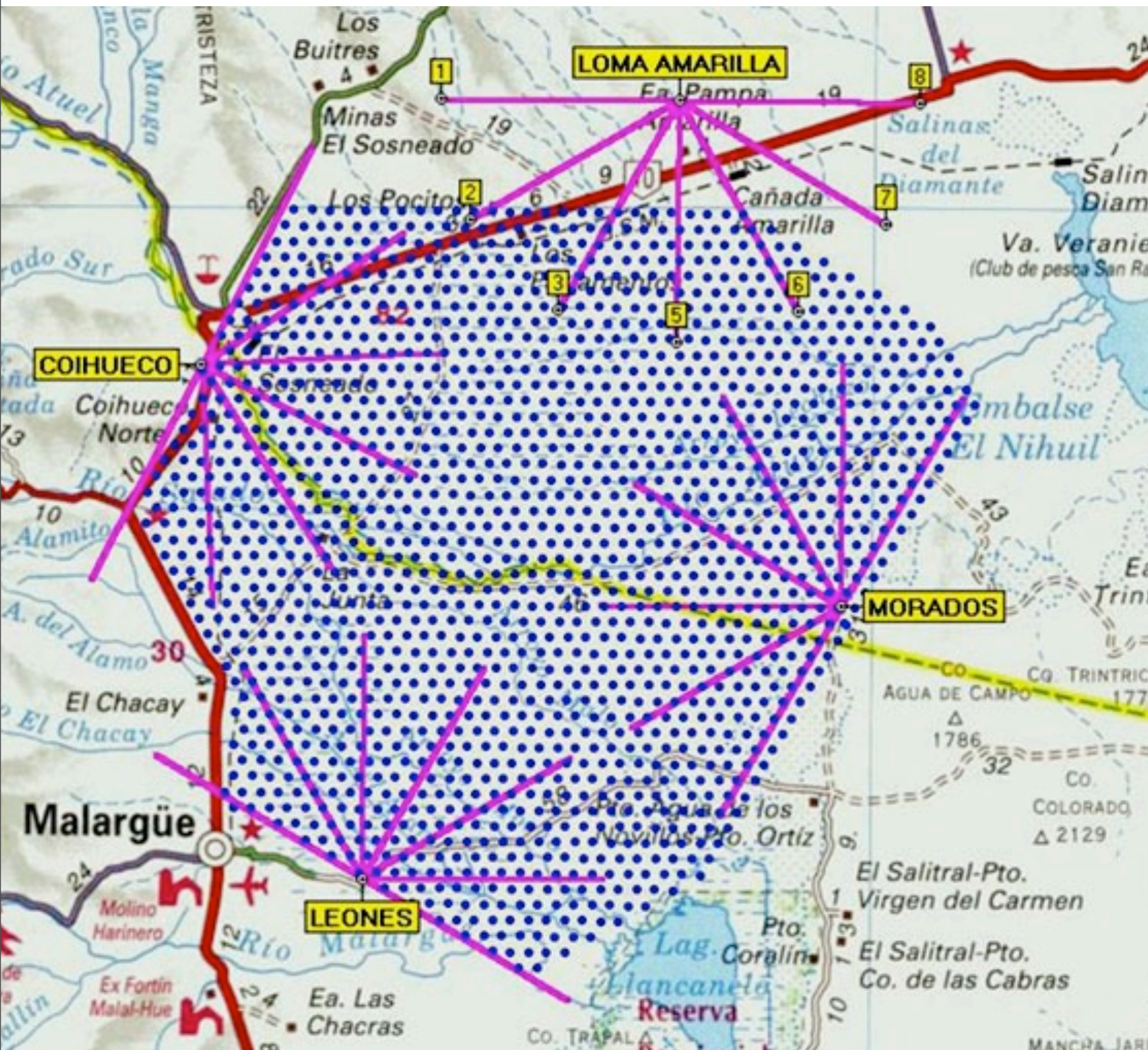
campo magnético galáctico: turbulento

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



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

Observatório Pierre Auger



técnica híbrida: SD+FD



wavelets

♦ por que usá-las?

estudar o sinal em diferentes escalas e localizações

♦ transformada contínua (I-D)

$$\Phi(s, \tau) = \int f(t, u) \Psi_{s, \tau}^*(t) dt$$

♦ wavelet-mãe ($\Psi \in L^2$)

$$\Psi_{s, \tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \Psi\left(\frac{t - \tau}{s}\right)$$

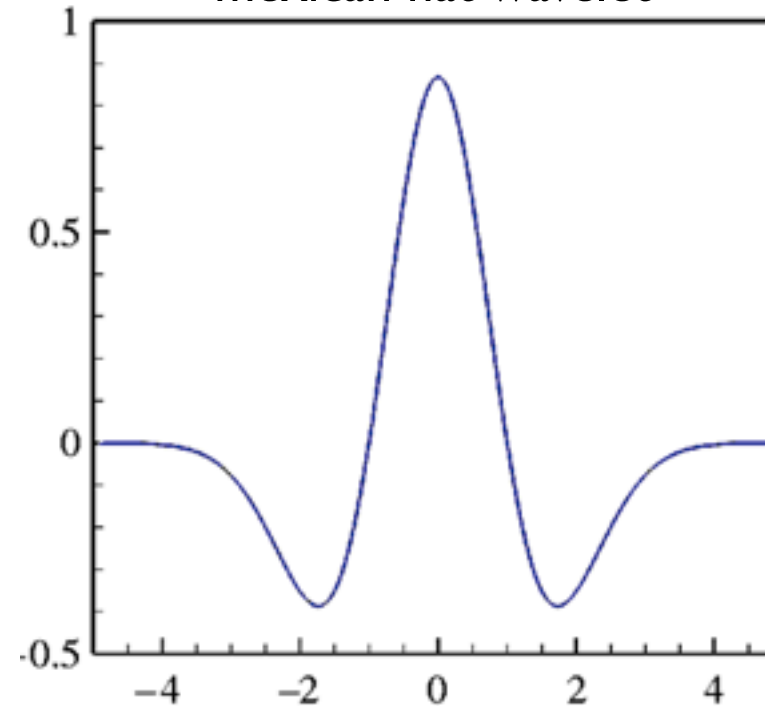
♦ transformada inversa

$$f(t) = \int \int \Phi(s, \tau) \Psi_{s, \tau}(t) d\tau ds$$

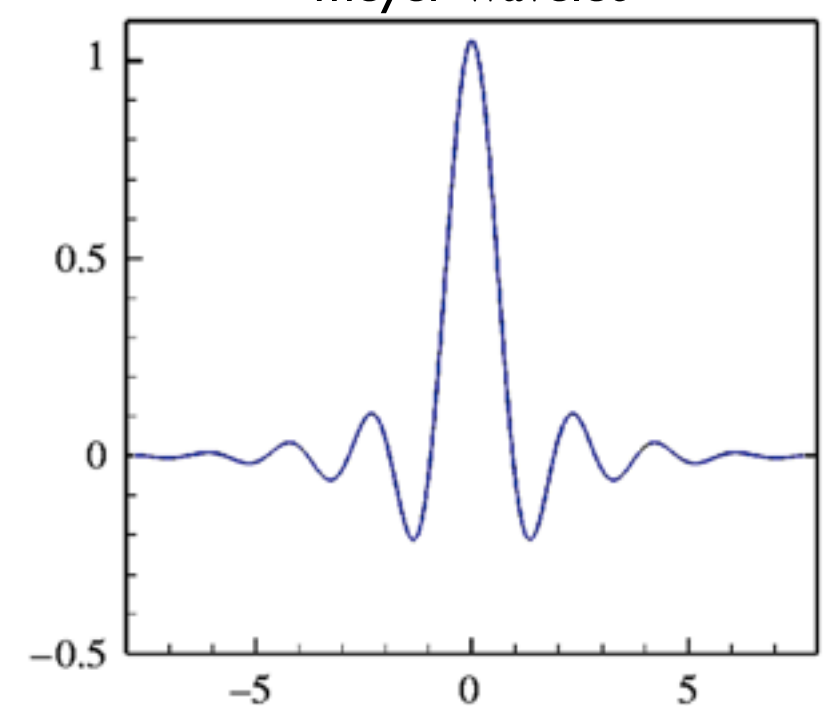
♦ condição de admissibilidade

$$\int \frac{|\Psi(k)|^2}{k} dk < \infty$$

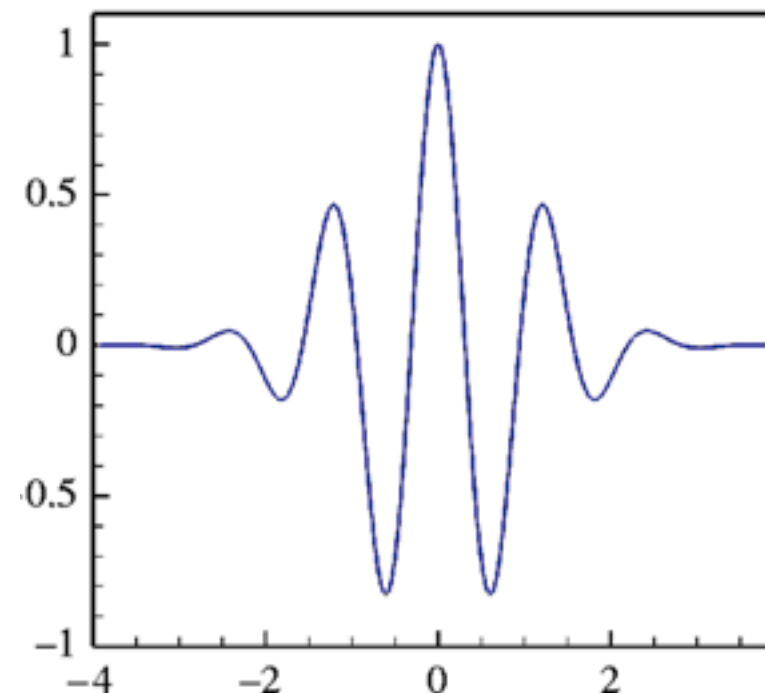
mexican hat wavelet



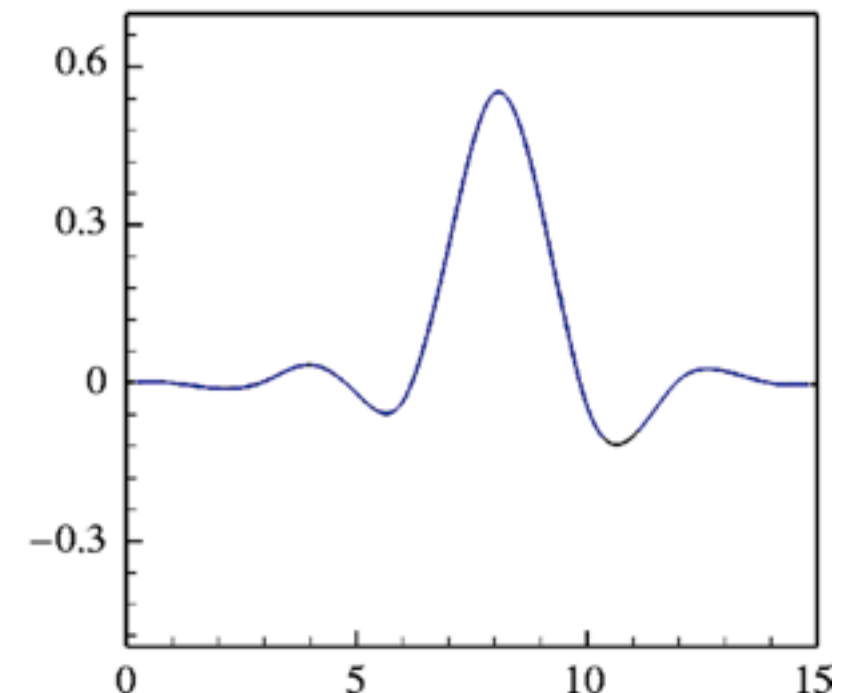
meyer wavelet



morlet wavelet



sym8 wavelet



wavelets na esfera

♦ obtida a partir da projeção estereográfica de wavelets euclidianas

transformada contínua de wavelets na esfera

$$W_{\Psi}^f = \langle \Psi_{a,\chi,\omega_0} \rangle = \int_{\mathbb{S}^2} d(\cos \theta) d\varphi \Psi_{a,\chi,\omega_0}^*(\theta, \varphi) f(\theta, \varphi)$$

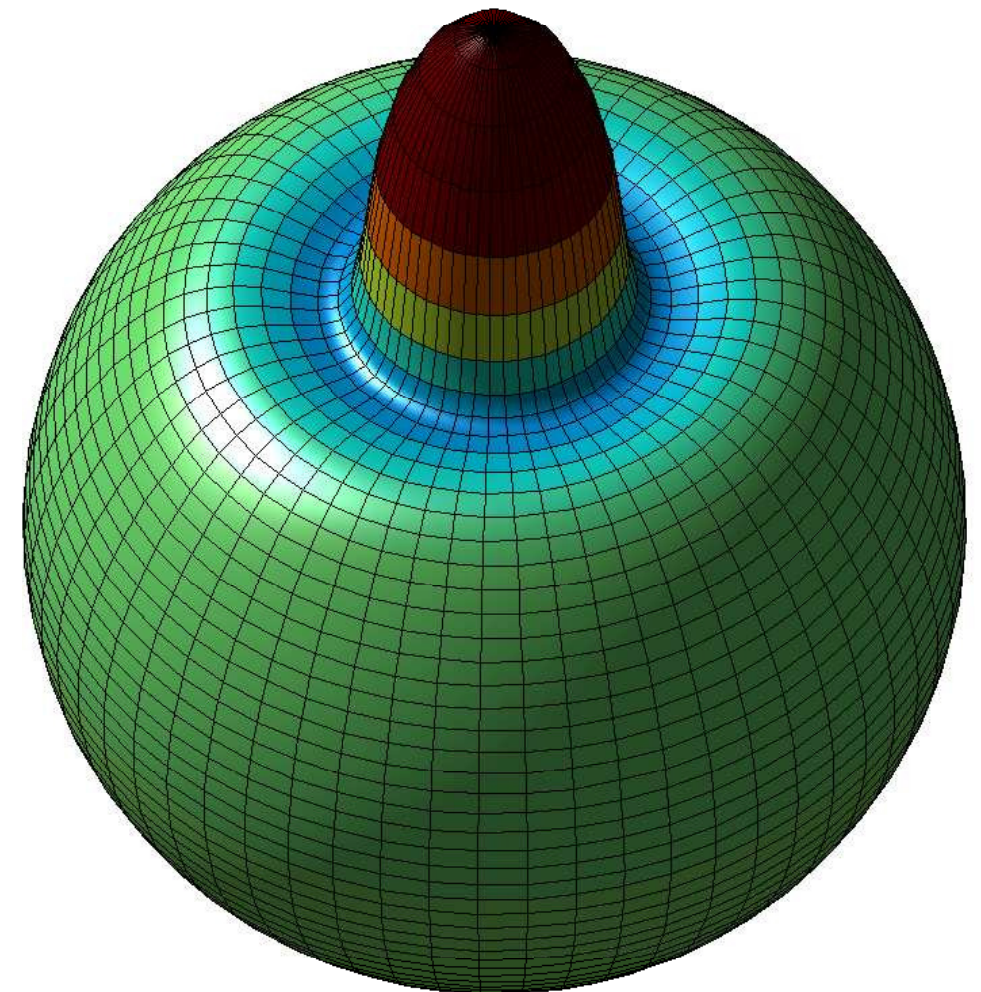
♦ pode-se aplicar transformações afins à função de análise (wavelet)

♦ transformações afins aplicáveis: translação, rotação e dilatação

♦ código utilizado: swat (spherical wavelet analysis tool)

♦ swat: baseado em Wiaux et al. (2007) → reconstrução exata

spherical mexican hat wavelet (smhw)



Créditos: J. D. McEwen

wavelets direcionáveis

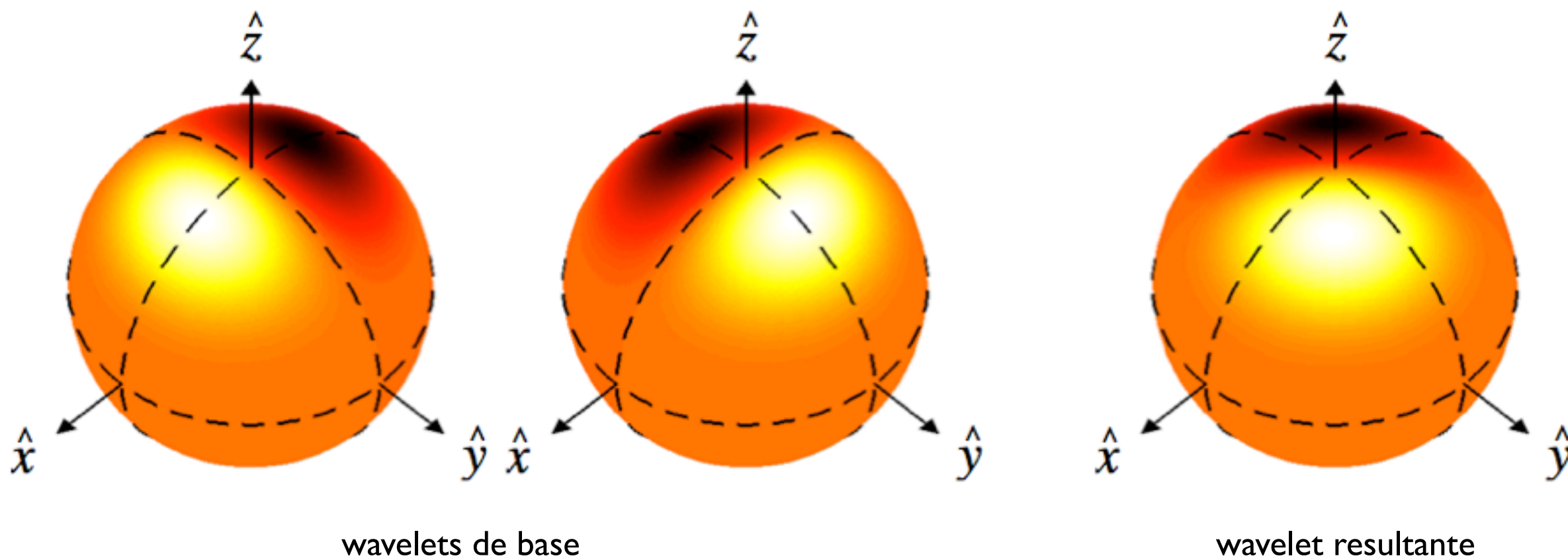
- ♦ utilização de wavelets não-axissimétricas
- ♦ direcionável → combinação linear de filtros de base
- ♦ filtros de base → rotações do filtro original

$$[R_{(\alpha=0, \beta=0, \gamma)}](\omega) = \sum_{m=1}^M k_m(\gamma) \Psi_m(\omega)$$

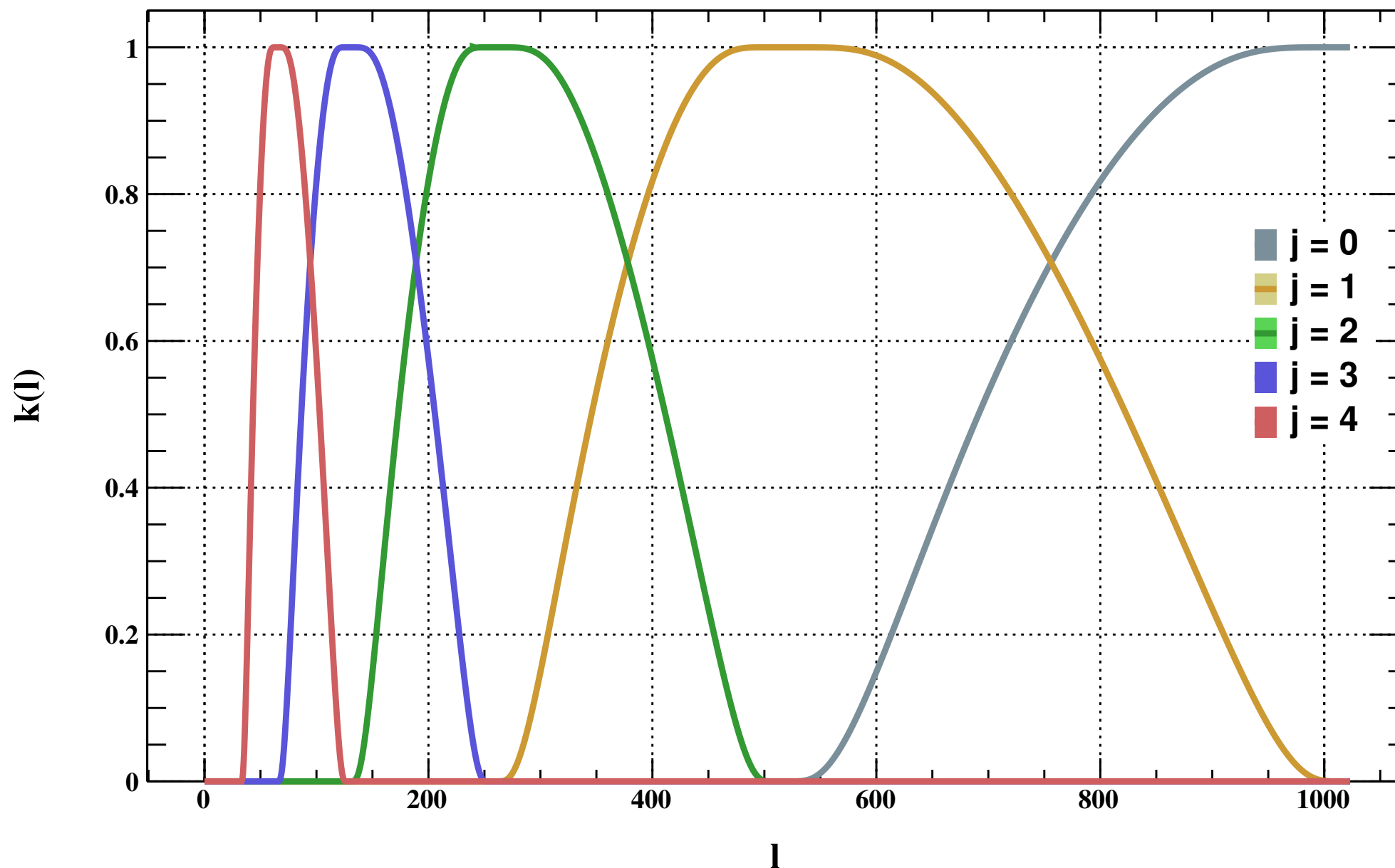
- ♦ transformada de wavelets → linear
- ♦ linearidade dos coeficientes

$$W_{\psi}^f(a, \alpha, \beta, \gamma) = \sum_{m=1}^M k_m(\gamma) W_{\psi_m}^f(a, \alpha, \beta, 0)$$

- ♦ wavelets direcionáveis fornecem a orientação da estrutura identificada



wavelets de escala discreta



- ♦ wavelet contínua $\rightarrow$ wavelet de escala discreta (Γ)
- ♦ análise de um sinal dilatado no espaço harmônico

$$\widehat{(\Gamma_{\alpha^j})}_{lm} = \tilde{K}_{\Gamma}(\alpha^j l) S_{lm}^{\Gamma}$$

j : escala ($j \in [0, J]$)

J : número de escalas

N : limite de banda azimutal

m : frequência azimutal ($|m| < N$)

reconhecendo padrões na esfera

algoritmo de reconhecimento de padrões

- ♦ $f(\theta, \varphi) \rightarrow$ padrão buscado; $h(\theta, \varphi) \rightarrow$ 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 $\rightarrow$ transformada de wavelets na esfera do sinal
- ♦ wavelets direcionáveis $\rightarrow$ fatoráveis no espaço harmônico:

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

expansão em harmônicos esféricos

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

$$h(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{B-1} \sum_{|n| \leq l} b_{ln} Y_{ln}(\theta, \varphi)$$

- ♦ assim a correlação é dada por:

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

- ♦ relação entre frequência e escala angular

$$s = \frac{360^\circ}{2l}$$

reconhecendo padrões na esfera

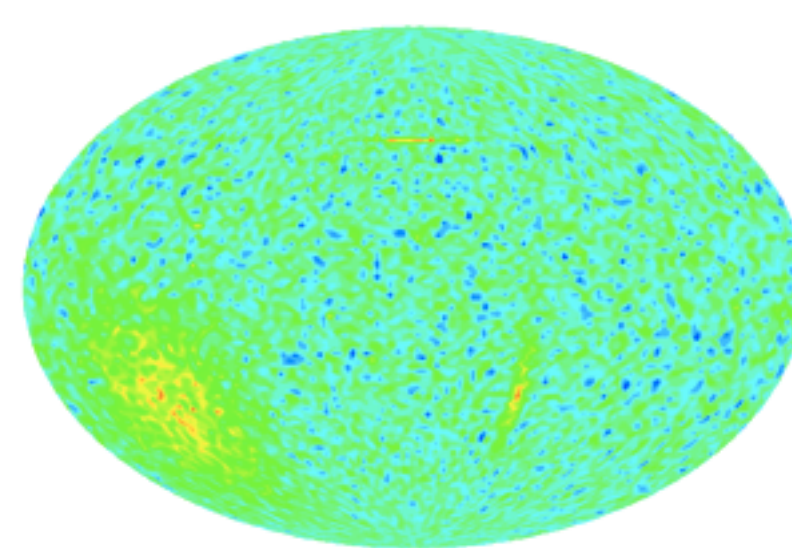
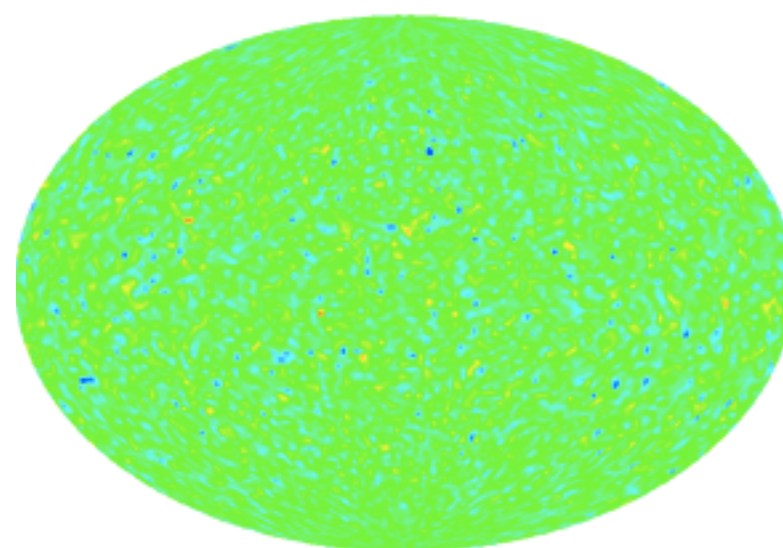
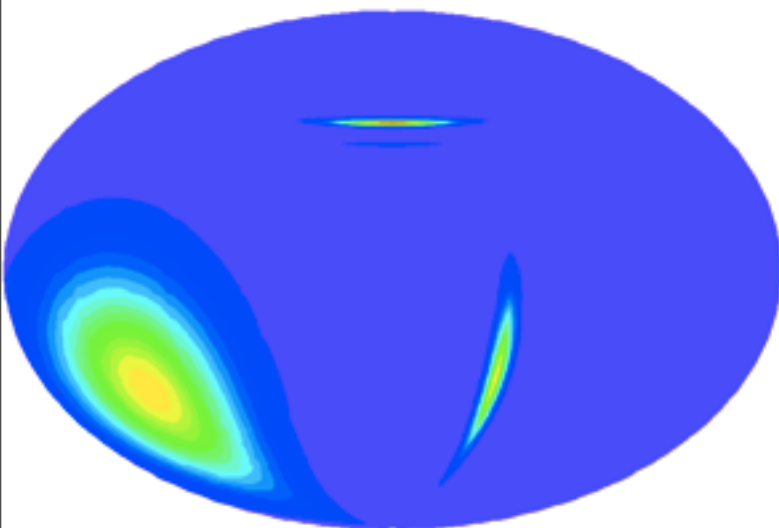
sinal

+

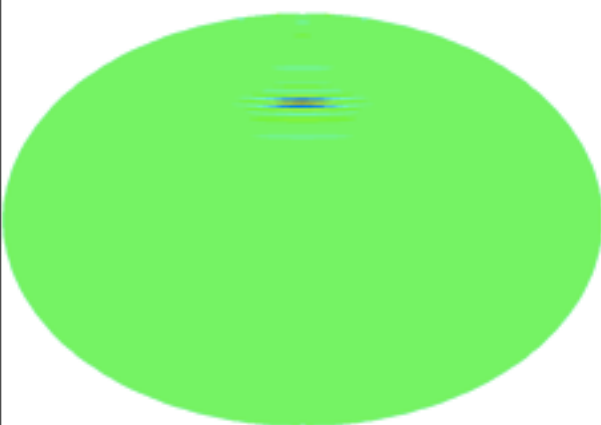
ruído

=

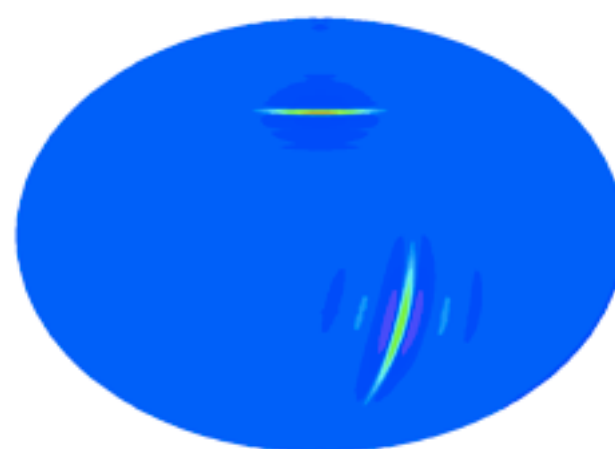
soma



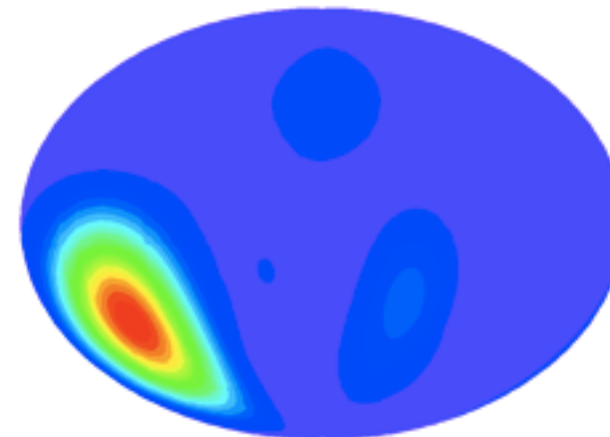
$B=256, j_{\min}=0, j_{\max}=0$



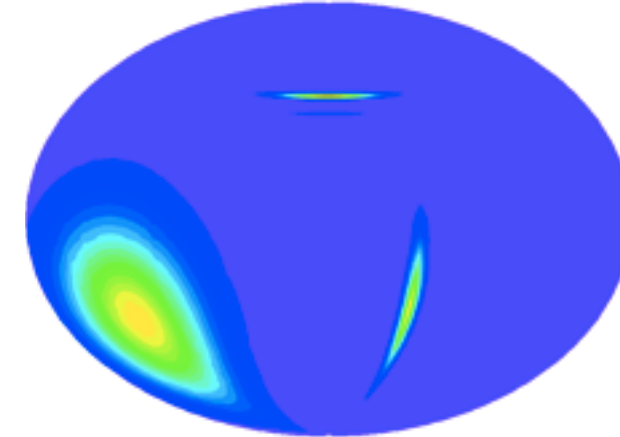
$B=256, j_{\min}=0, j_{\max}=3$



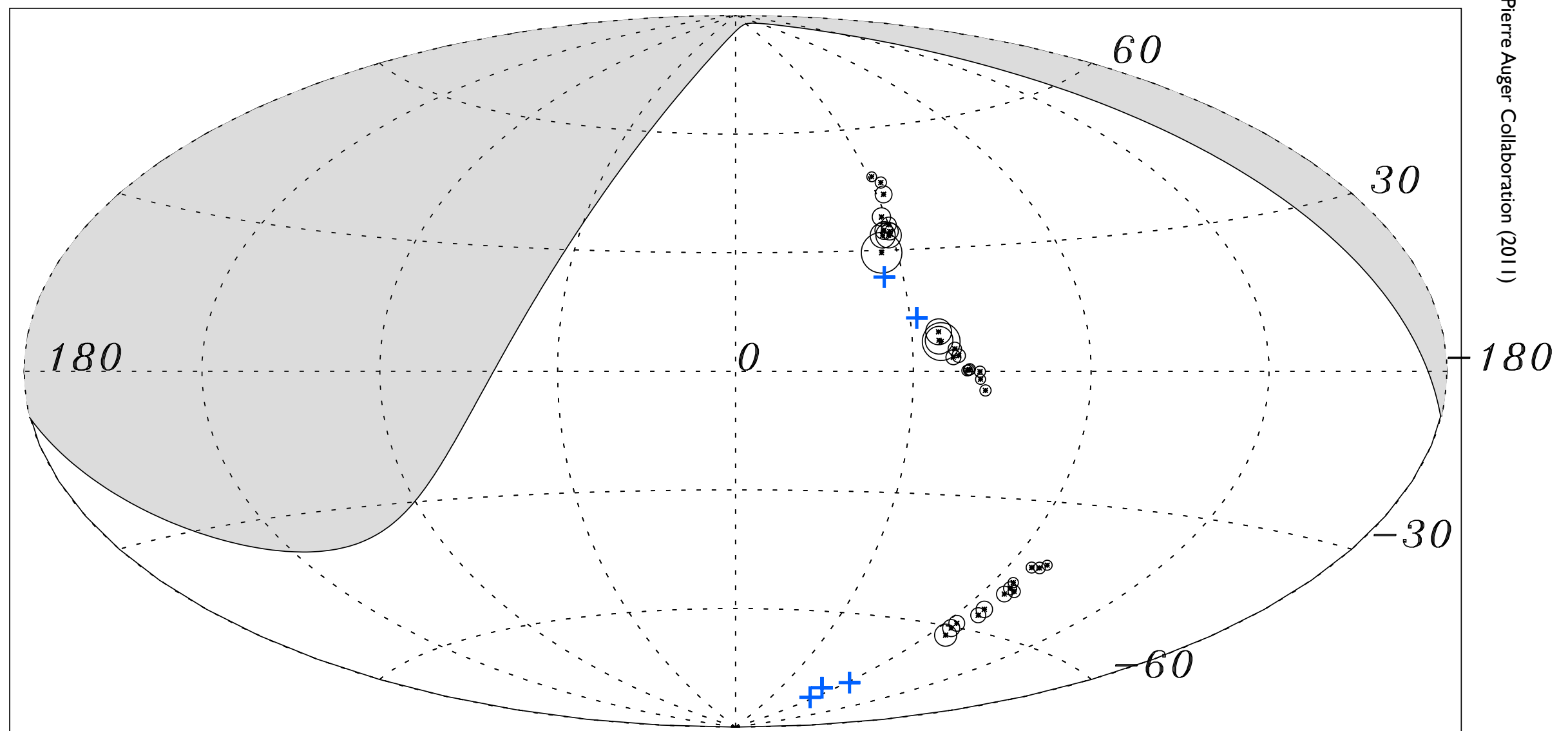
$B=256, j_{\min}=5, j_{\max}=7$



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

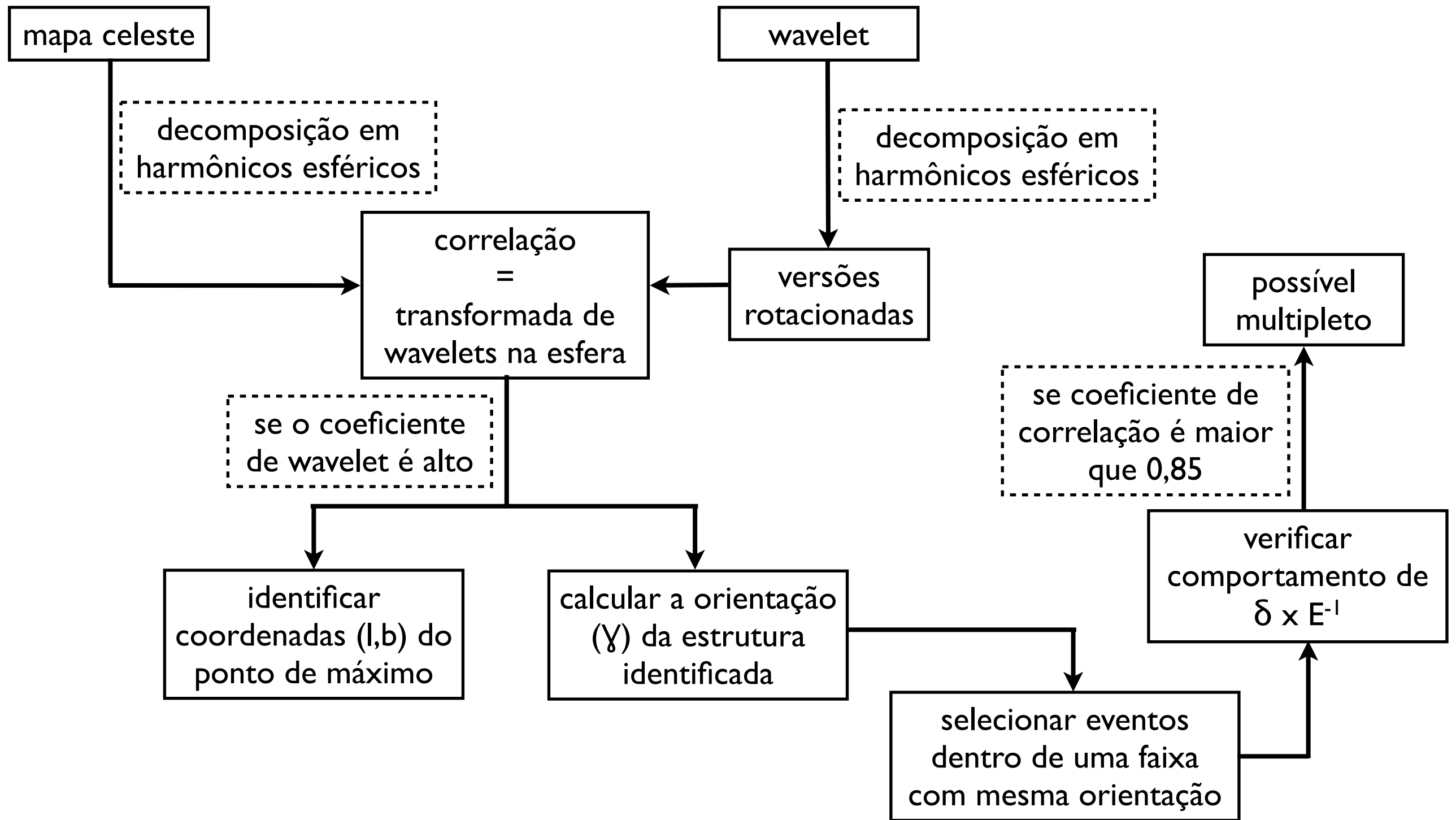


multipletos

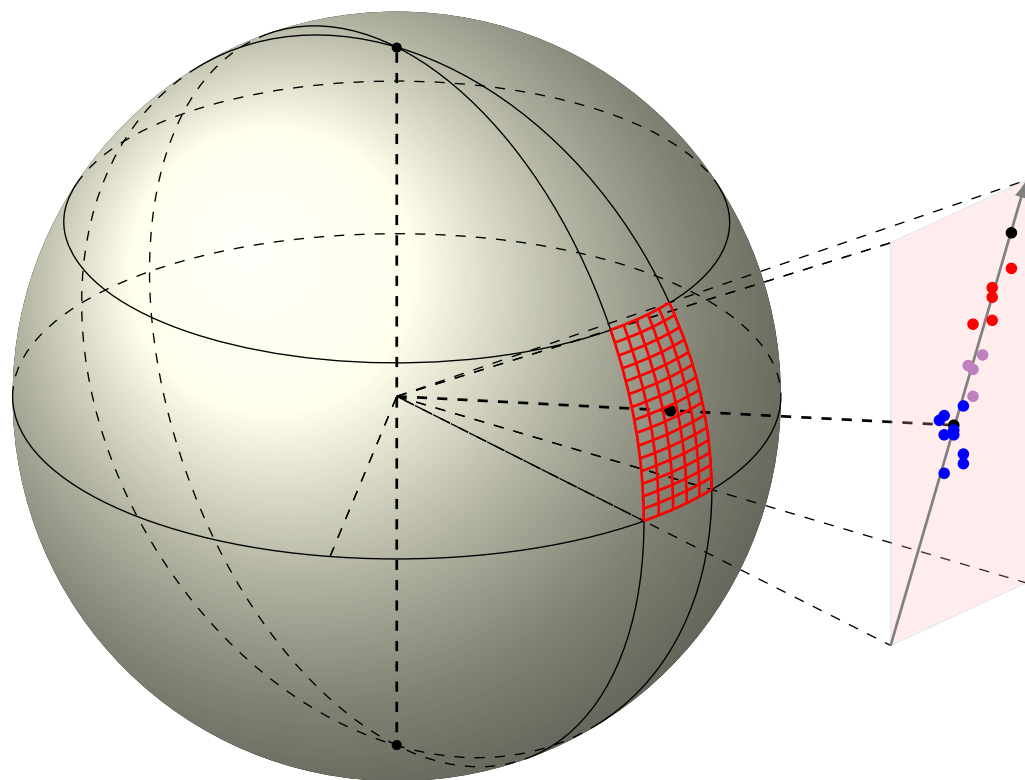


- ♦ resultados da colaboração Auger → busca de multipletos
- ♦ nenhum multiplete encontrado
- ♦ método utilizado: minimum spanning tree (mst)

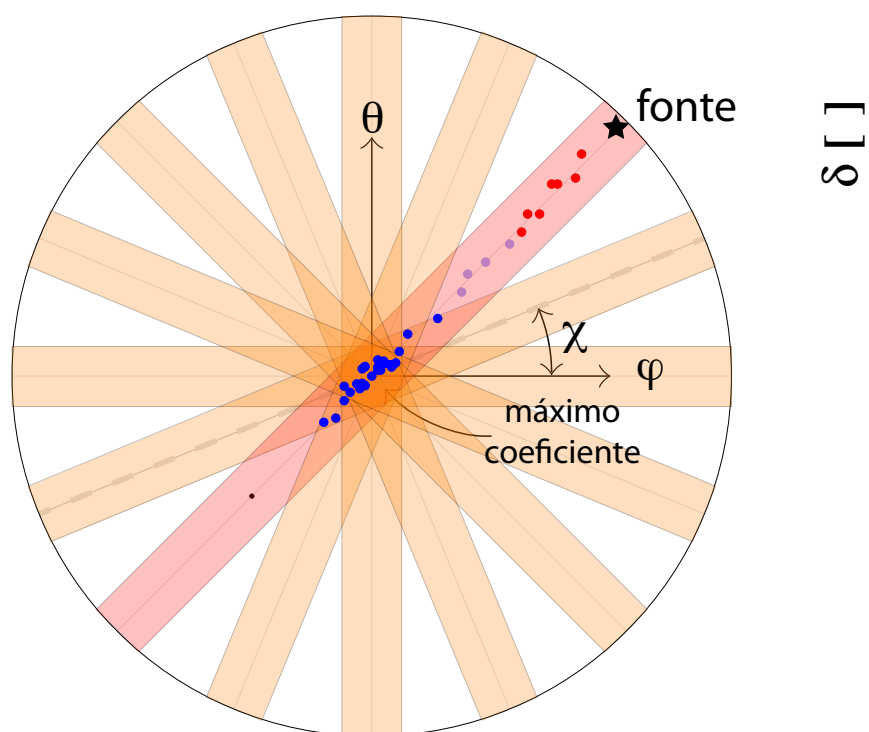
identificando multipletos



identificando multipletos

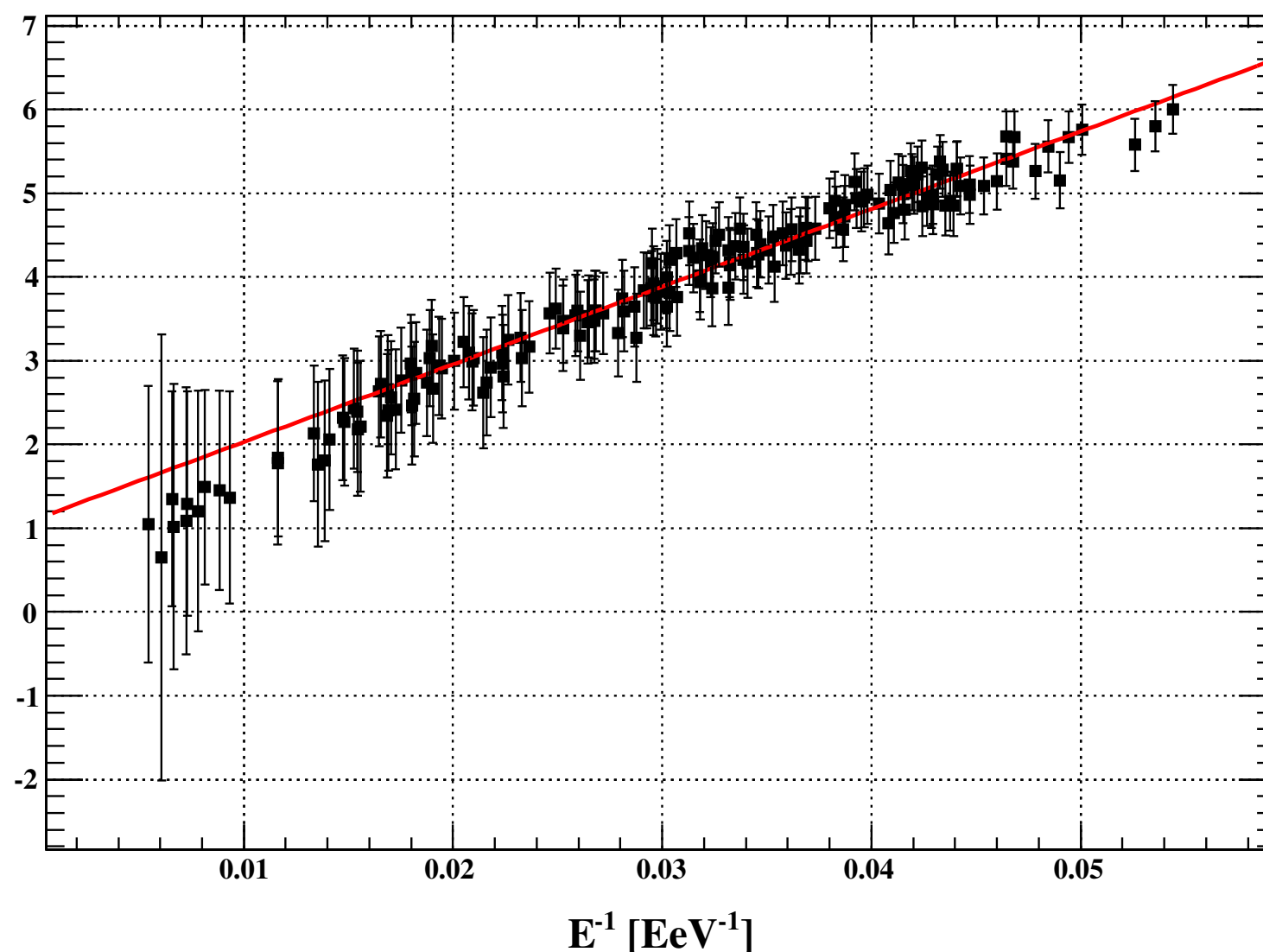


♦ seleção de eventos dentro de faixas

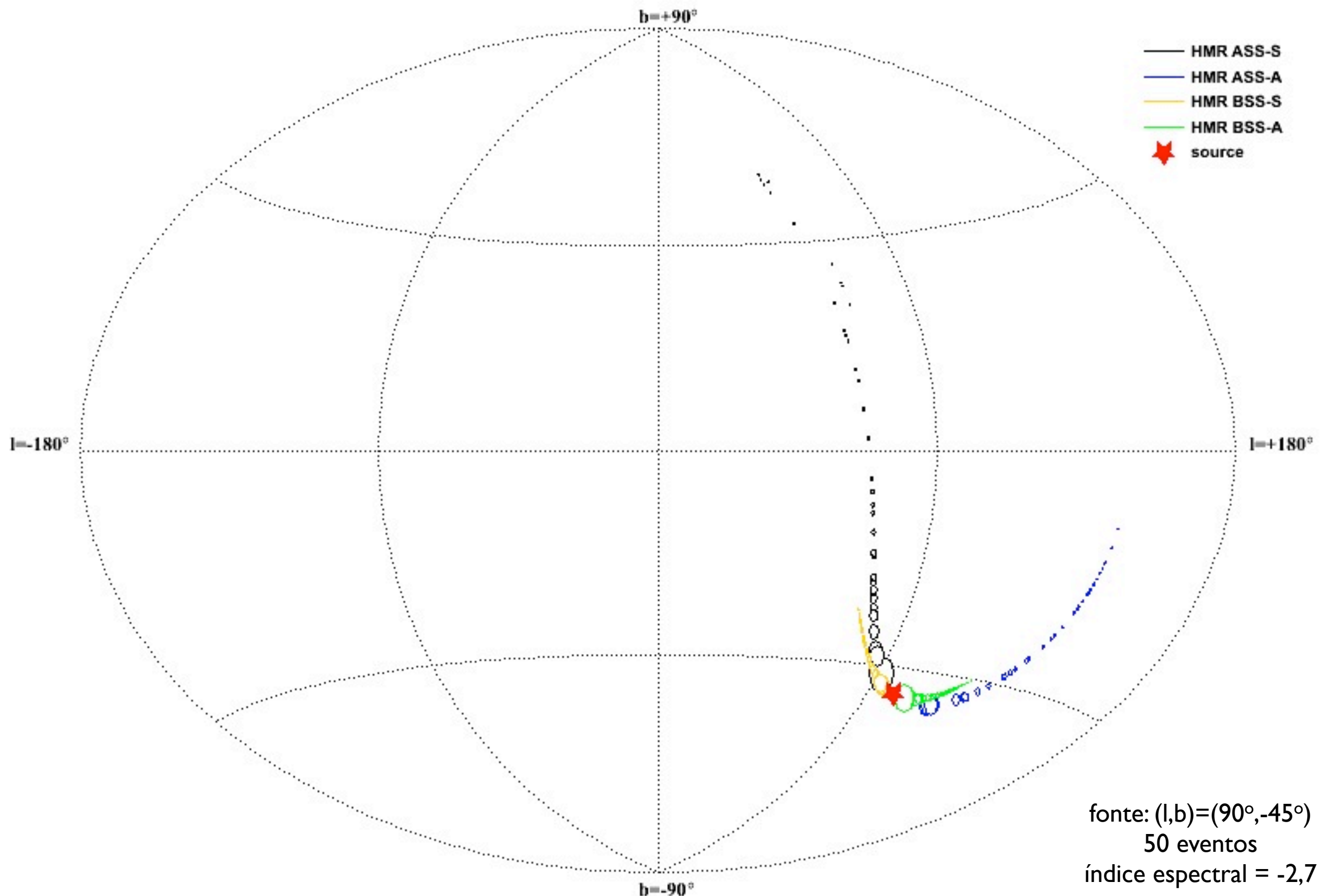


♦ para eventos provenientes de uma mesma fonte

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



campo magnético galáctico e multipletos



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

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

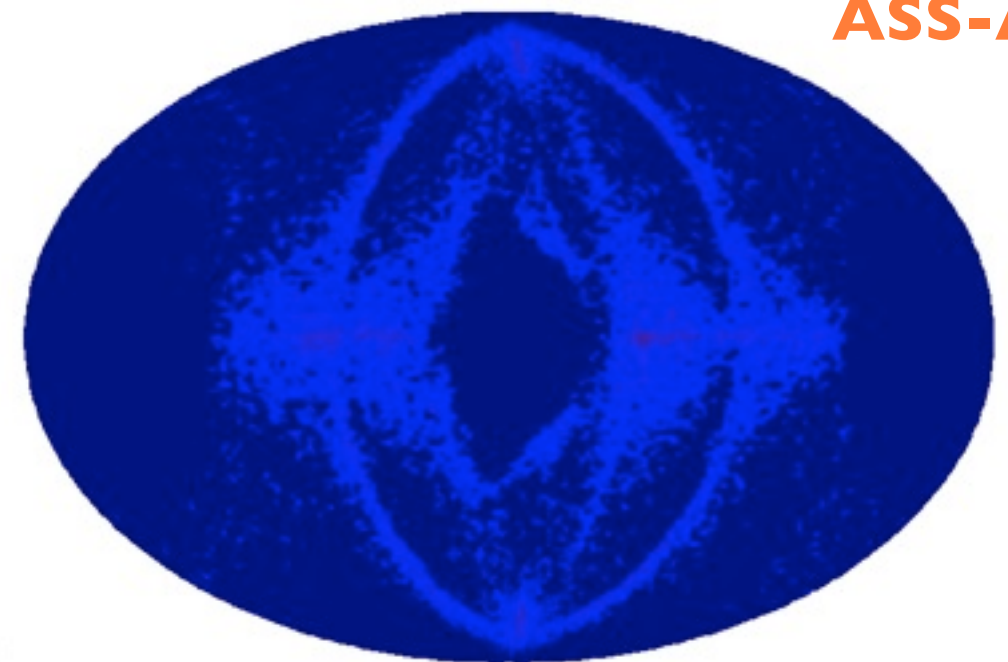
parâmetros

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

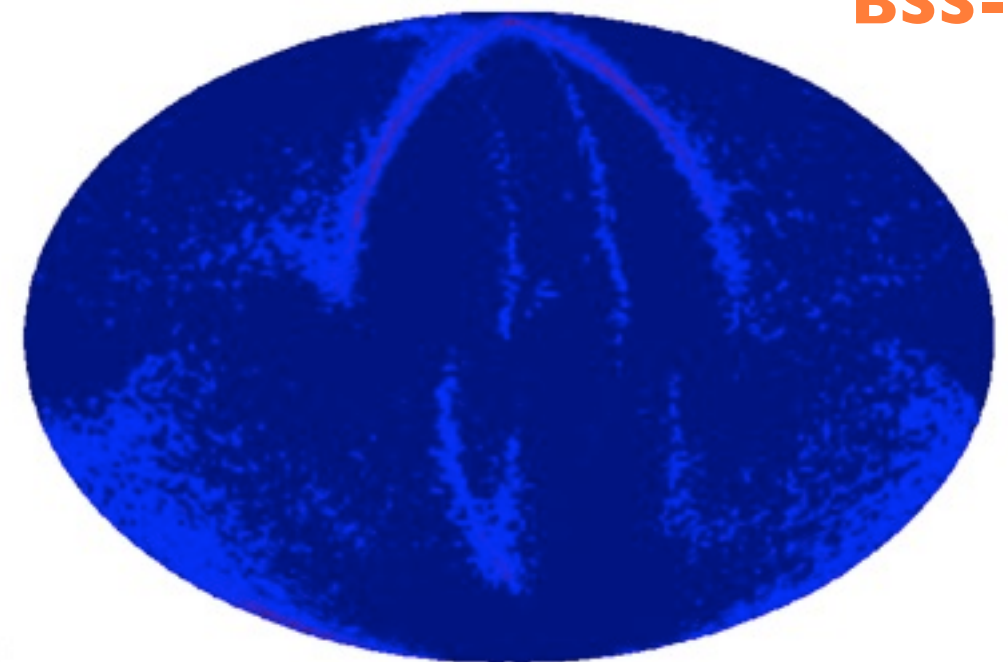
$p = -10^\circ$

$r_0 = 10,55$ kpc

$R = 8,5$ kpc



ASS-A



BSS-S

modelo de Harari, Mollerach e Roulet

BSS

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

ASS

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

componente radial

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

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

$$z_0 = 4 \text{ kpc}$$

$$z_1 = 0.3 \text{ kpc}$$

$$z_2 = 20 \text{ pc}$$

$$p = -12^\circ$$

$$r_0 = 10,55 \text{ kpc}$$

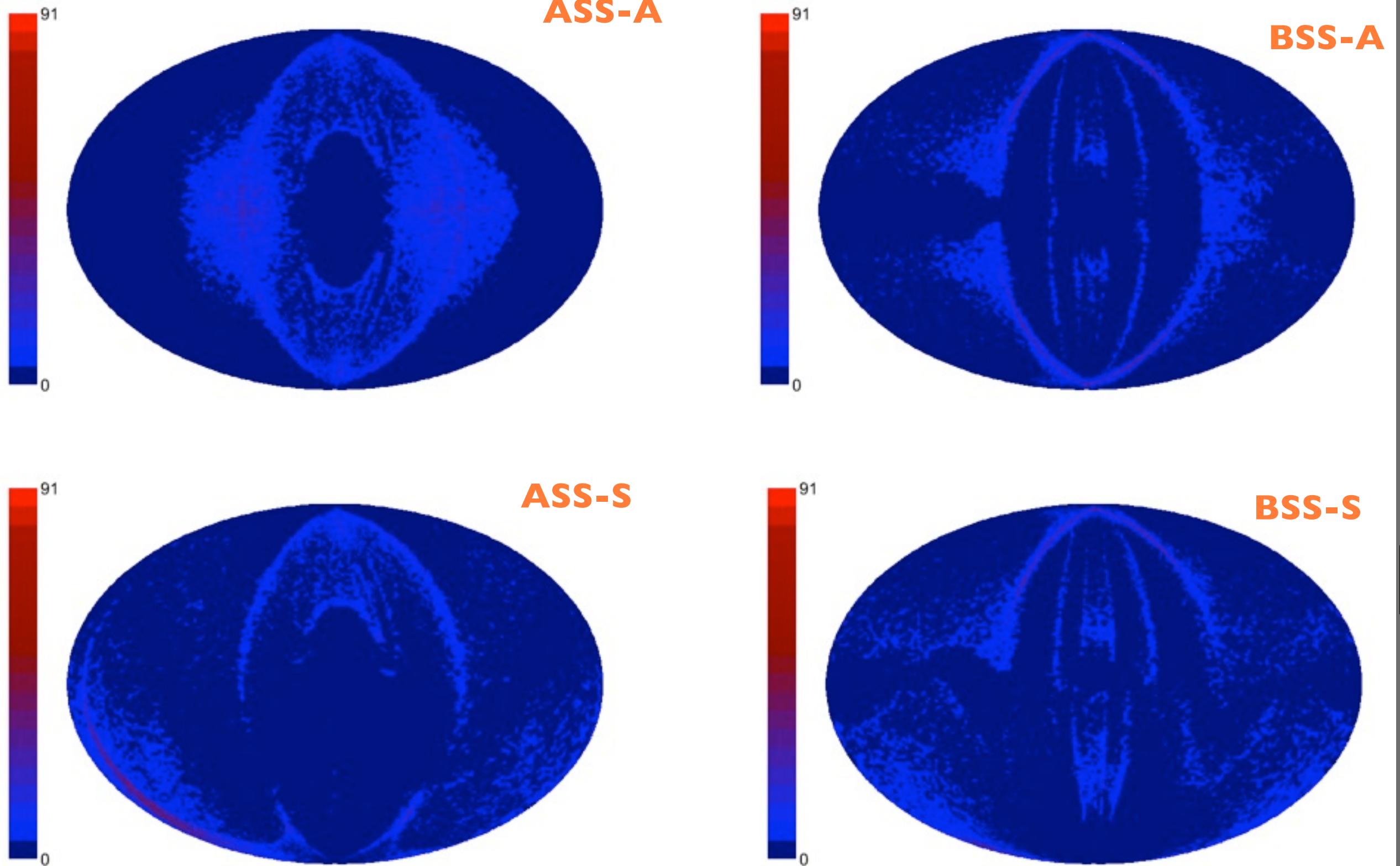
$$r_1 = 2 \text{ kpc}$$

$$R = 8,5 \text{ kpc}$$

❖ modelo semelhante ao de Stanev

❖ evita descontinuidades no campo e suas derivadas

modelo de Harari, Mollerach e Roulet



modelo de Sun, Reich, Waelkens e Enßlin

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

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

campo no halo

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

parâmetros

$$B_0 = 2 \mu\text{G} \quad R_0 = 9 \quad R = 8,5 \text{ kpc}$$

$$z_0 = 1 \text{ kpc}$$

$$\text{kpc } r < 6$$

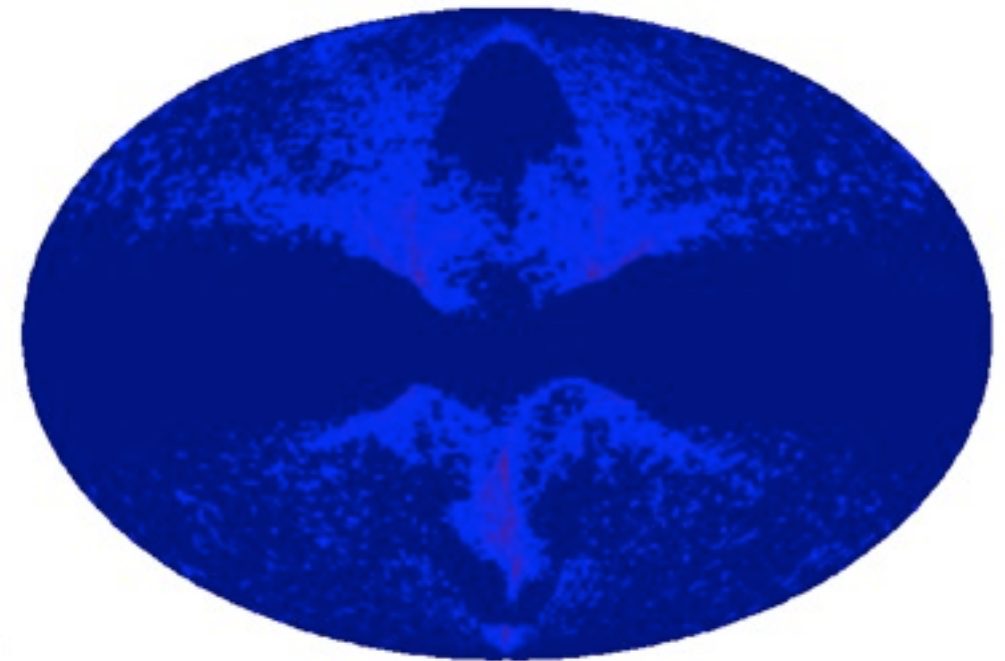
$$p = -10^\circ \text{ se } r < 6$$

$$R_0 = 6 \text{ kpc } r > 6$$

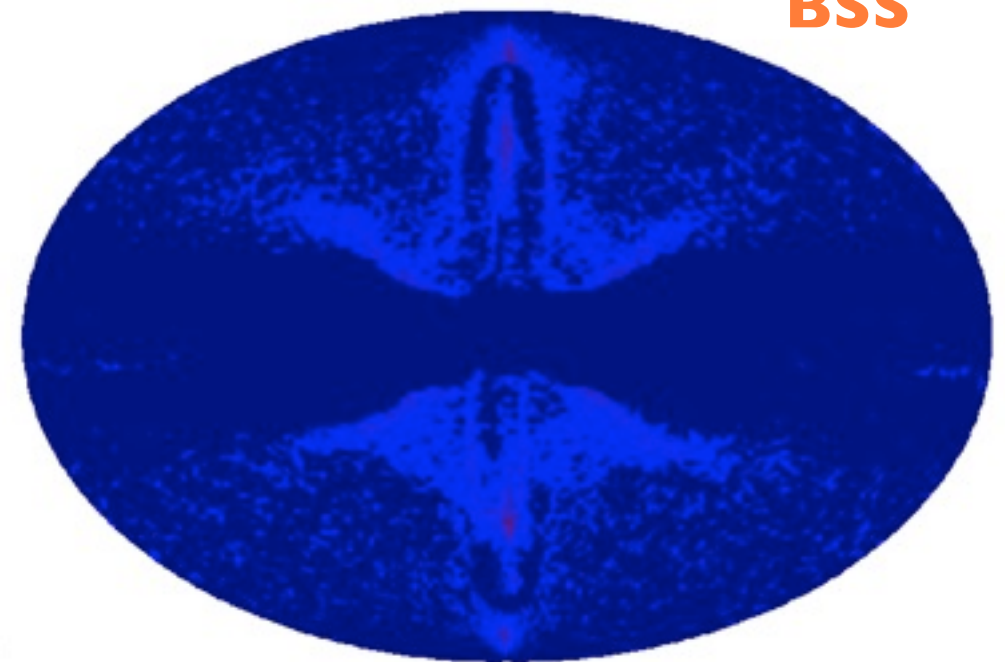
$$p = -15^\circ \text{ p/ } r > 6$$



ASS+RING



BSS



simulações realizadas

fontes I

- ♦ $l = -180^\circ, -165^\circ, \dots, 0^\circ, 15^\circ, \dots, 180^\circ$
- ♦ $b = -10^\circ, 0^\circ, 10^\circ$

fontes II

- ♦ $l = -180^\circ, -135^\circ, \dots, 0^\circ, 45^\circ, \dots, 180^\circ$
- ♦ $b = -90^\circ, -45^\circ, 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$

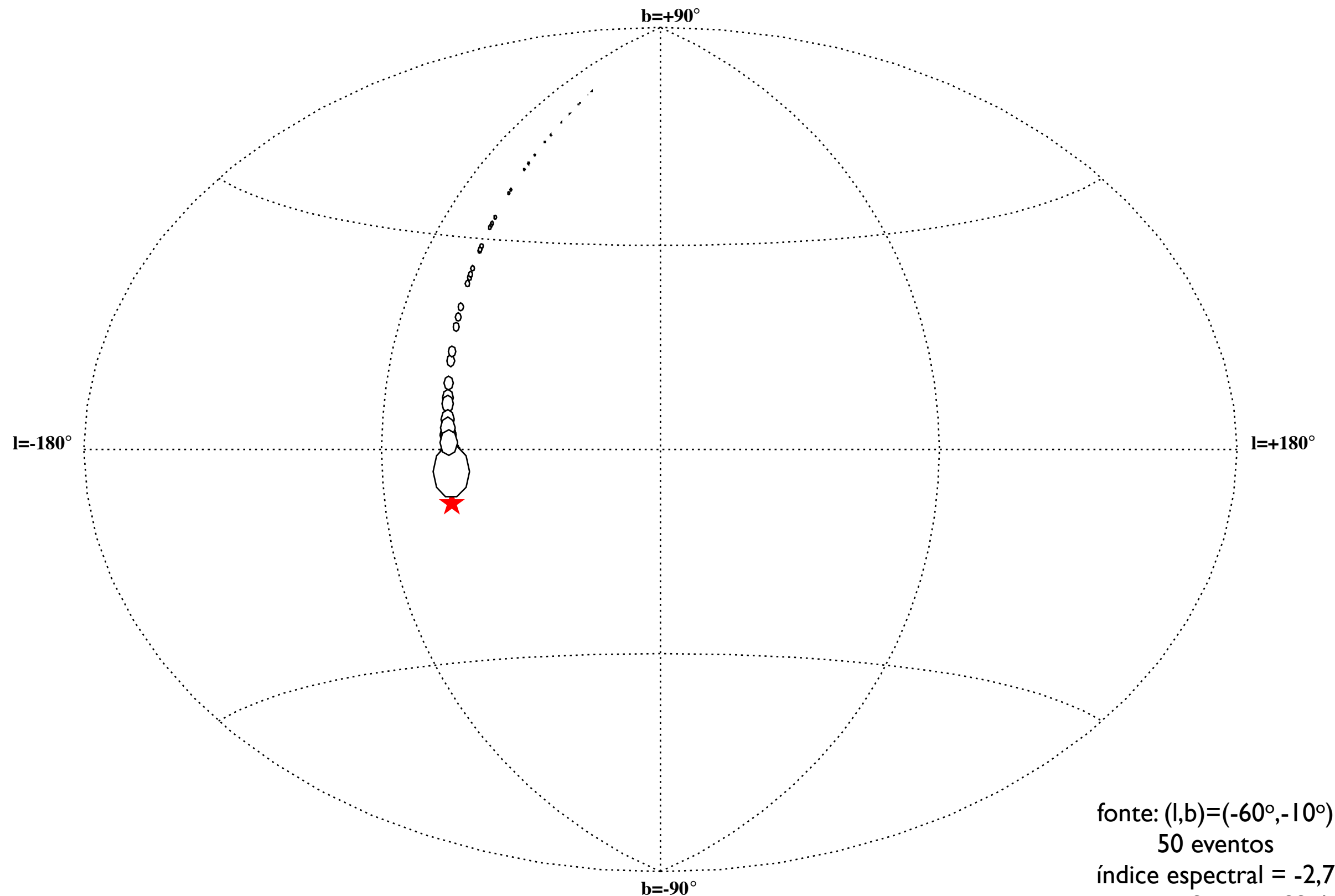
campos

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

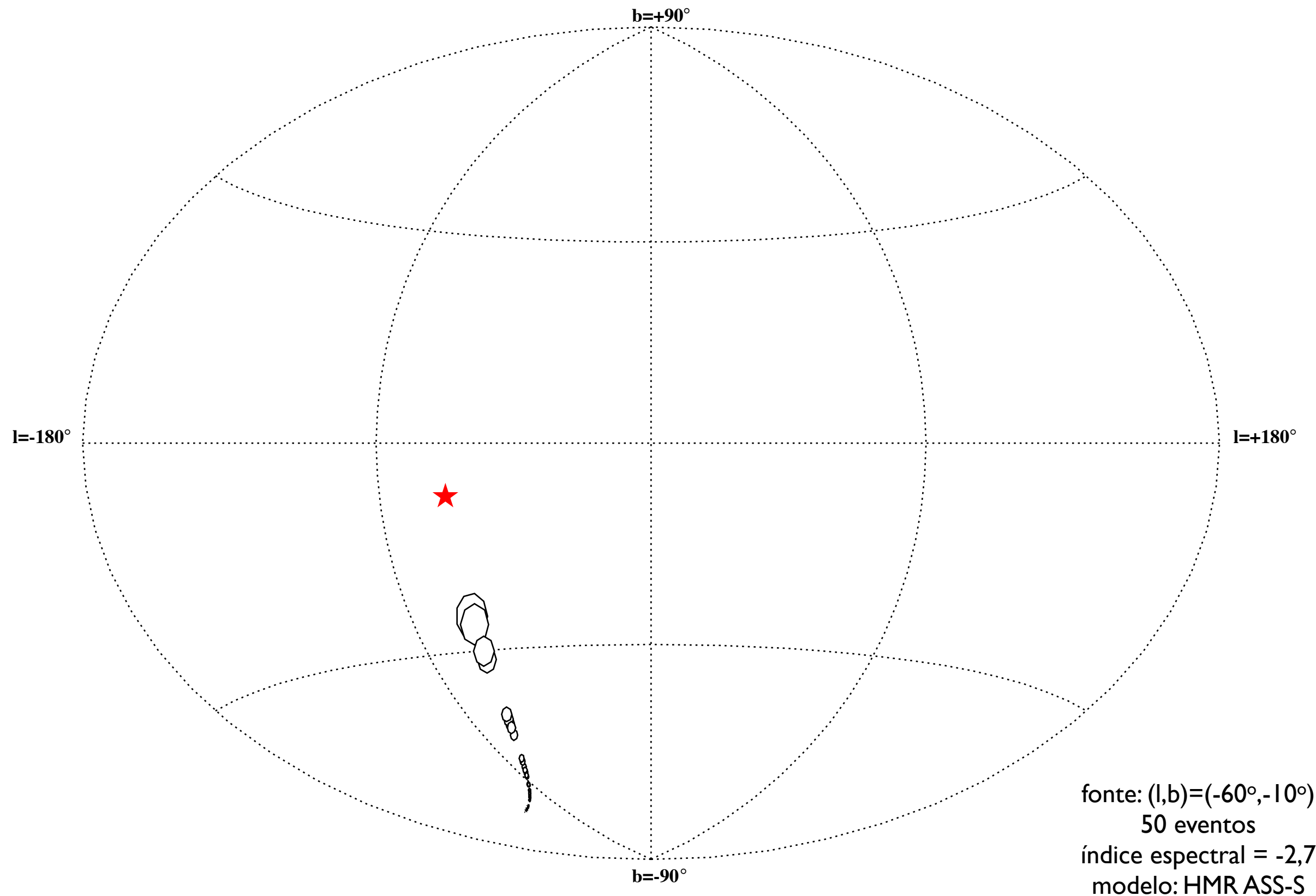
informações eventos

- ♦ 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

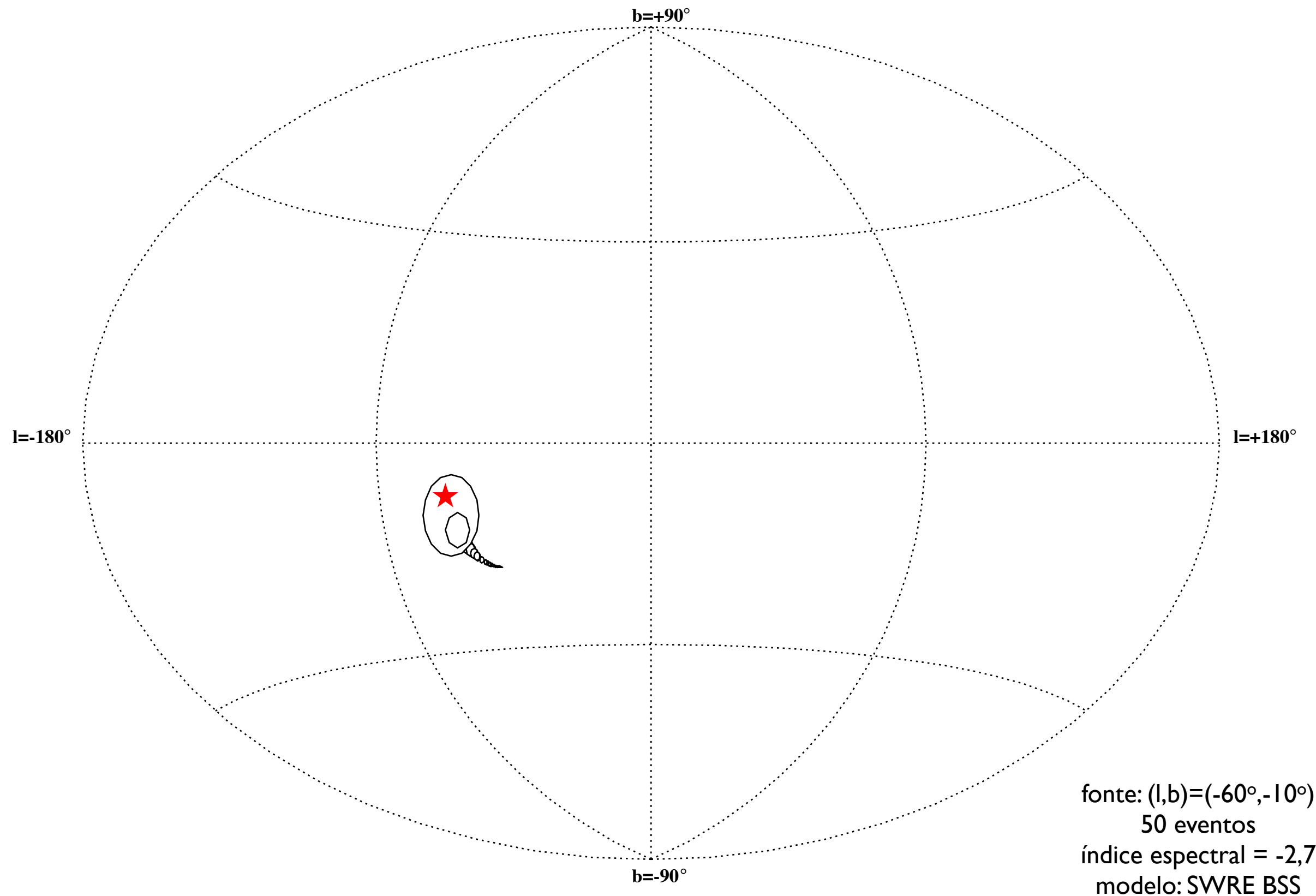
simulações ilustrativas



simulações ilustrativas

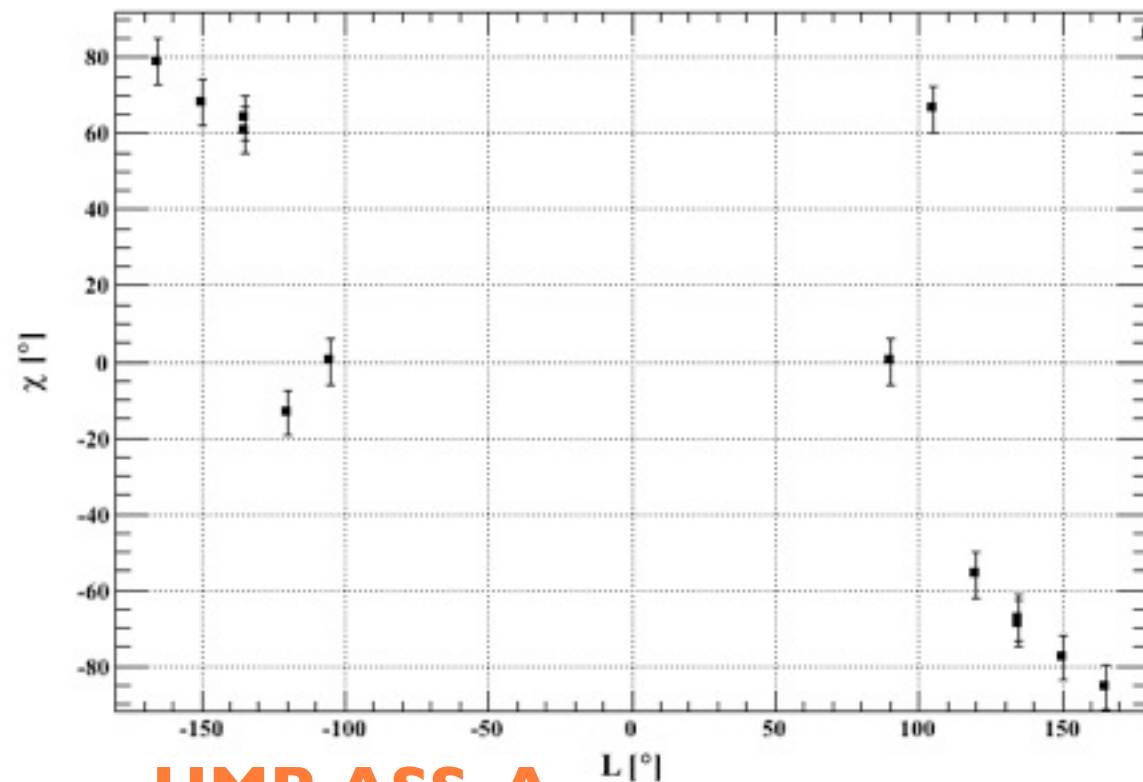


simulações ilustrativas

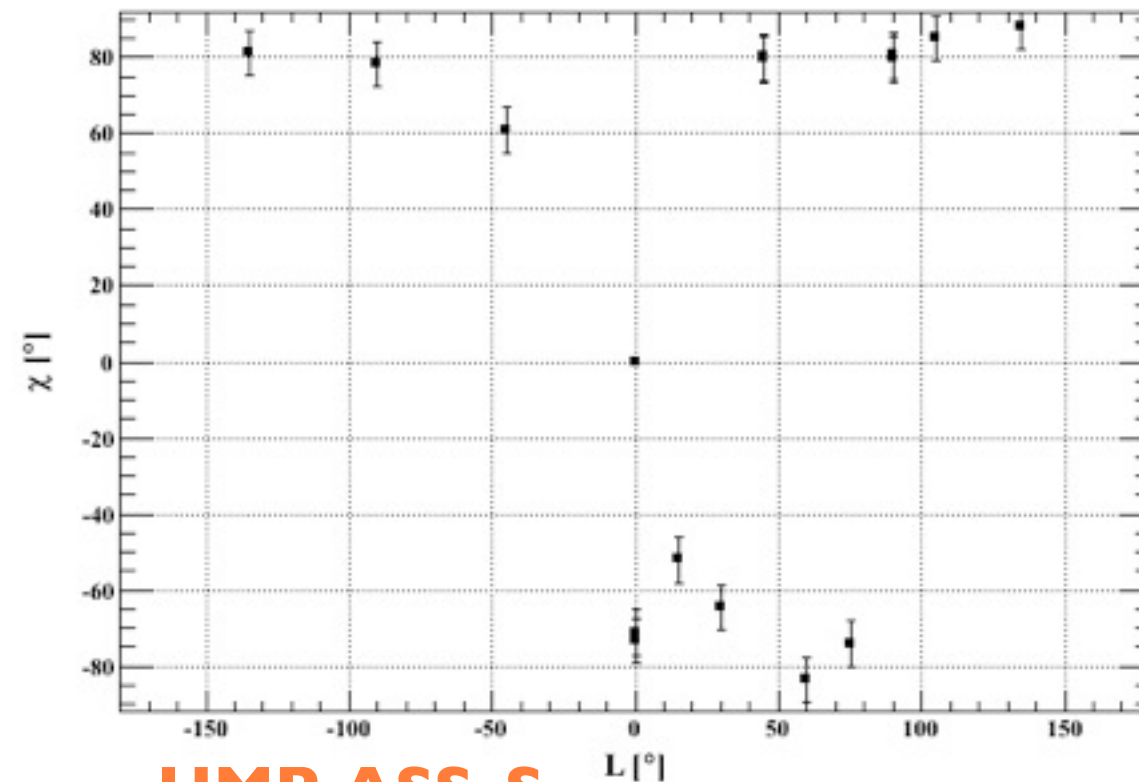


orientações dos multipletos ($b=0^\circ$)

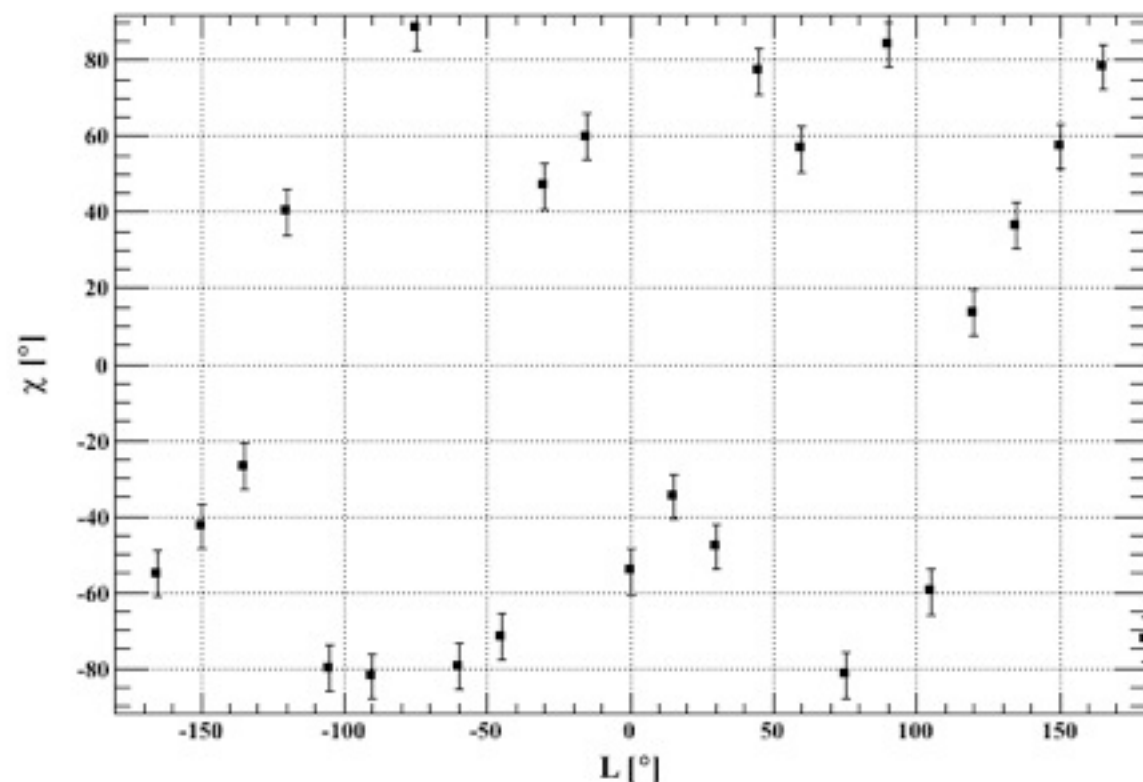
Stanev ASS-A



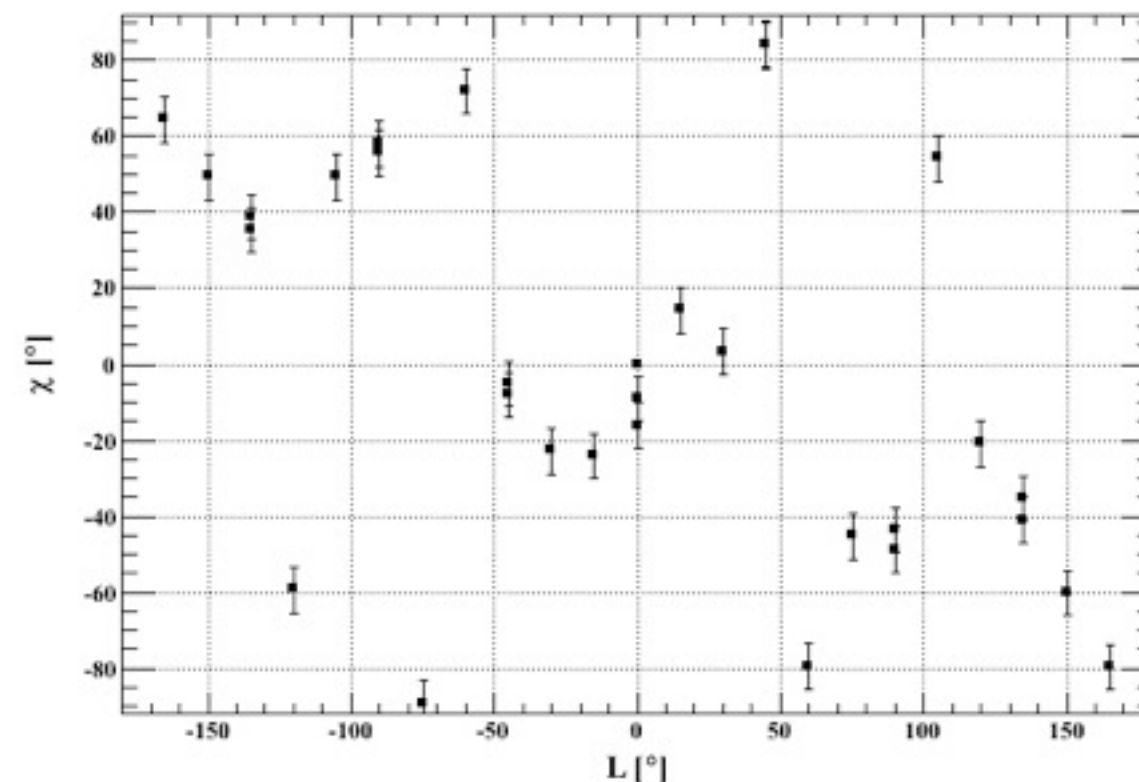
Stanev BSS-S



HMR ASS-A

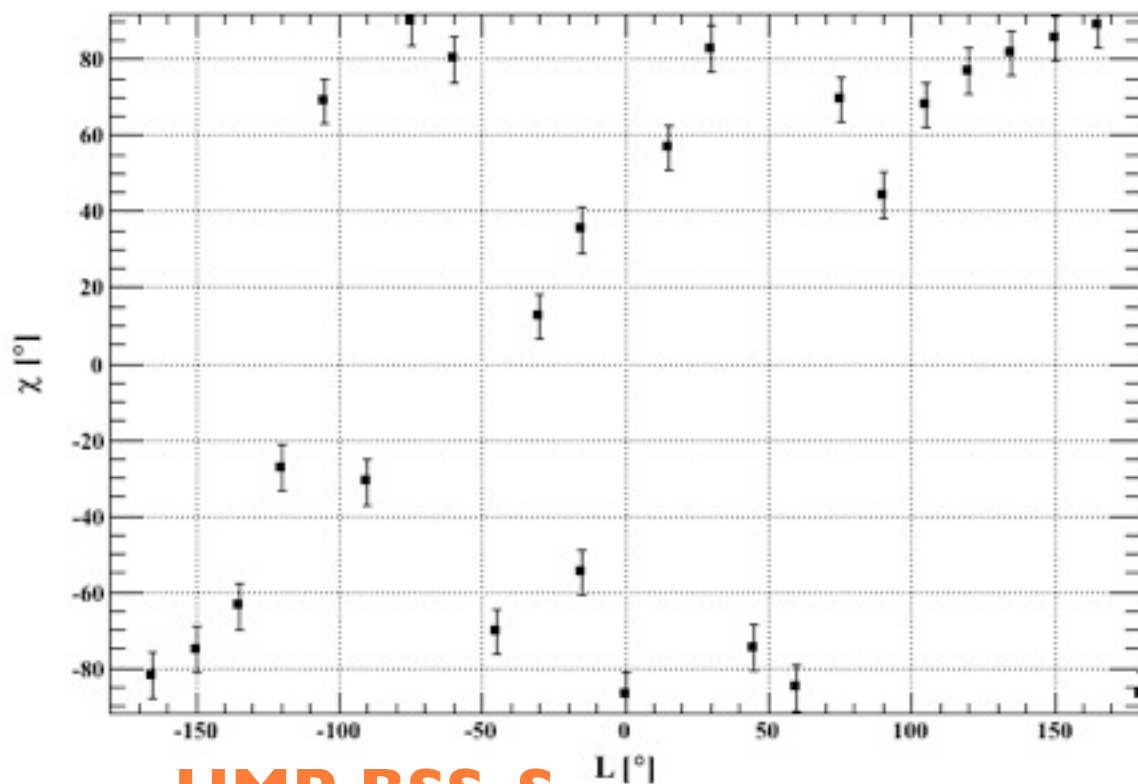


HMR ASS-S

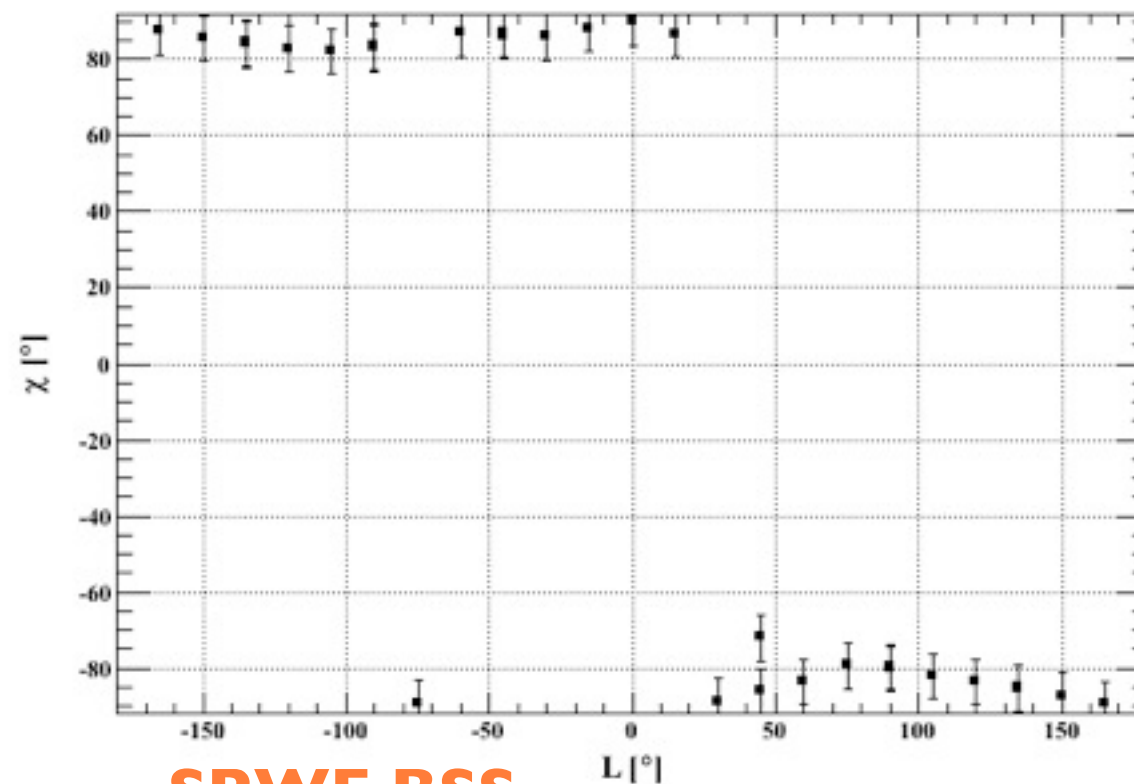


orientações dos multipletos ($b=0^\circ$)

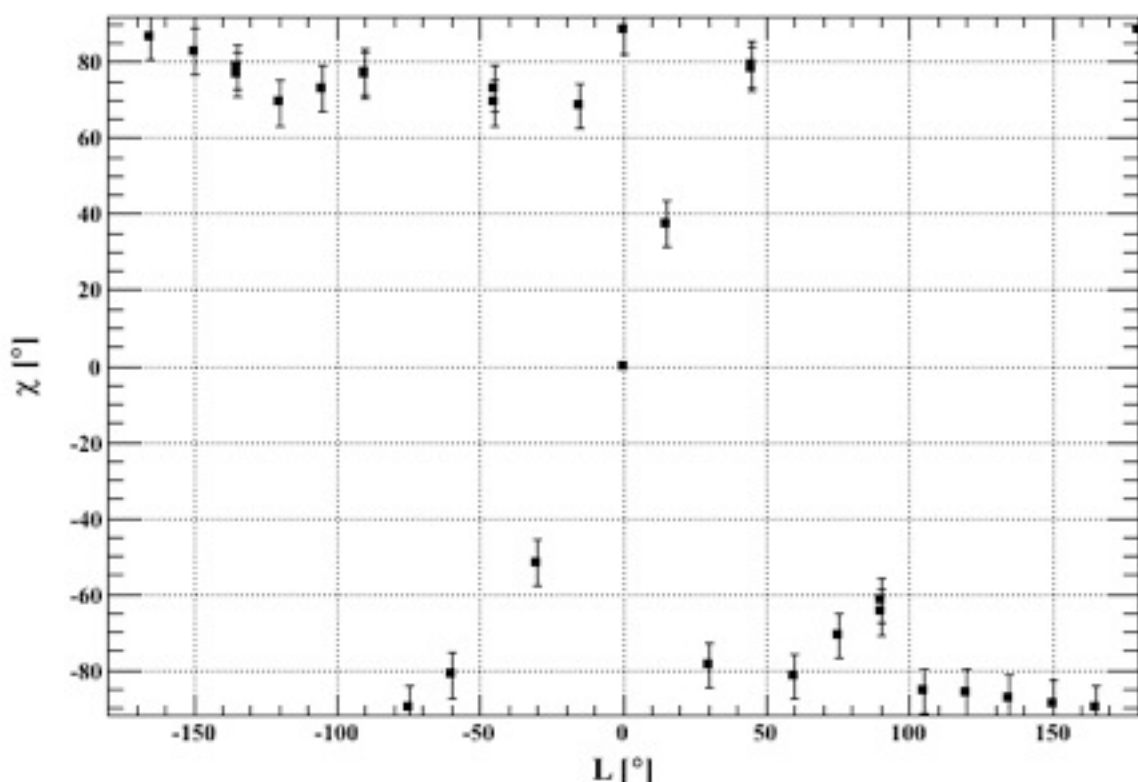
HMR BSS-A



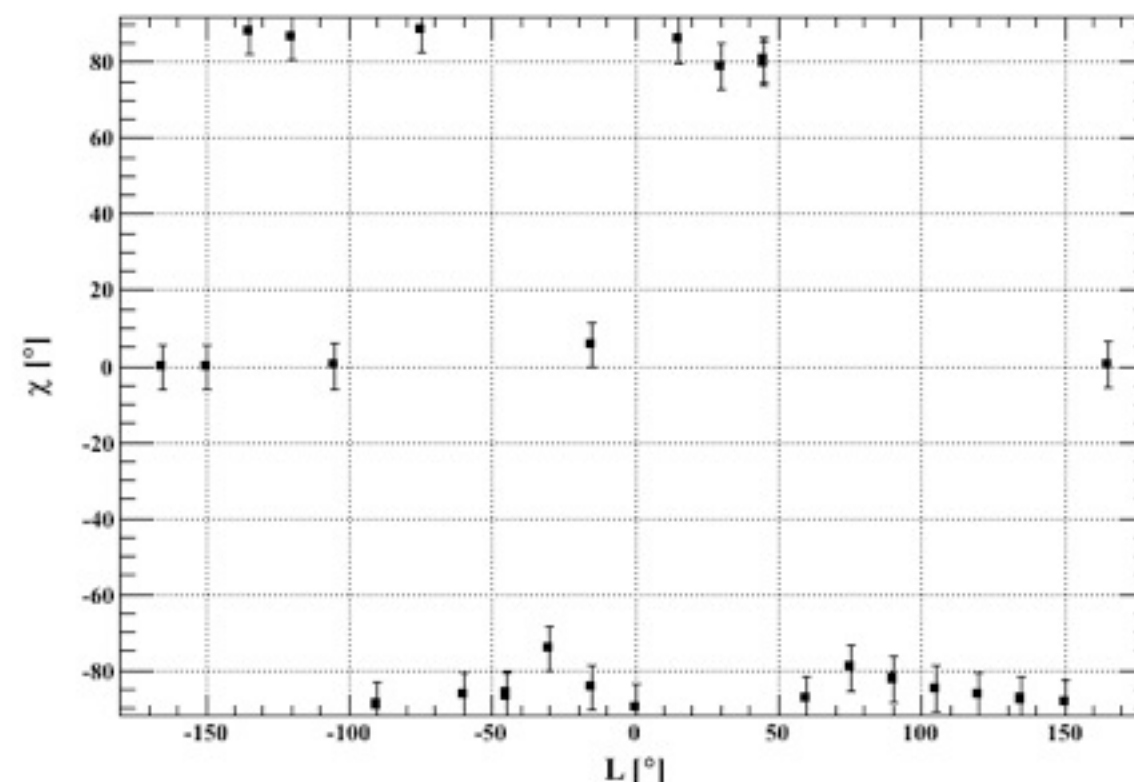
SRWE ASS+RING



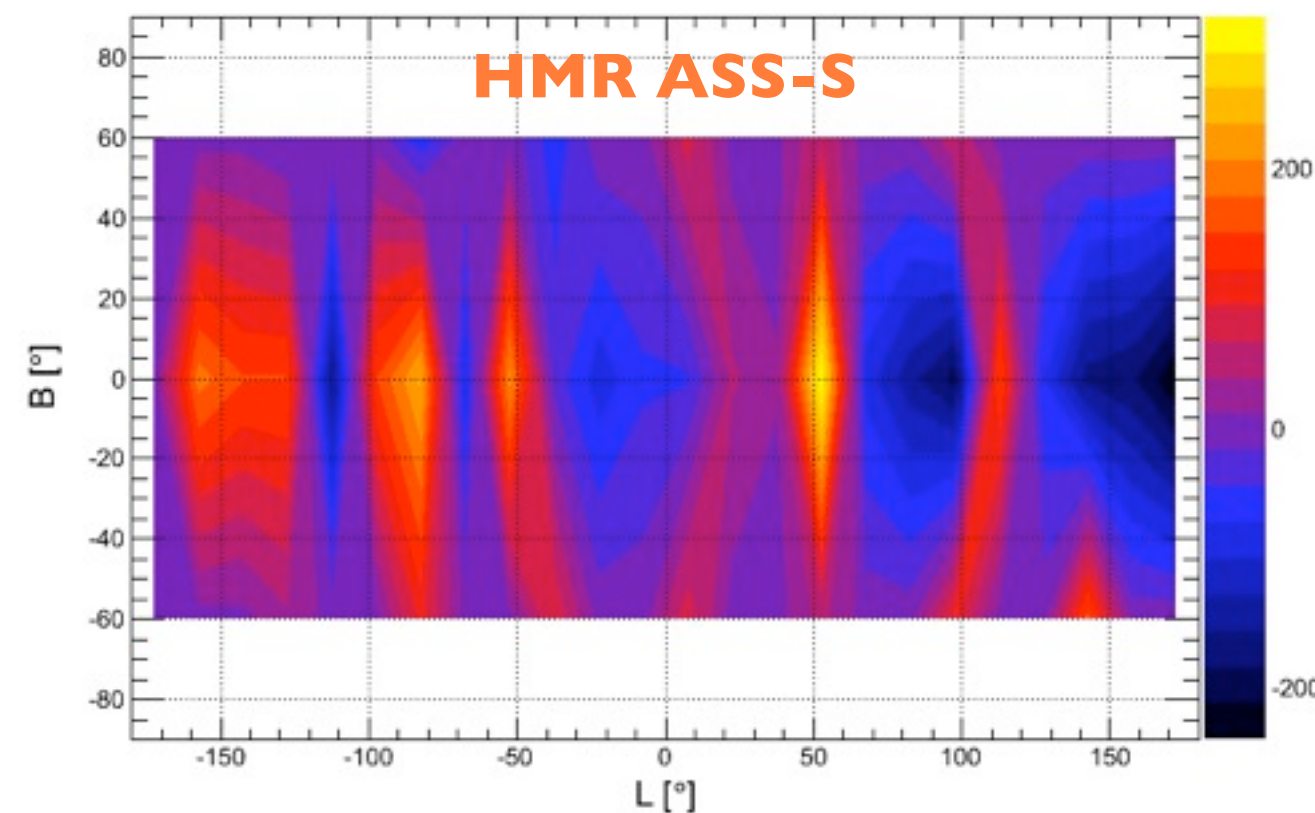
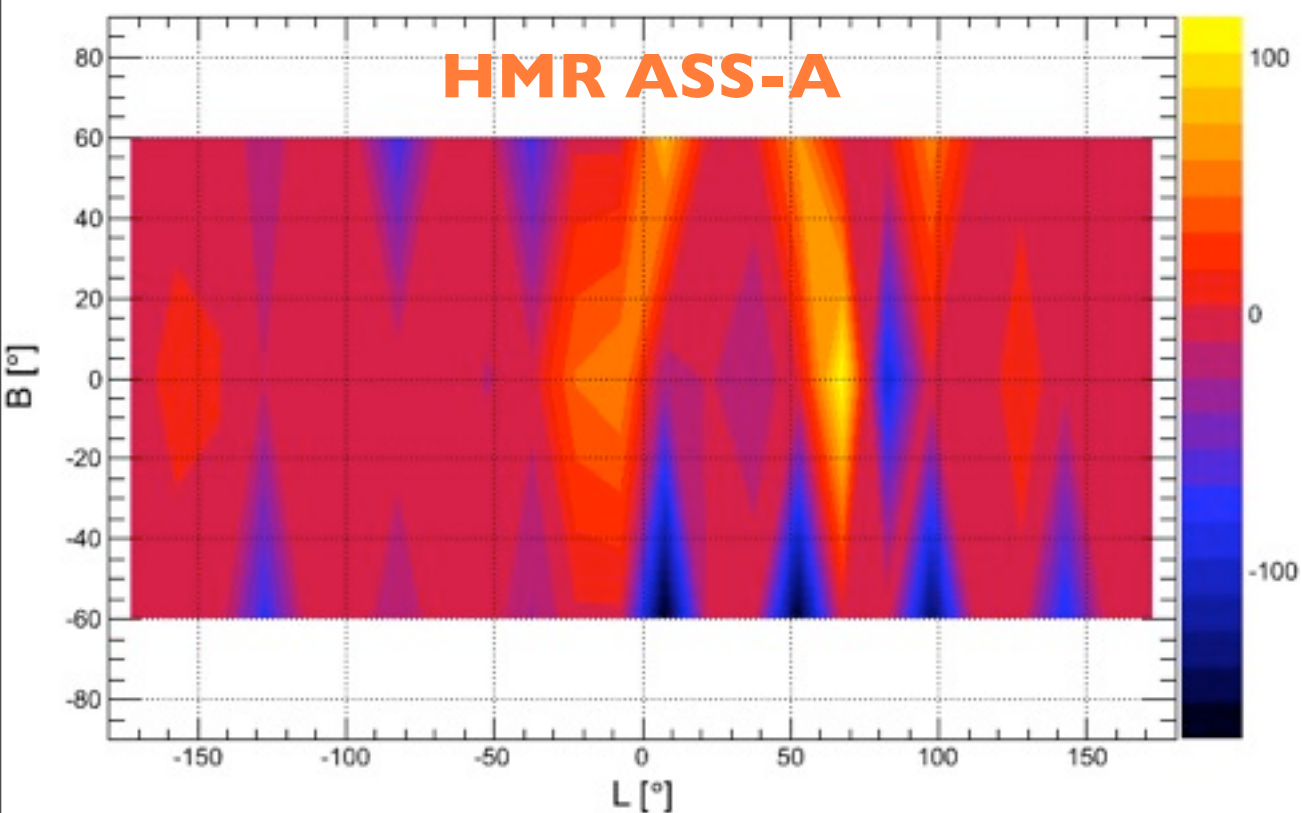
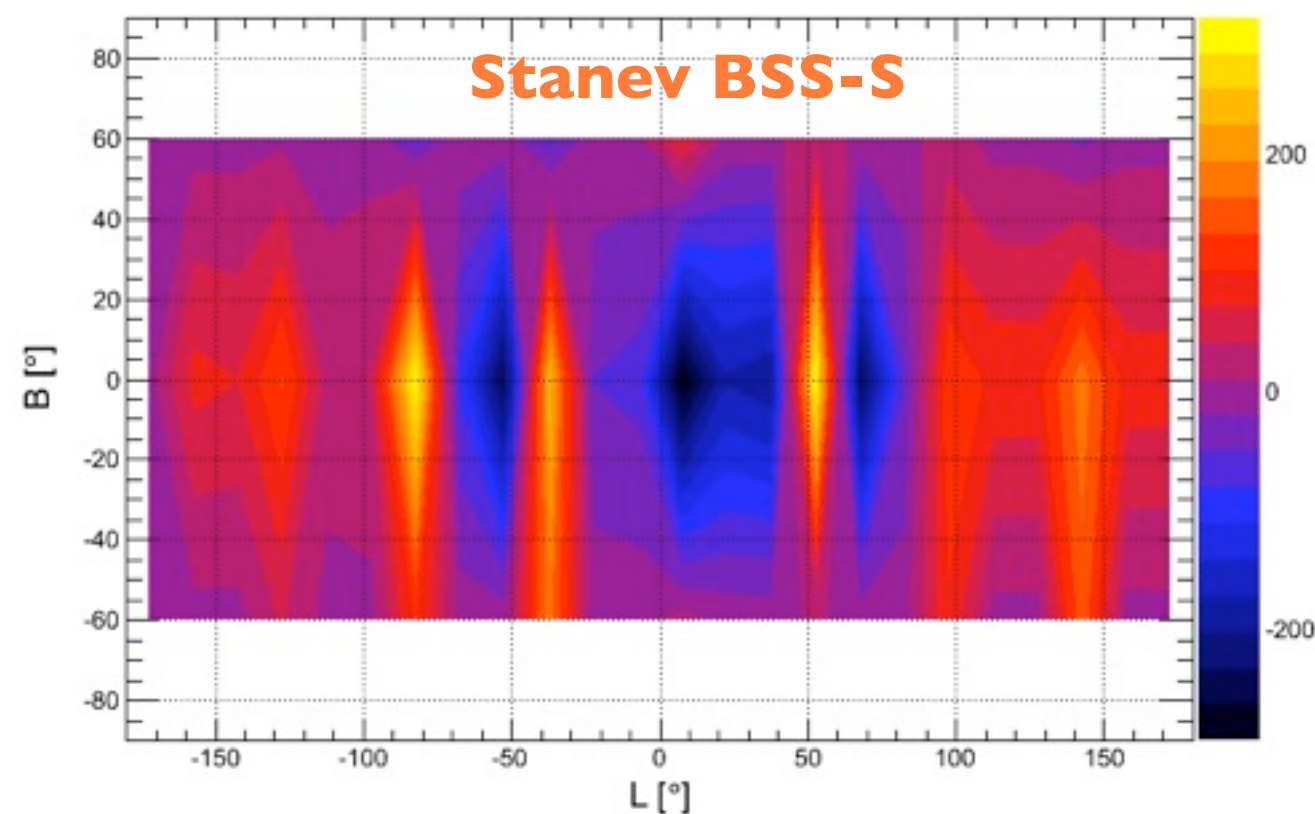
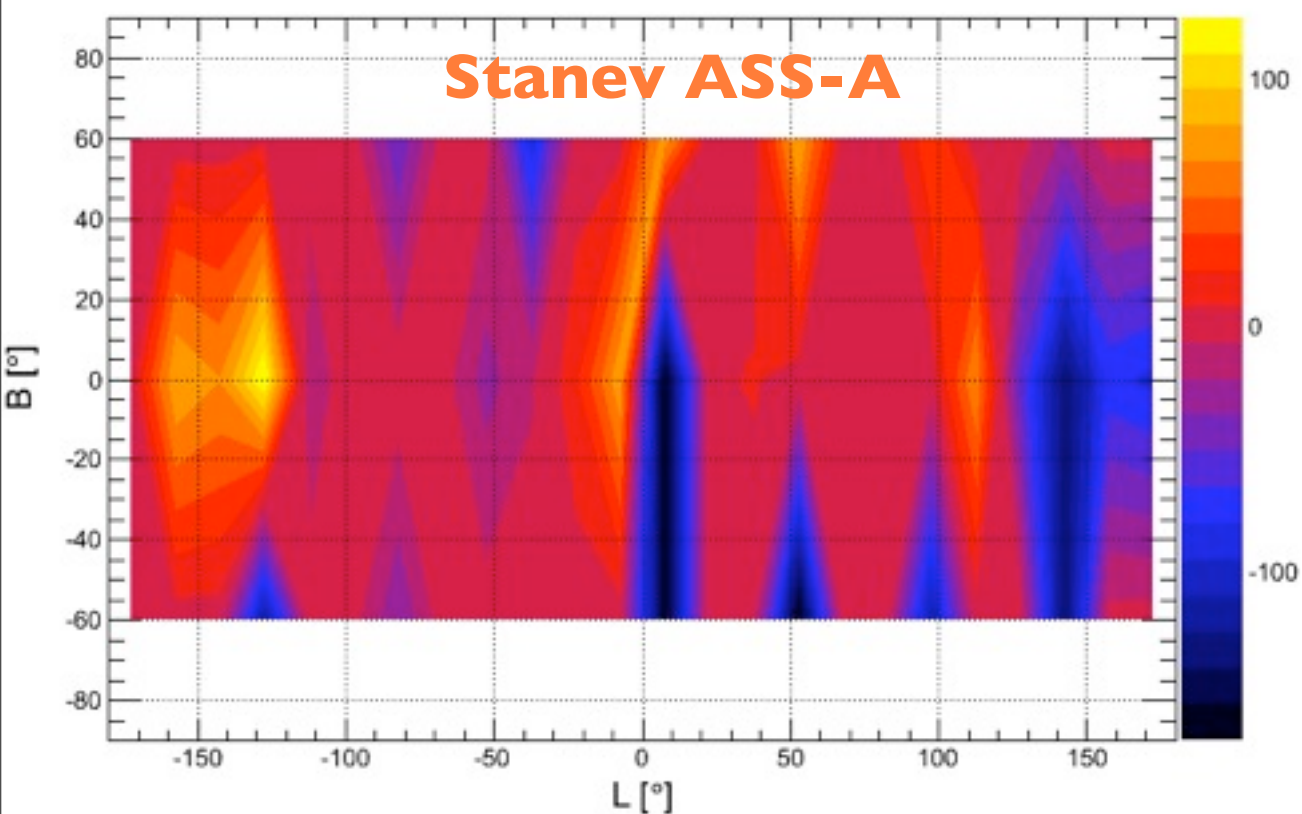
HMR BSS-S



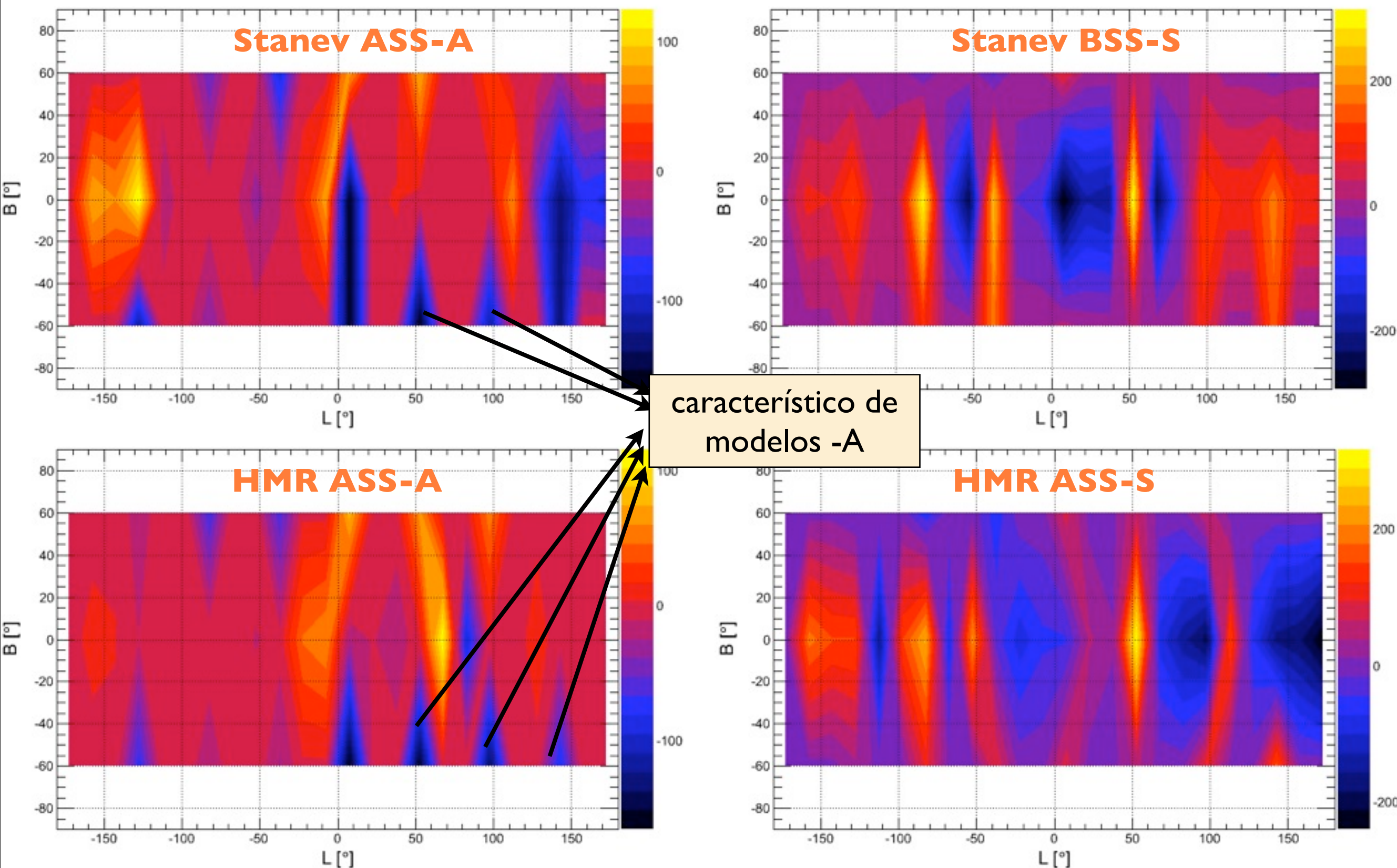
SRWE BSS



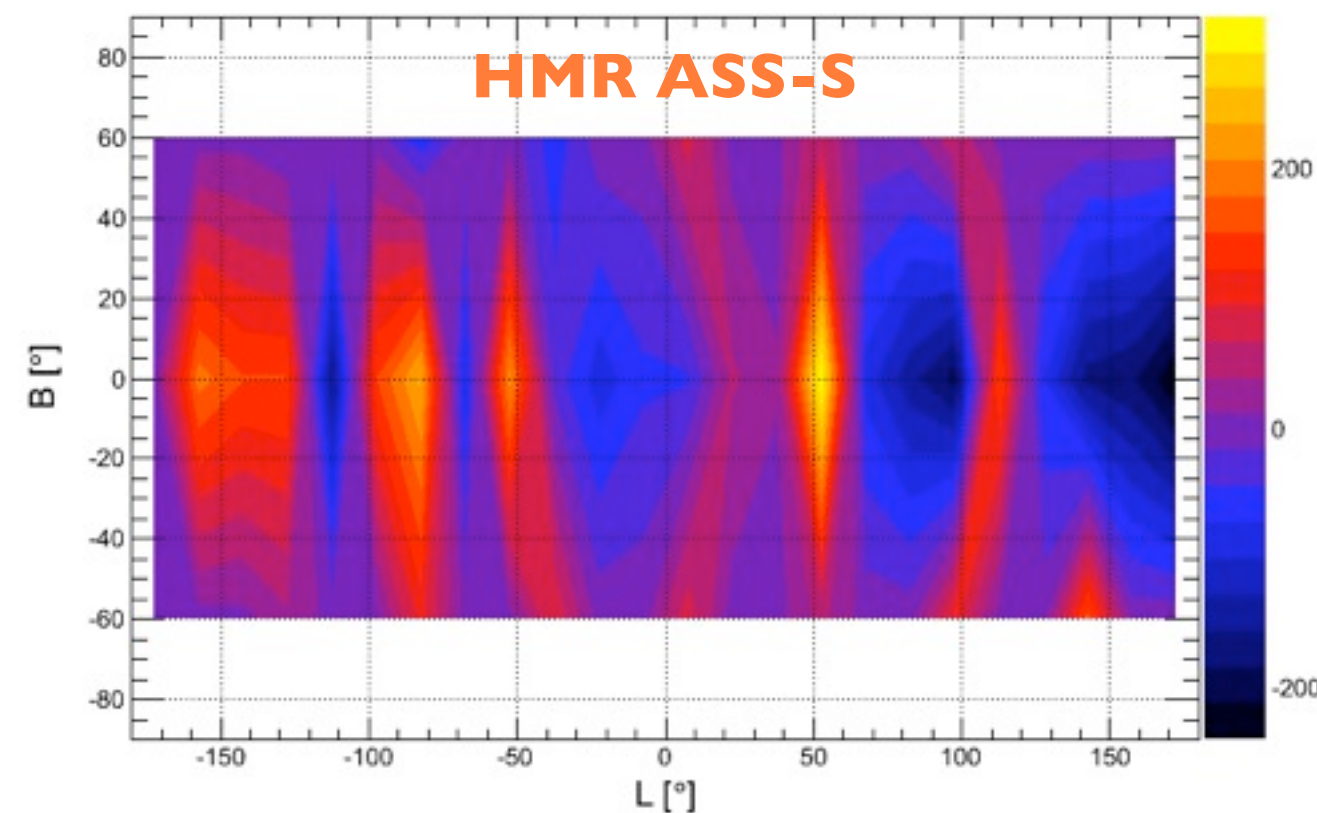
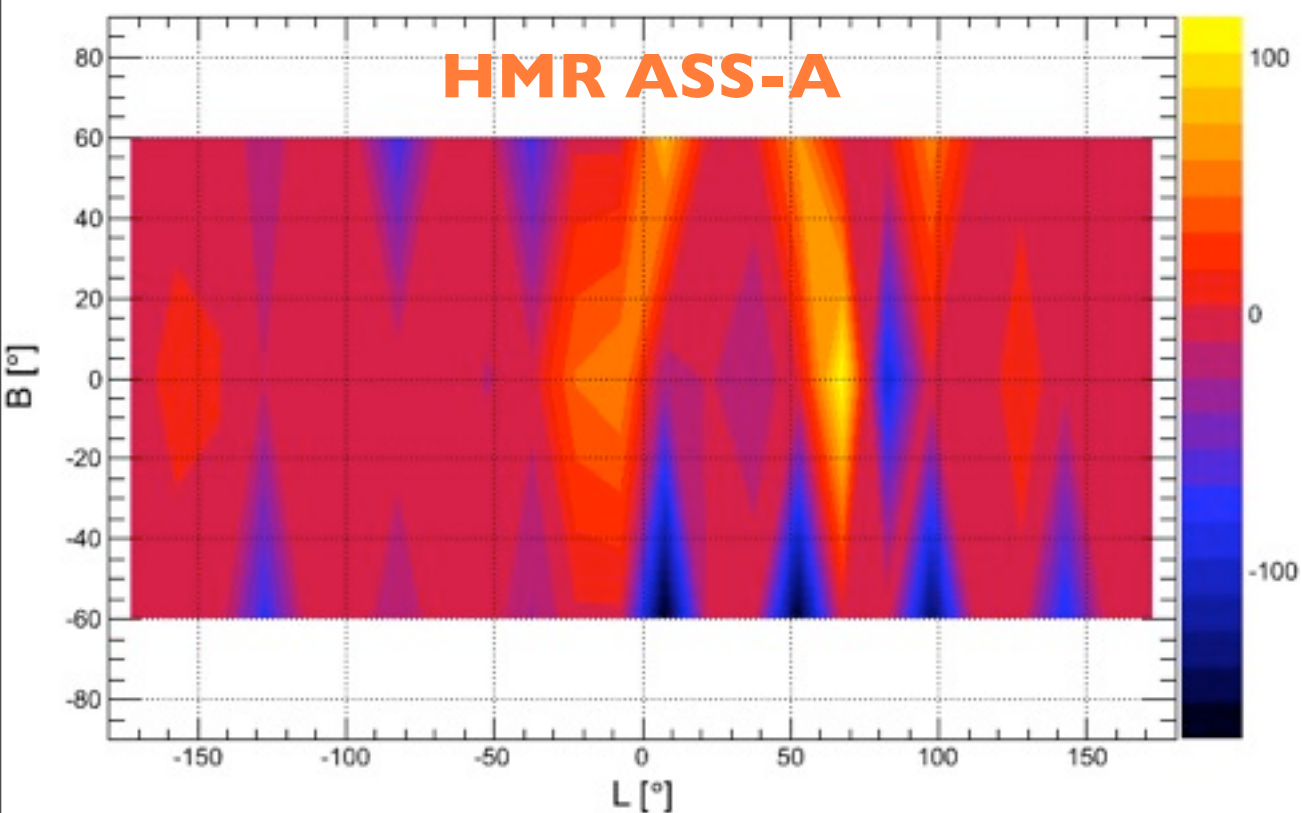
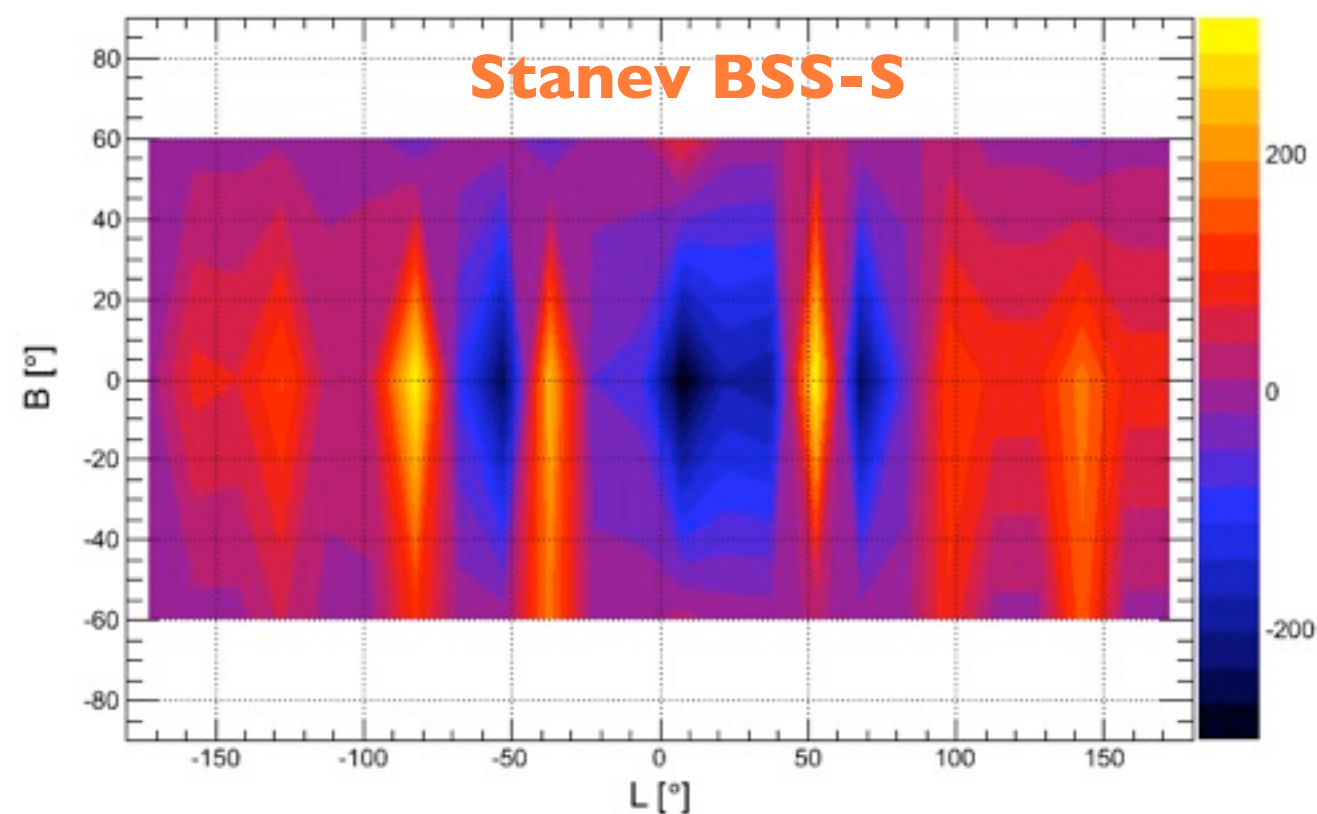
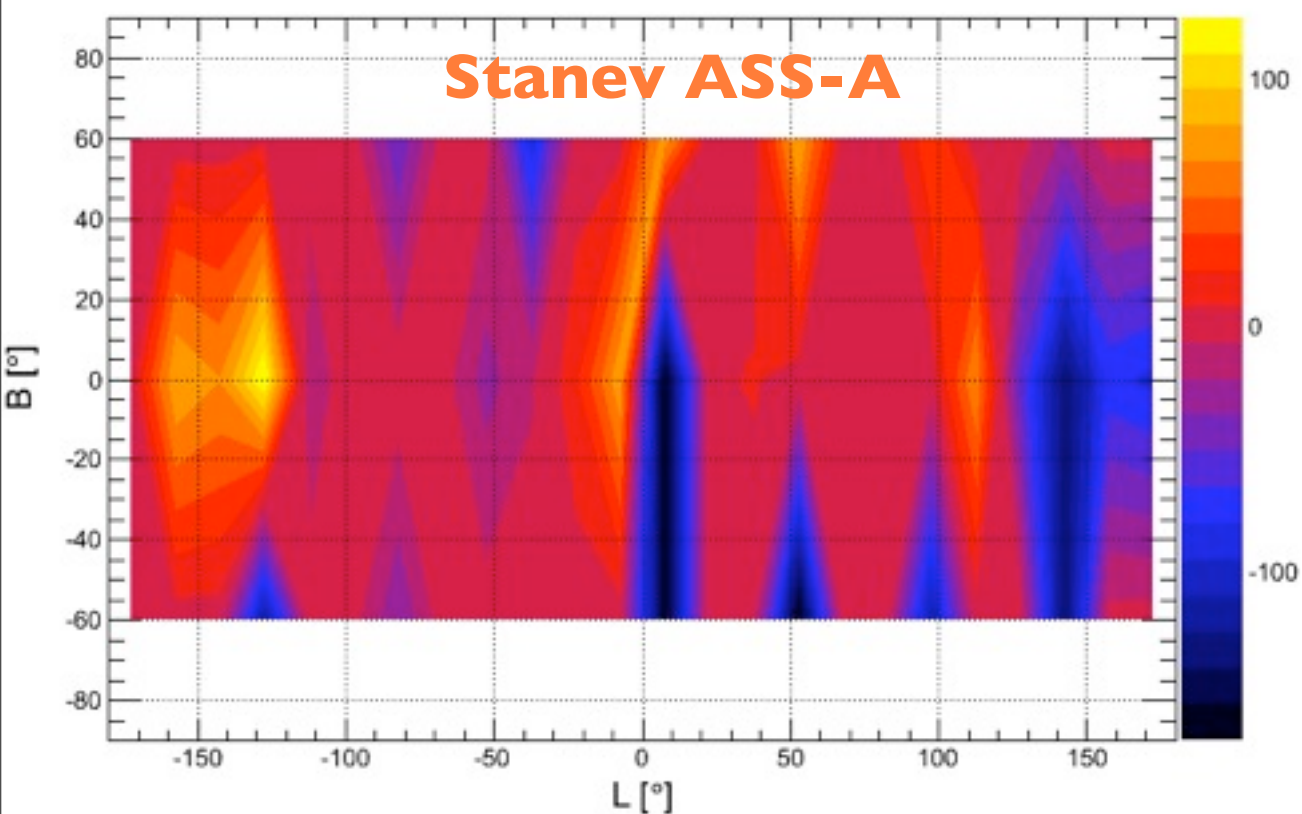
orientações dos multipletos - compilação



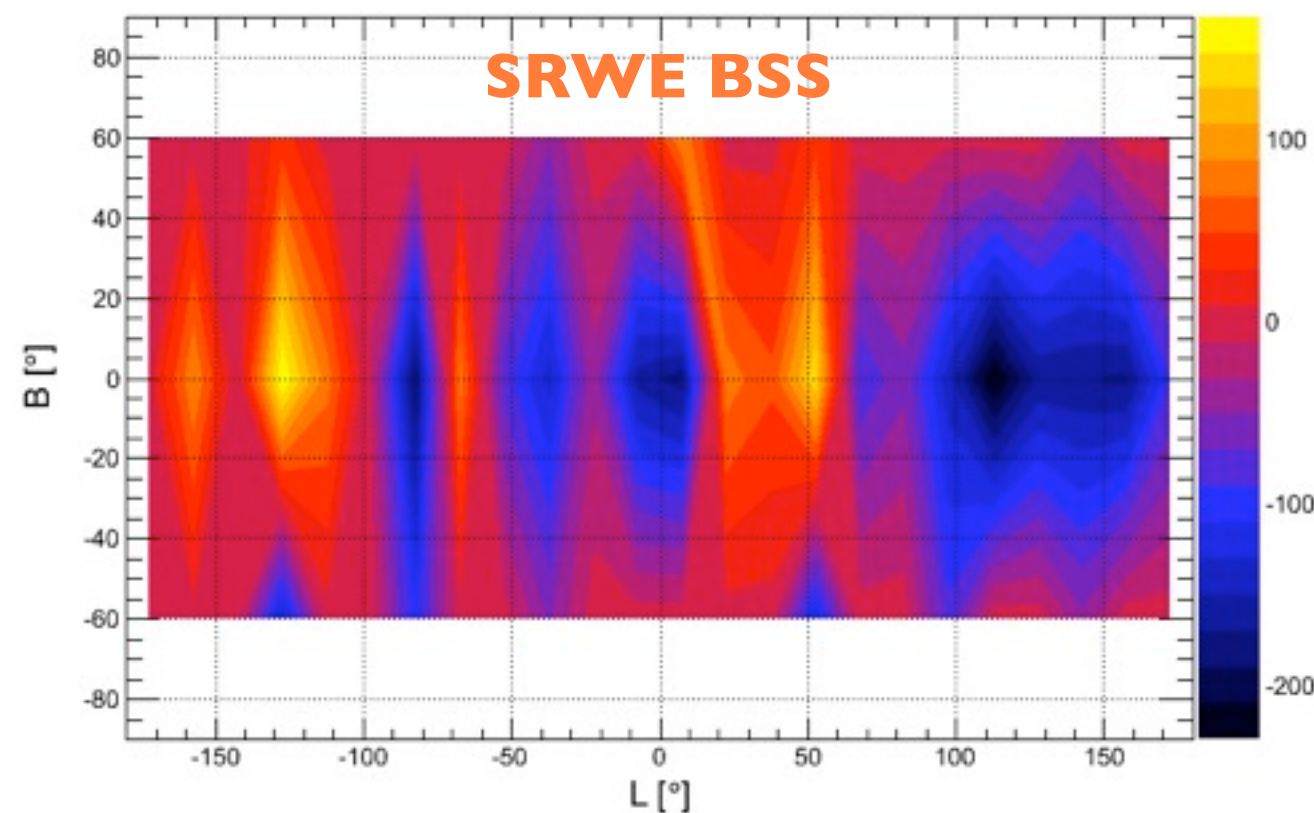
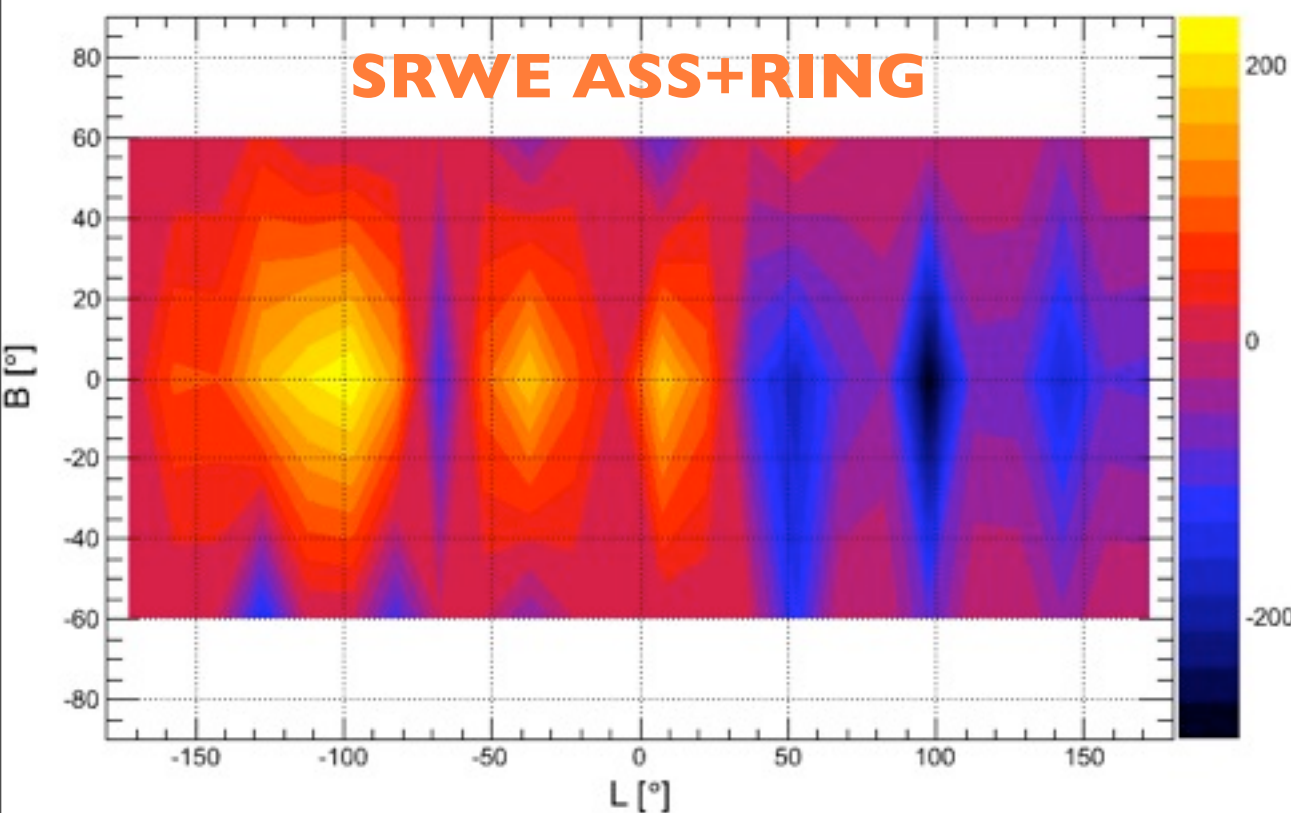
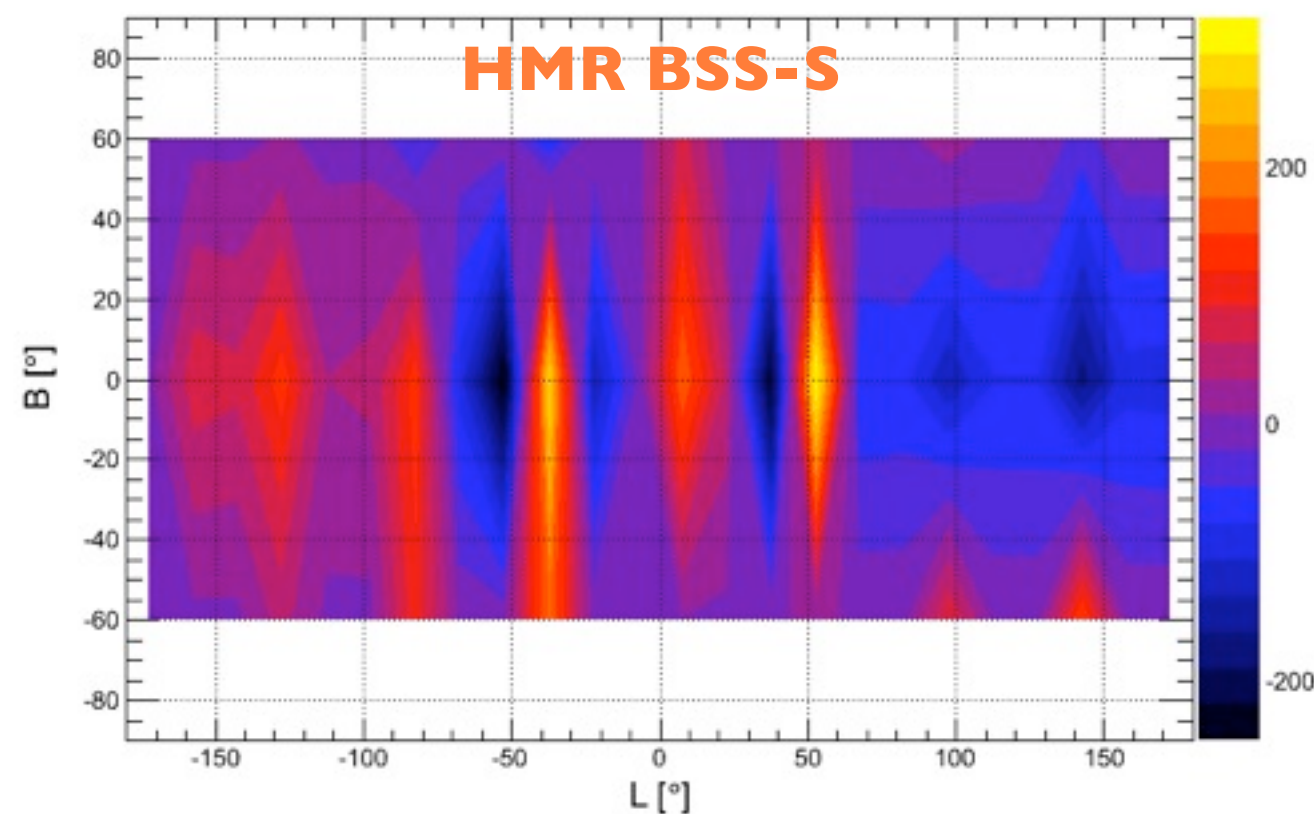
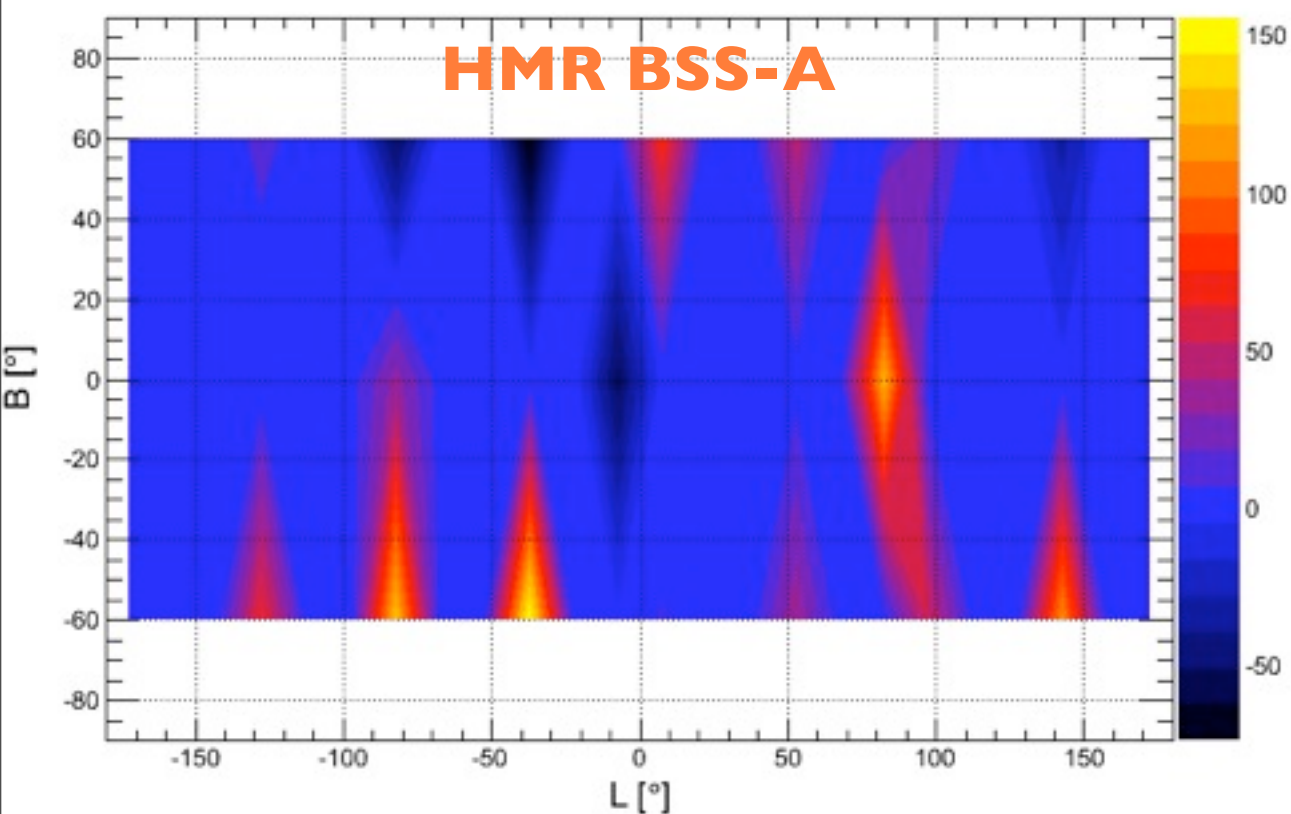
orientações dos multipletos - compilação



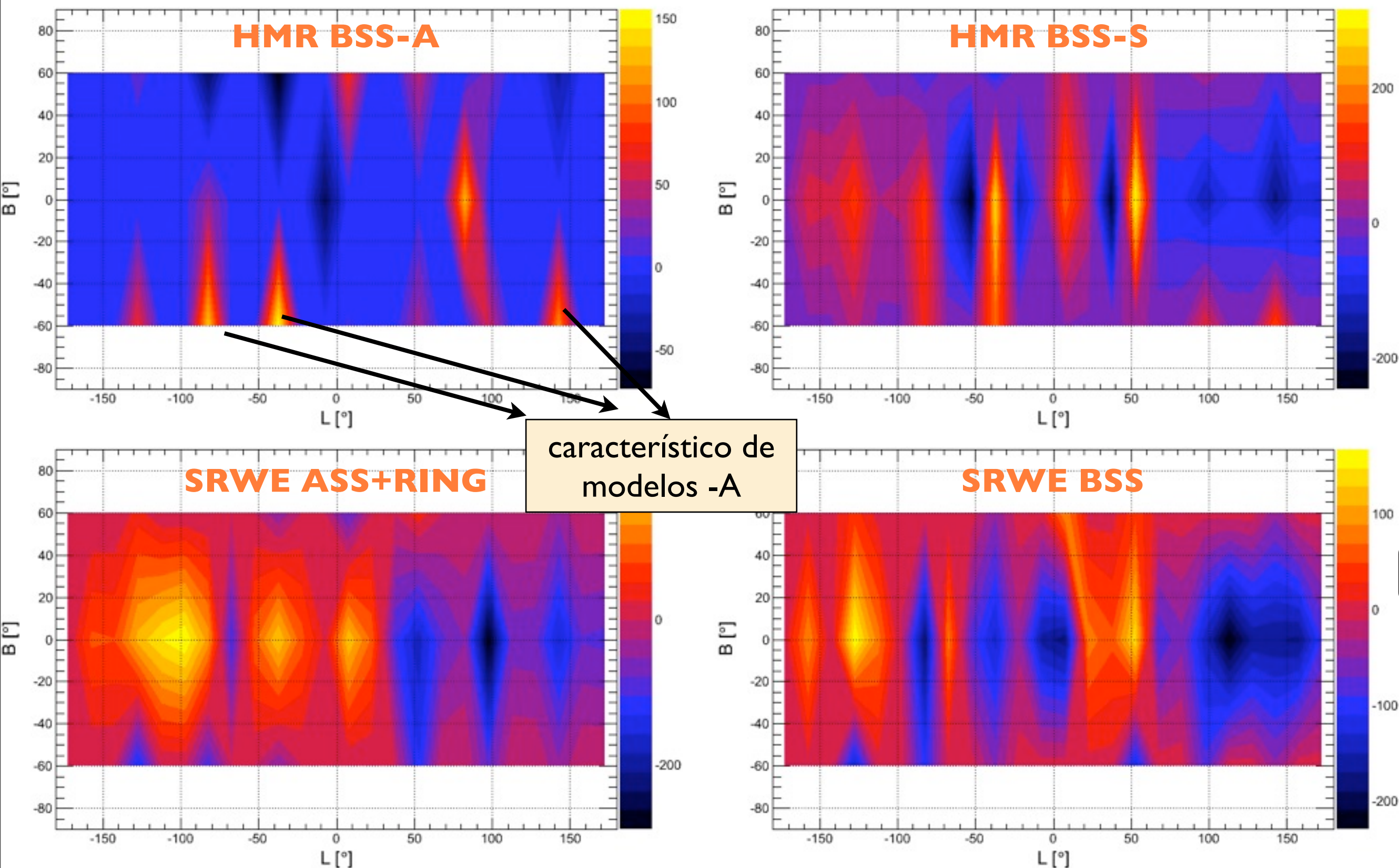
orientações dos multipletos - compilação



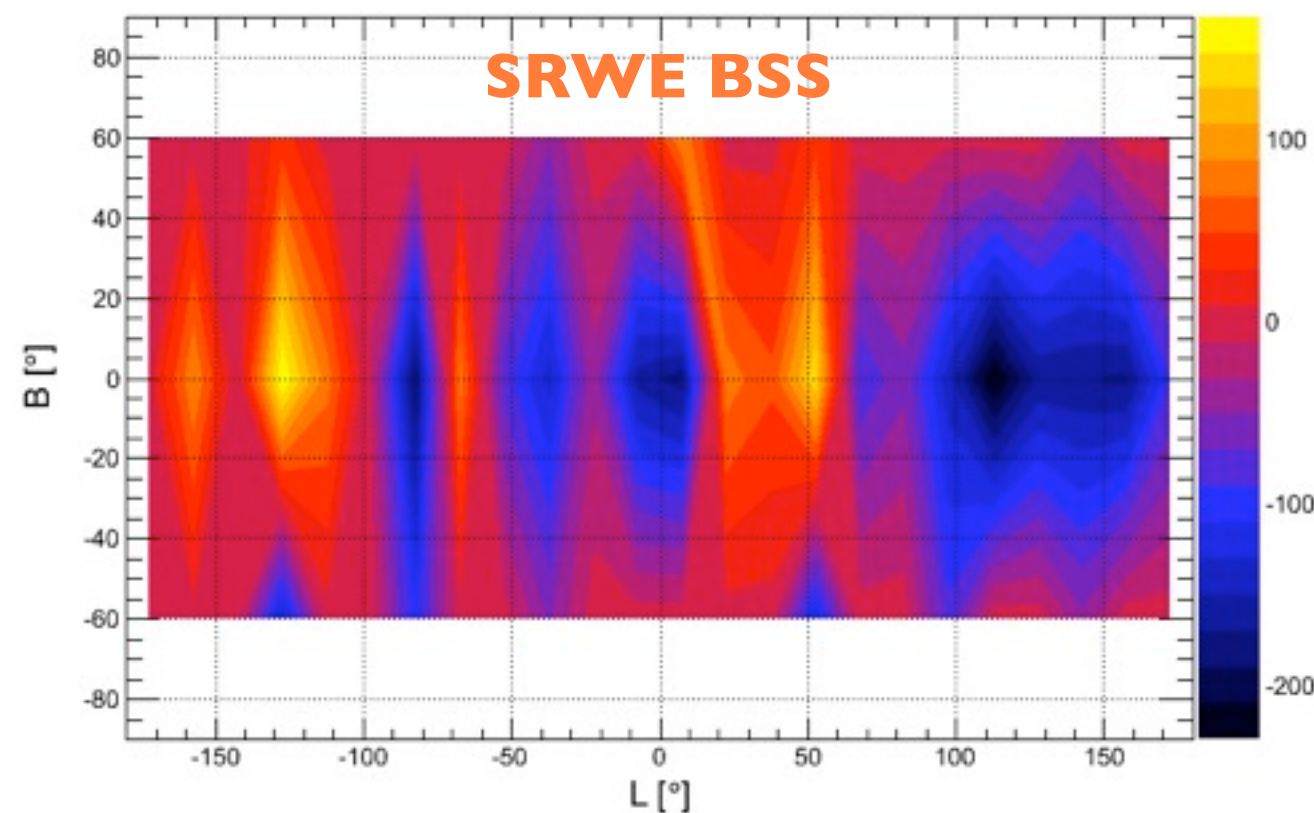
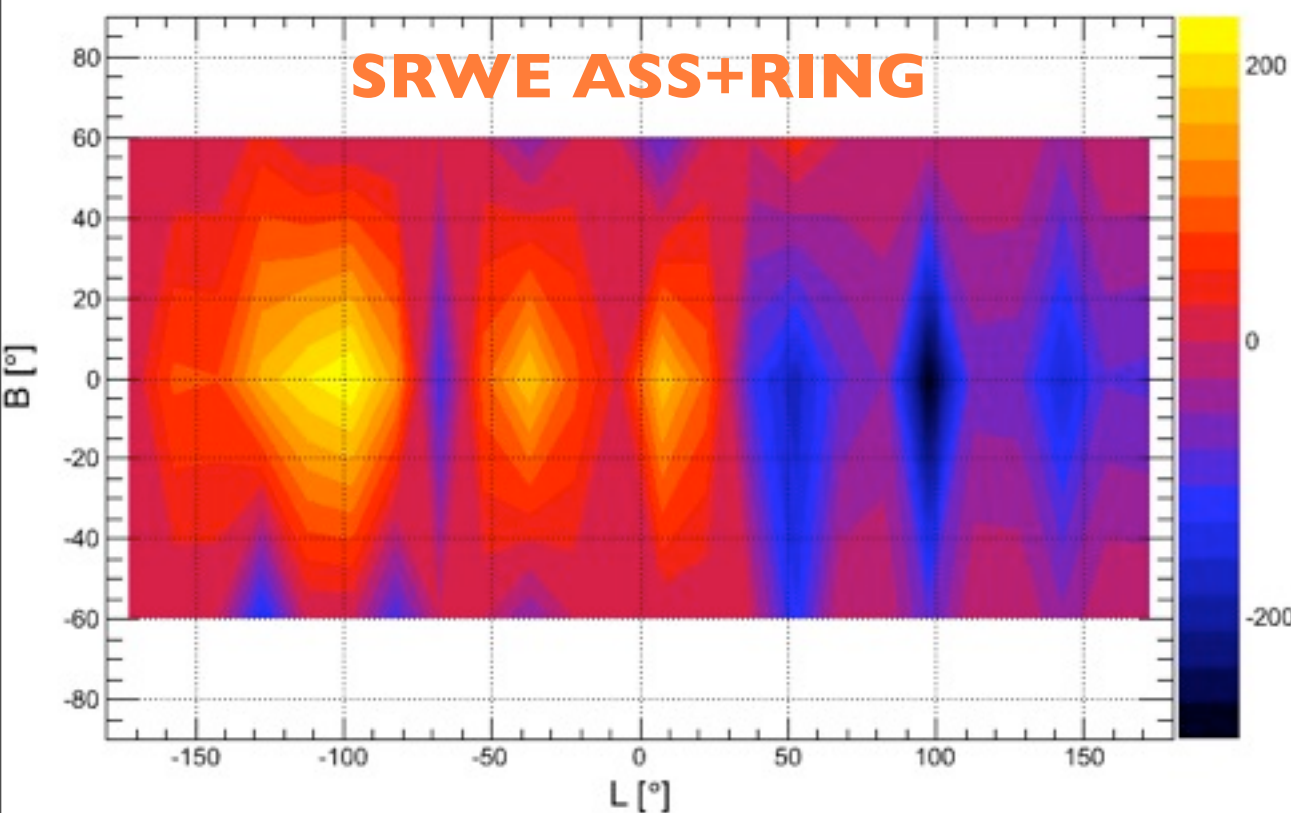
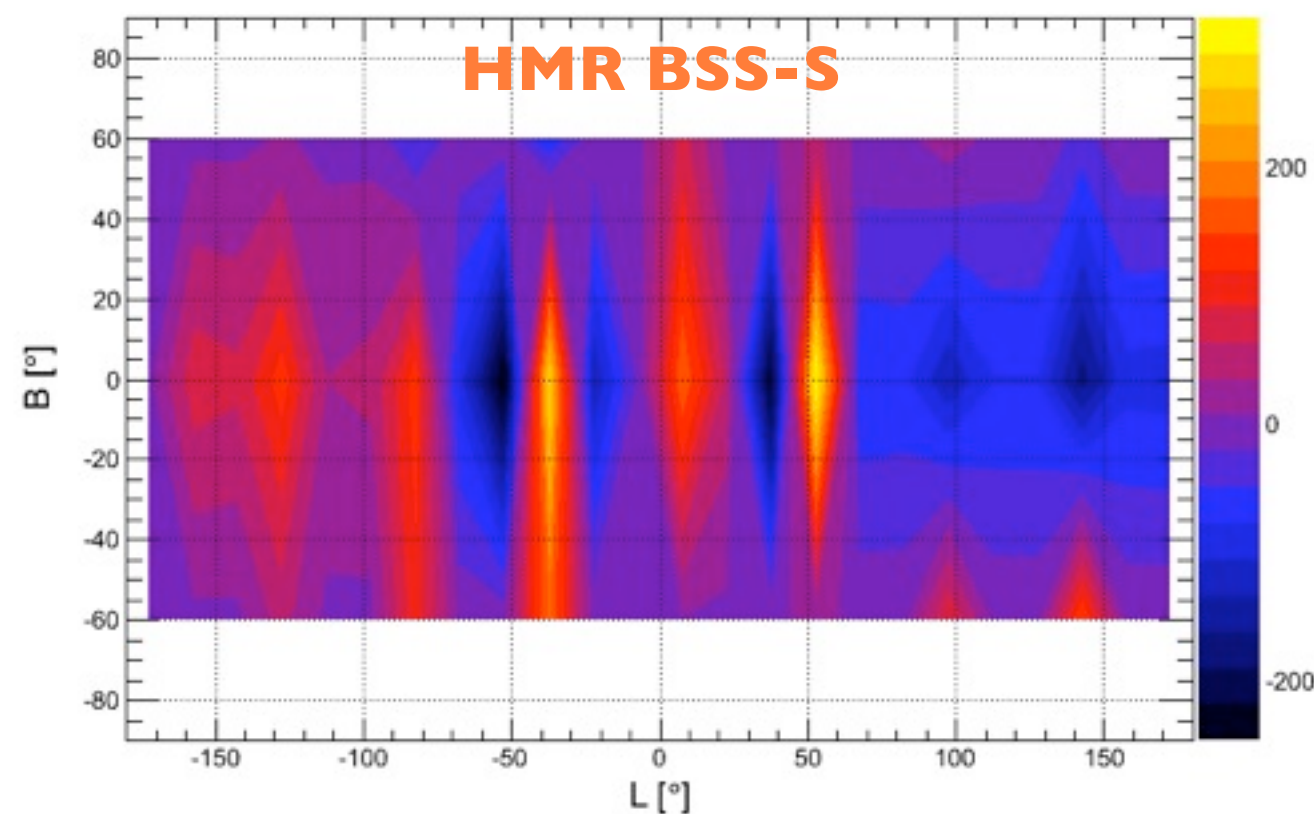
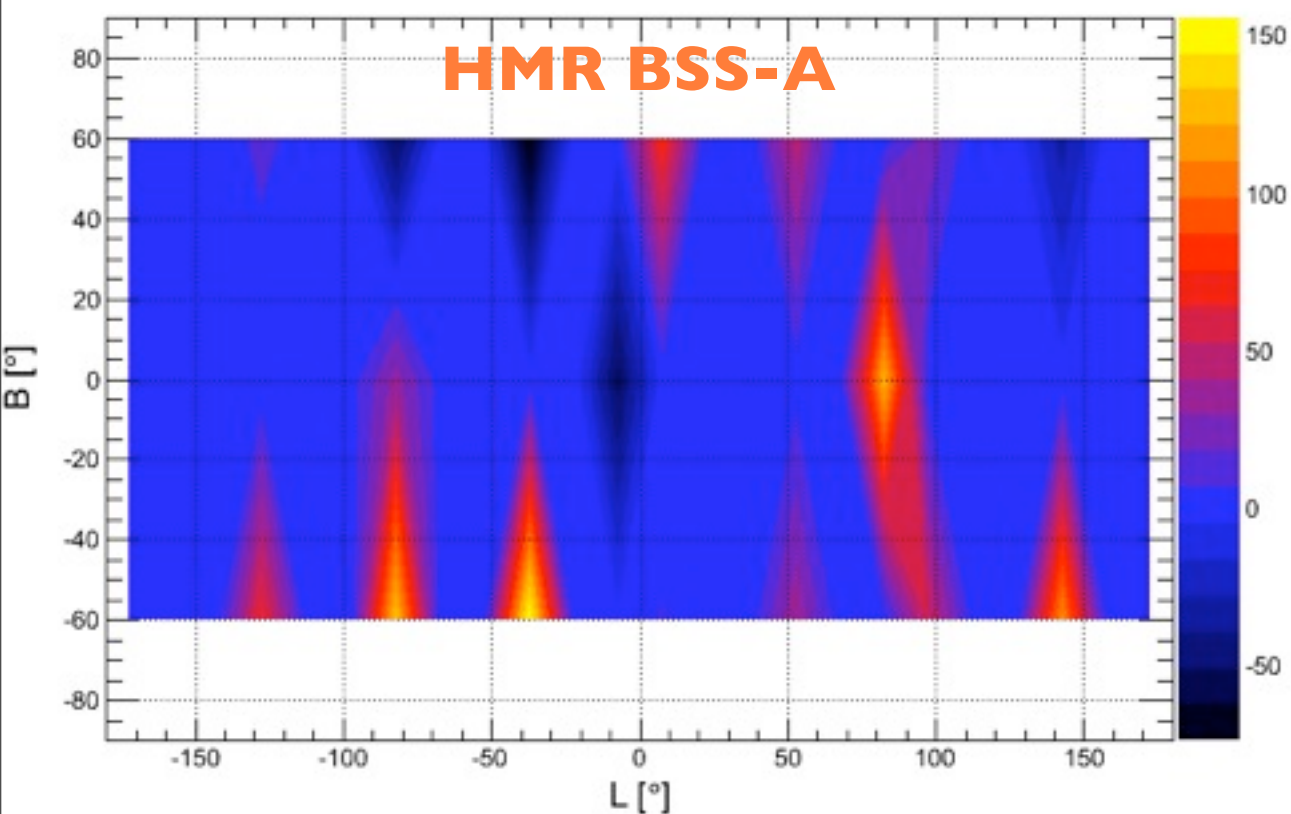
orientações dos multipletos - compilação



orientações dos multipletos - compilação



orientações dos multipletos - compilação



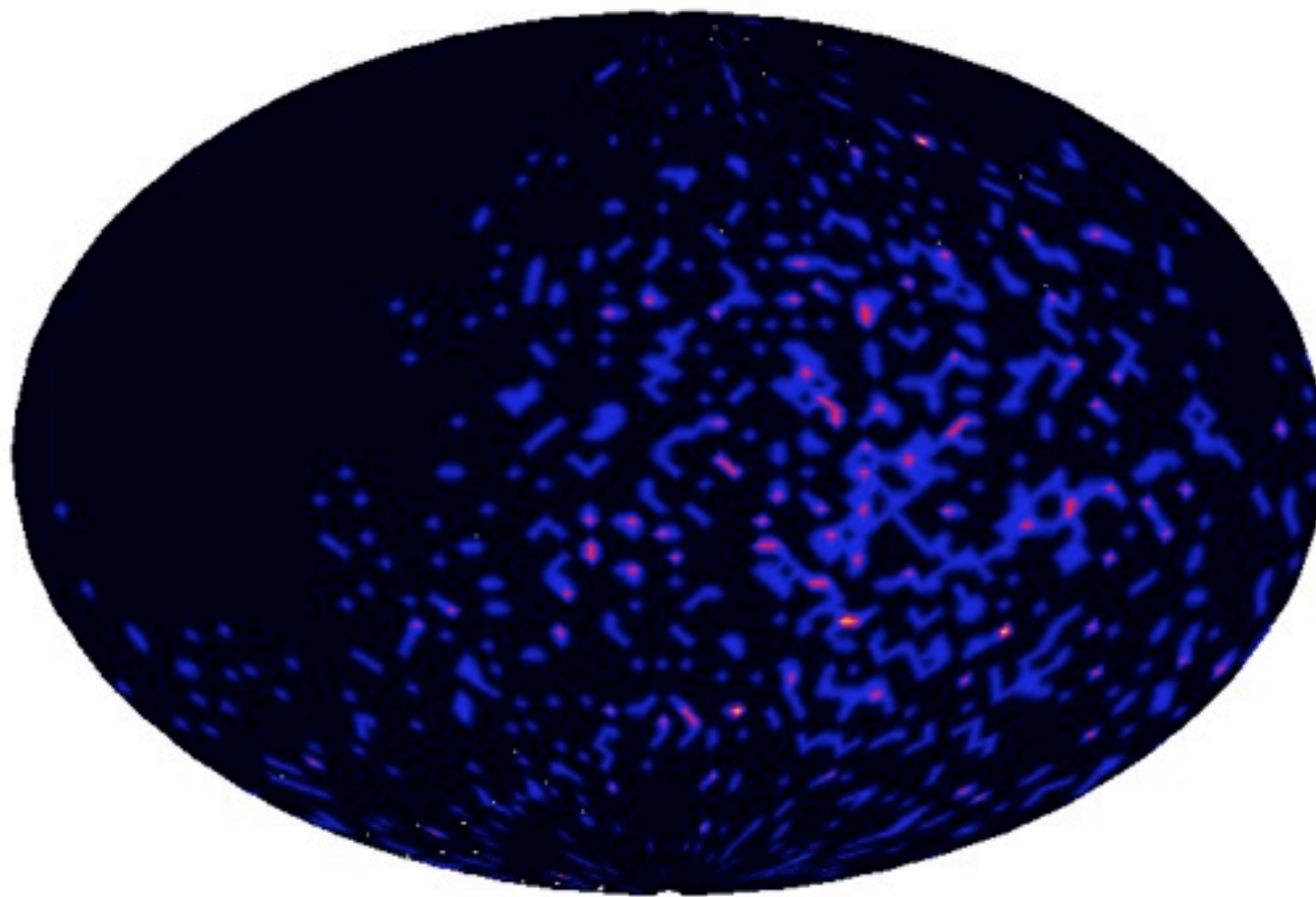
aplicação a dados do Auger

cortes em energia

- ♦ $E > 20$ EeV (4325 eventos)
- ♦ $20 \text{ EeV} < E < 30 \text{ EeV}$ (2489 eventos)
- ♦ $30 \text{ EeV} < E < 40 \text{ EeV}$ (876 eventos)
- ♦ $40 \text{ EeV} < E < 50 \text{ EeV}$ (373 eventos)
- ♦ $50 \text{ EeV} < E < 60 \text{ EeV}$ (169 eventos)
- ♦ $20 \text{ EeV} < E < 40 \text{ EeV}$ (3368 eventos)
- ♦ $40 \text{ EeV} < E < 80 \text{ EeV}$ (699 eventos)

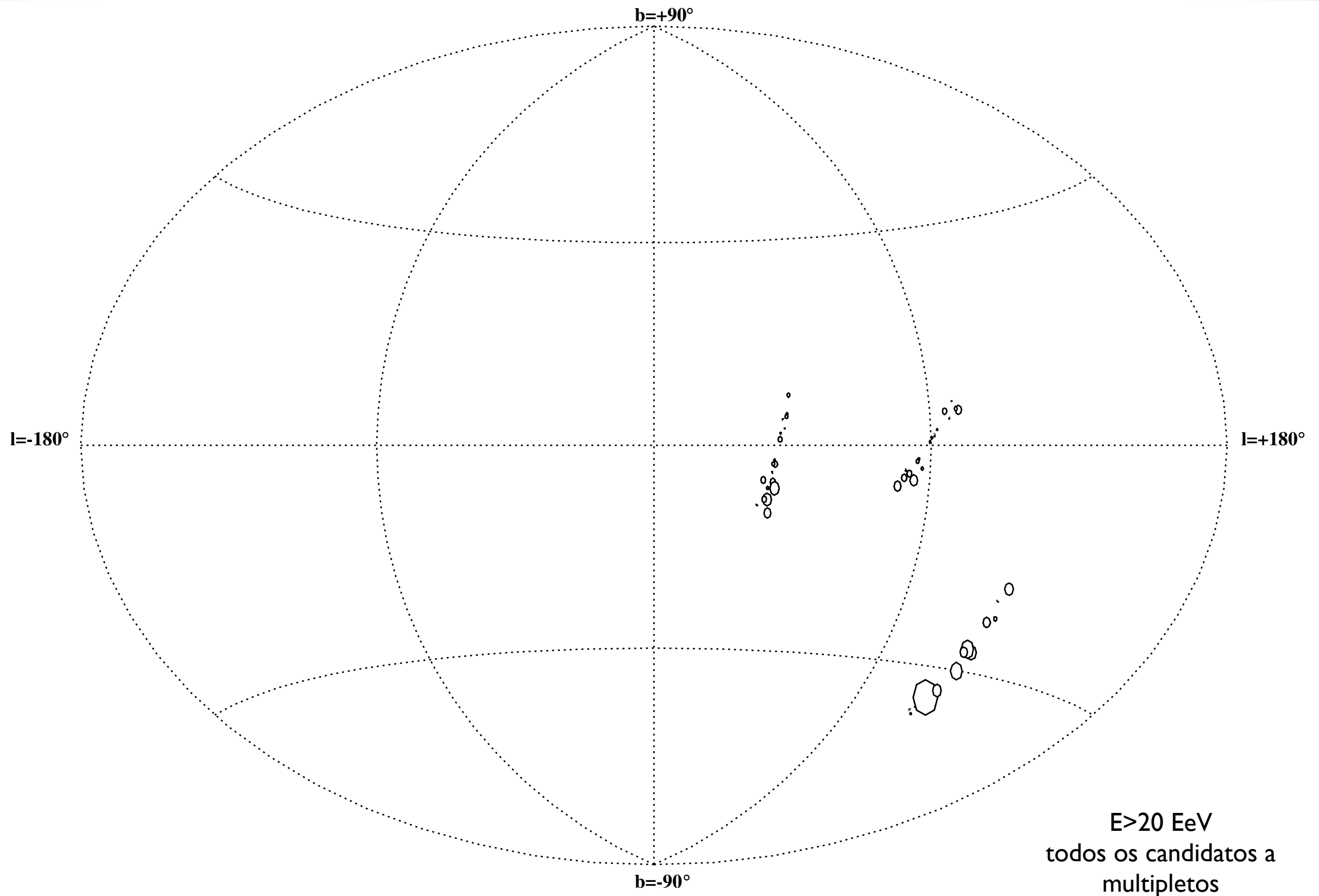
parâmetros da análise

- ♦ período: jan/2004 a 12/2011
- ♦ tamanho das tiras: $12^\circ \times 1,5^\circ$
- ♦ $j=1$, $N=80$
- ♦ $|C| > 0,85$

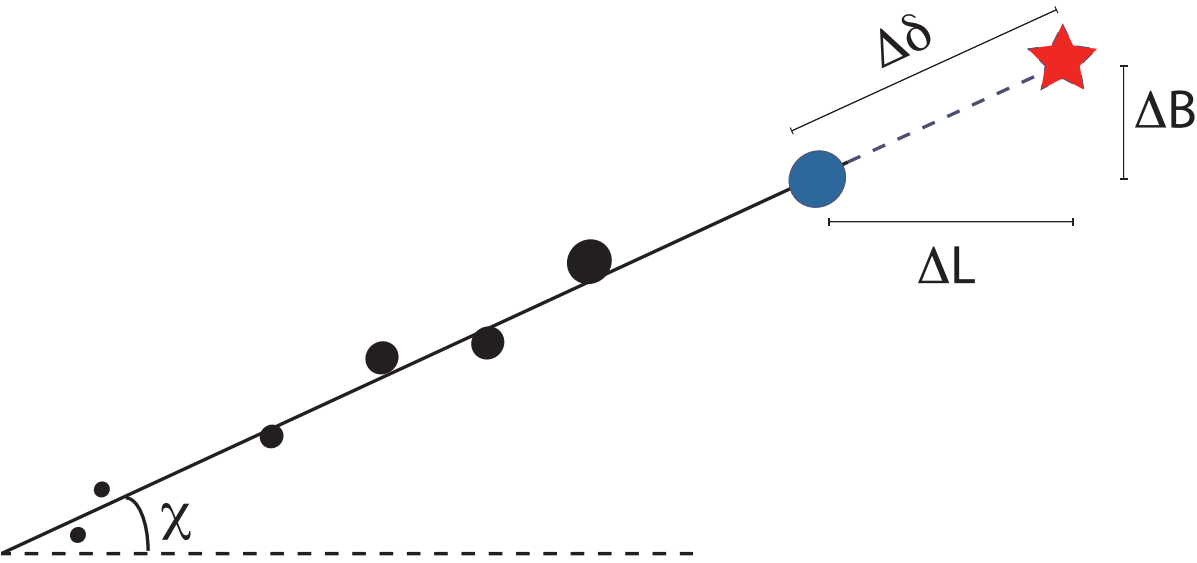


mapa para $E > 20$ EeV

aplicação a dados do Auger



aplicação a dados do Auger



reconstrução da posição da fonte

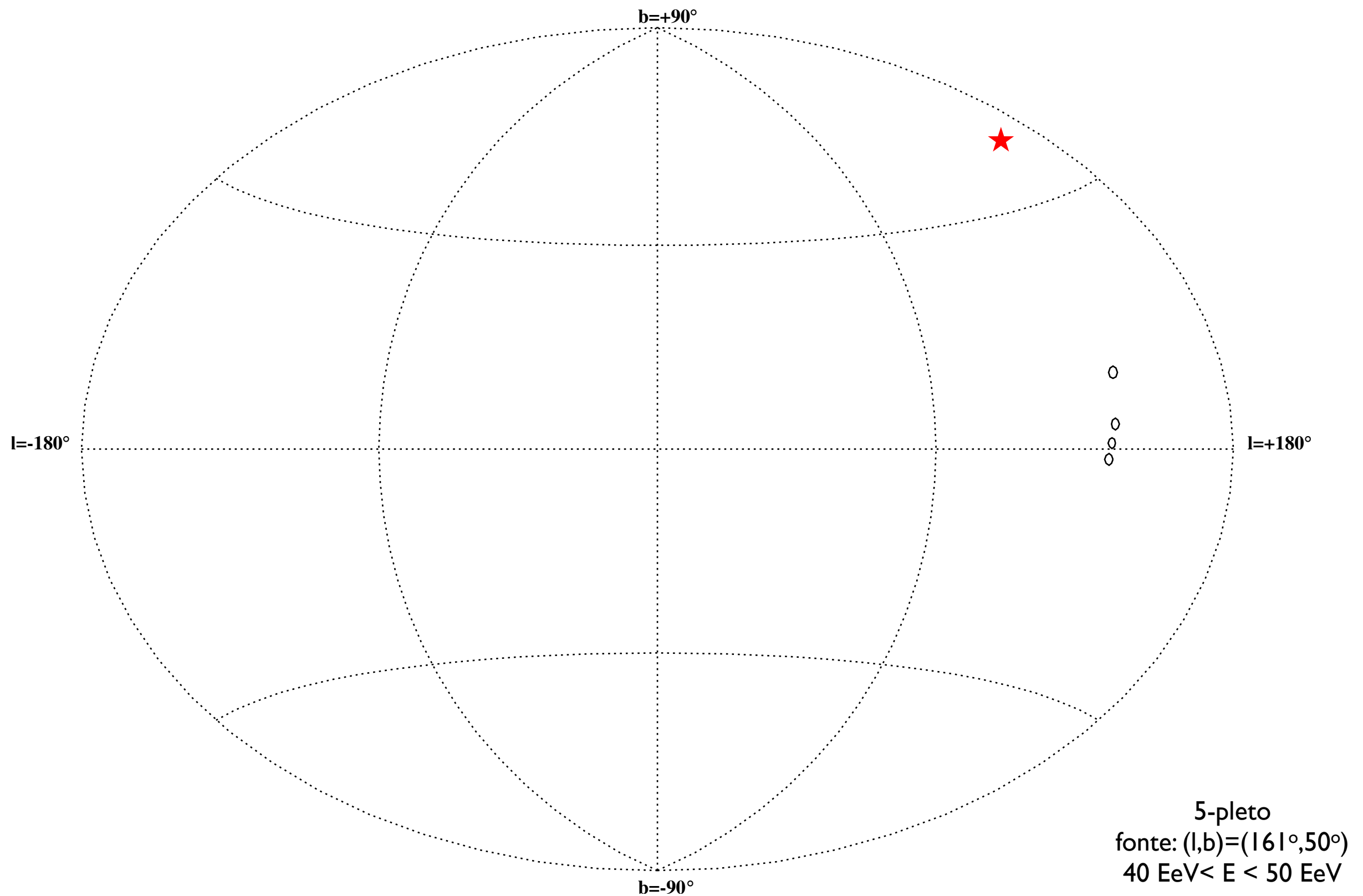
$$L_{src} = L_{max} + \Delta\delta \cos(\chi)$$

$$B_{src} = B_{max} + \Delta\delta \sin(\chi)$$

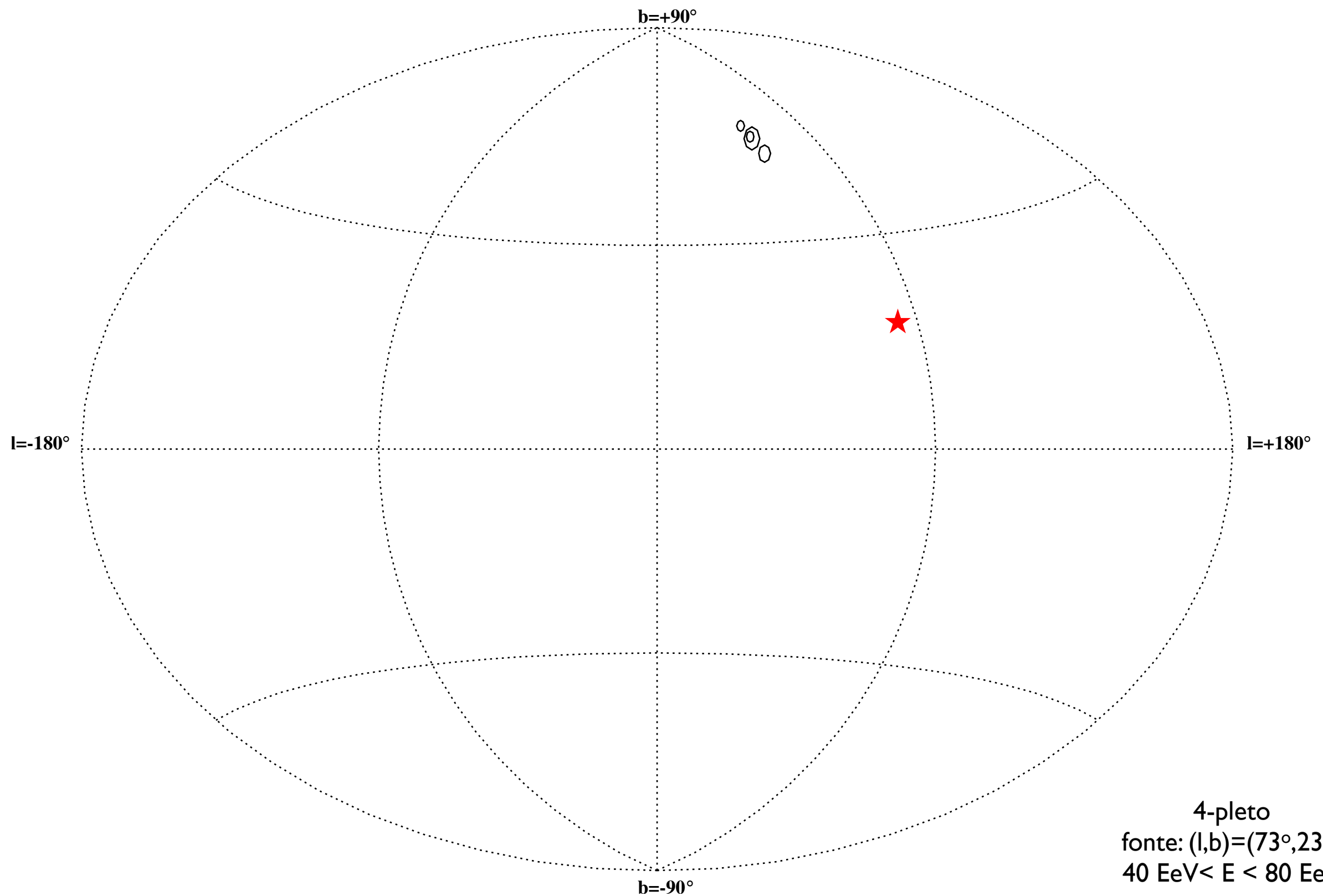
possíveis multipletos ($|C|>0,85$)

E_{max} (EeV)	E_{min} (EeV)	n-pleto	l (°)	b (°)	orientação
40	50	5	$(161\pm3)^\circ$	$(50\pm4)^\circ$	$(-58\pm1)^\circ$
40	80	4	$(73\pm4)^\circ$	$(23\pm3)^\circ$	$(-18\pm1)^\circ$
50	60	5	$(81\pm3)^\circ$	$(-40\pm3)^\circ$	$(-11\pm1)^\circ$
50	60	4	$(77\pm5)^\circ$	$(-35\pm3)^\circ$	$(-22\pm1)^\circ$

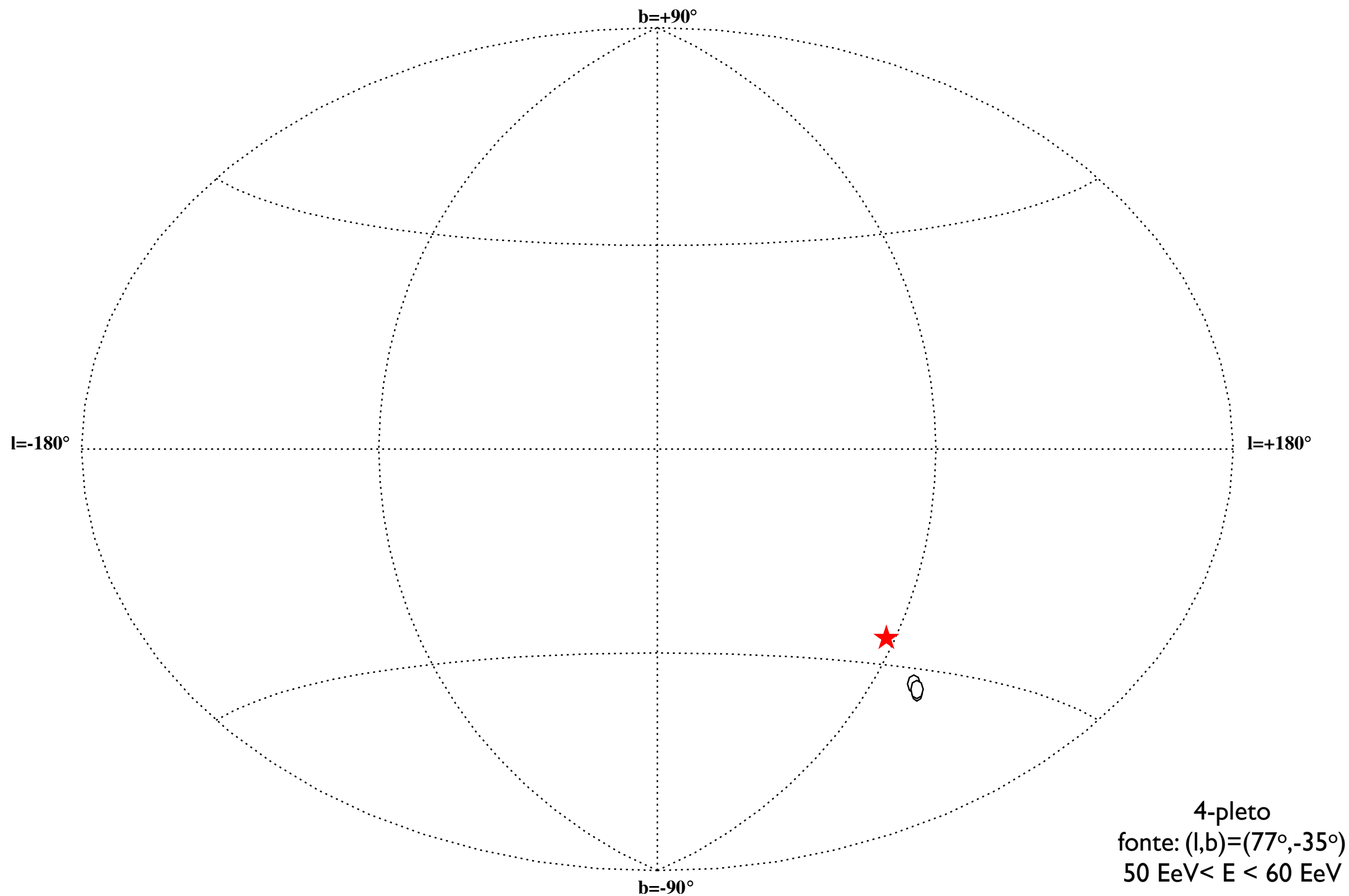
aplicação a dados do Auger



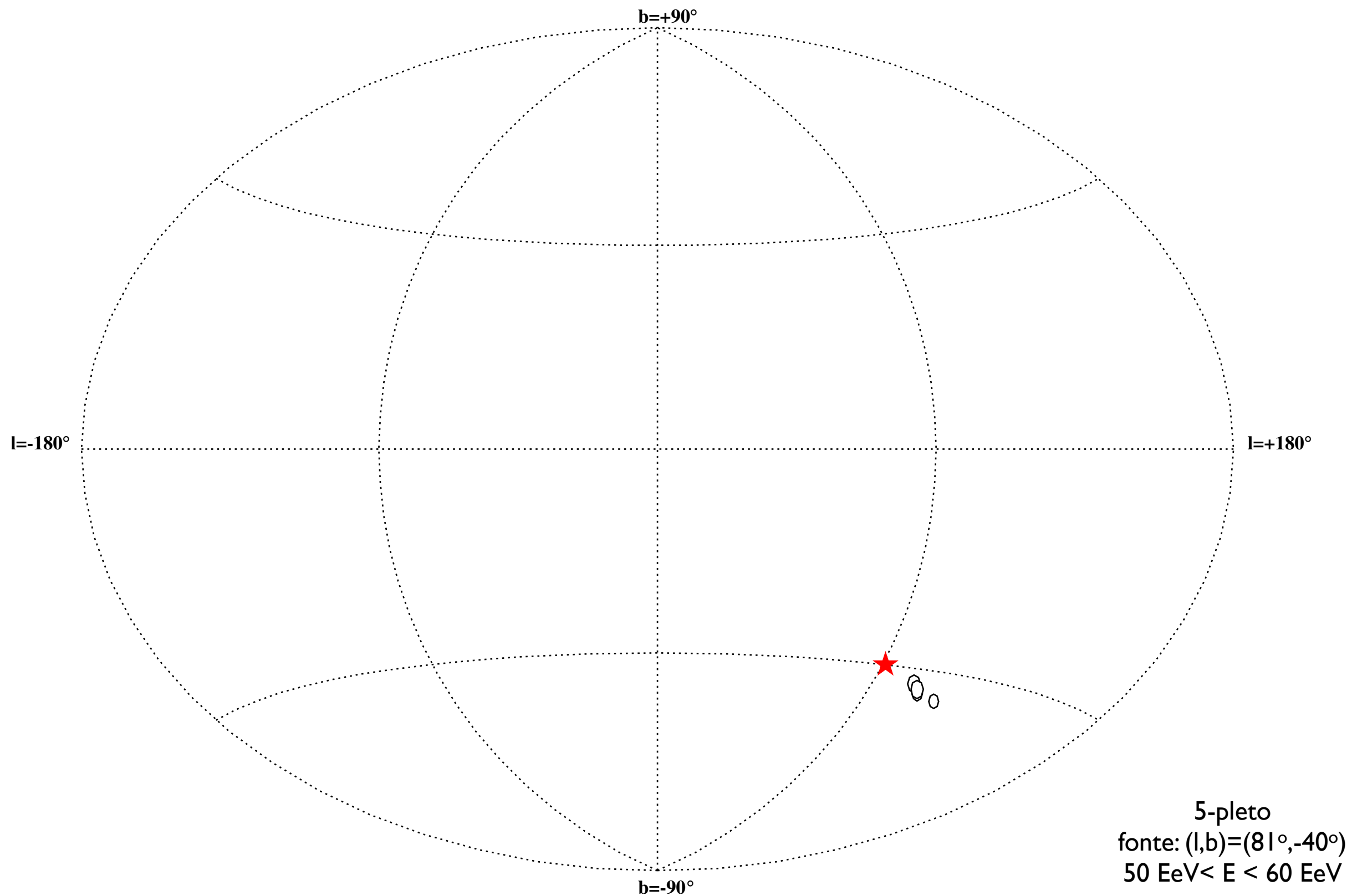
aplicação a dados do Auger



aplicação a dados do Auger



aplicação a dados do Auger



aplicação a dados do Auger

comparação com simulações

- ✧ nos setores próximos às posições encontradas, a orientação dos multipletos em todos os modelos é negativa
- ✧ dos modelos considerados, nenhum se adequa aos resultados
- ✧ os resultados obtidos podem excluir modelos -A

E_{max} (EeV)	E_{min} (EeV)	n-pleto	l (°)	b (°)	orientação
40	50	5	$(161 \pm 3)^\circ$	$(50 \pm 4)^\circ$	$(-58 \pm 1)^\circ$
40	80	4	$(73 \pm 4)^\circ$	$(23 \pm 3)^\circ$	$(-18 \pm 1)^\circ$
50	60	5	$(81 \pm 3)^\circ$	$(-40 \pm 3)^\circ$	$(-11 \pm 1)^\circ$
50	60	4	$(77 \pm 5)^\circ$	$(-35 \pm 3)^\circ$	$(-22 \pm 1)^\circ$

aplicação a dados do Auger

comparação com simulações

- ✿ nos setores próximos às posições encontradas, a orientação dos multipletos em todos os modelos é negativa
- ✿ dos modelos considerados, nenhum se adequa aos resultados
- ✿ os resultados obtidos podem excluir modelos -A

$E_{\max}$ (EeV)	$E_{\min}$ (EeV)	n-pleto	l (°)	b (°)	orientação
40	50	5	$(161 \pm 3)^\circ$	$(50 \pm 4)^\circ$	$(-58 \pm 1)^\circ$
40	80	4	$(73 \pm 4)^\circ$	$(23 \pm 3)^\circ$	$(-18 \pm 1)^\circ$
50	60	5	$(81 \pm 3)^\circ$	$(-40 \pm 3)^\circ$	$(-11 \pm 1)^\circ$
50	60	4	$(77 \pm 5)^\circ$	$(-35 \pm 3)^\circ$	$(-22 \pm 1)^\circ$

aplicação a dados do Auger

comparação com simulações

- ✿ nos setores próximos às posições encontradas, a orientação dos multipletos em todos os modelos é negativa
- ✿ dos modelos considerados, nenhum se adequa aos resultados
- ✿ os resultados obtidos podem excluir modelos -A

E_{max} (EeV)	E_{min} (EeV)	n-pleto	l (°)	b (°)	orientação
40	50	5	$(161 \pm 3)^\circ$	$(50 \pm 4)^\circ$	$(-58 \pm 1)^\circ$
40	80	4	$(73 \pm 4)^\circ$	$(23 \pm 3)^\circ$	$(-18 \pm 1)^\circ$
50	60	5	$(81 \pm 3)^\circ$	$(-40 \pm 3)^\circ$	$(-11 \pm 1)^\circ$
50	60	4	$(77 \pm 5)^\circ$	$(-35 \pm 3)^\circ$	$(-22 \pm 1)^\circ$

conclusões

- ♦ foi desenvolvido um novo método para a identificação de estruturas em mapas de uhecrs, particularmente multipletos, baseado na transformada de wavelets na esfera
 - ♦ foi realizada uma setorização do céu através da simulação de fontes de uhecrs em diferentes posições
 - ♦ obteve-se a orientação do multipeto simulado para cada fonte e modelo de campo
-
- ♦ para as fontes simuladas foi possível observar uma relação entre a orientação do multipeto e sua localização no céu
 - ♦ é possível observar claramente a distinção entre modelos -S e -A quanto à orientação dos multipletos formados
-
- ♦ foram encontrados candidatos a multipletos em dados do Auger
 - ♦ se os multipletos encontrados forem genuínos, isto pode excluir modelos -A

perspectivas

num futuro bem próximo...

- ♦ simulações levando em conta efeitos de campos turbulentos
- ♦ cálculo da probabilidade de um multipletto ser genuíno
- ♦ eliminar o uso da tira para selecionar os eventos, e utilizar somente os coeficientes

para a publicação...

- ♦ aumentar estatística de eventos e número de setores
- ♦ criar subsetores dentro dos setores

desdobramentos...

- ♦ detecção de fontes pontuais com o swat
- ♦ detecção de anisotropias de larga escala com o swat

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

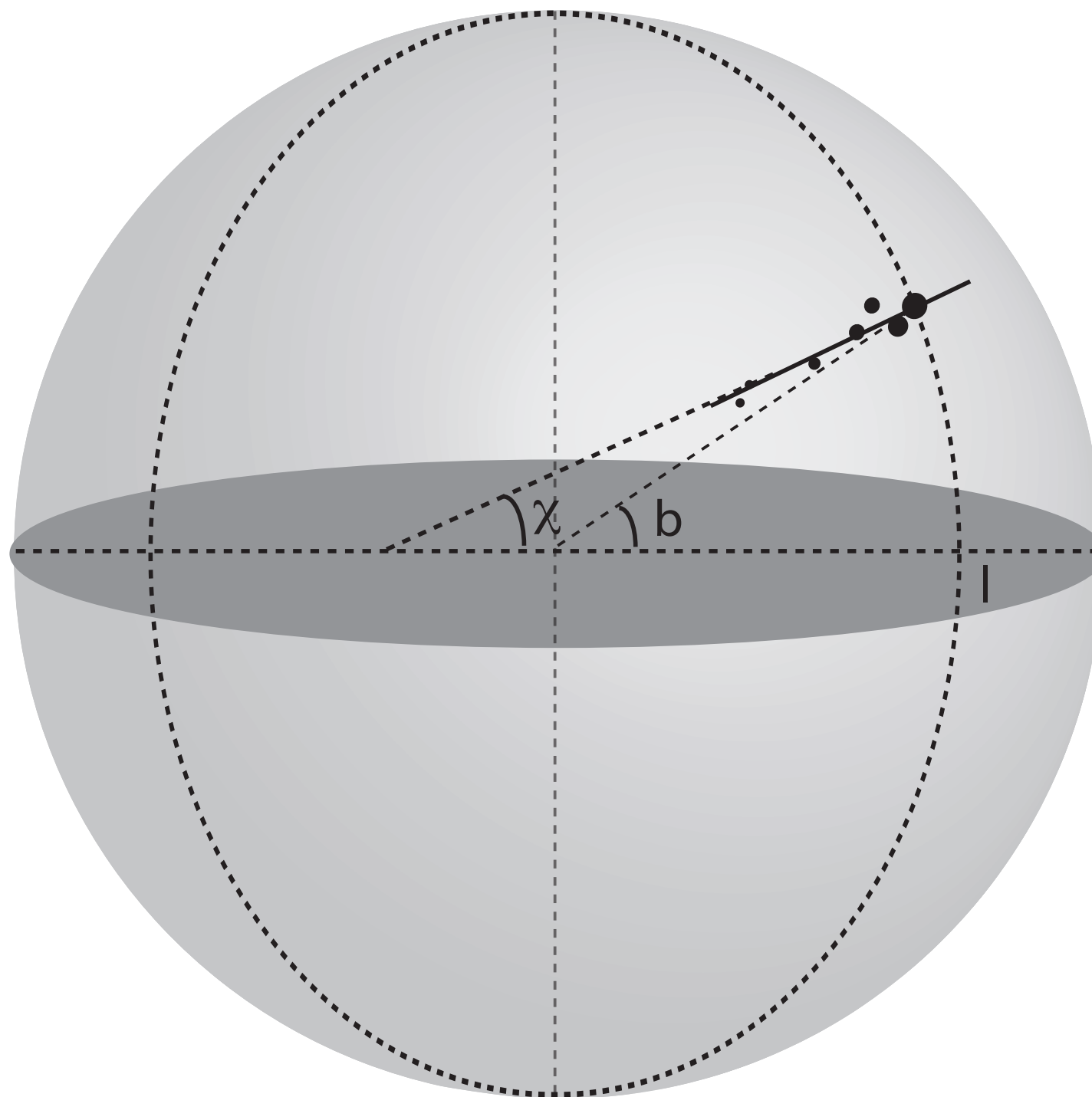
- J. P. Vallée. Magnetic field reversals in the Milky Way- "cherchez le champ magnetique". Astronomy and Astrophysics, 308:433–440, April 1996.
- R. Beck et al. Galactic Magnetism: Recent Developments and Perspectives. Annual Review on Astronomy and Astrophysics, 34:155–206, 1996.
- J. Han. Magnetic 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. [astro-ph/0603512](#)
- L. A. Anchordoqui D. F. Torres. Astrophysical origins of ultrahigh energy cosmic rays. Reports on Progress in Physics, 67:1663–1730, September 2004. [astro-ph/0402371](#)
- J. Cronin. The highest-energy cosmic rays. Nuclear Physics B, 138:465, 2005. [astro-ph/0402487](#)
- 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. [arXiv:0711.1572](#)
- 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. [astro-ph/9906309](#)
- Pierre Auger Collaboration. Search for signatures of magnetically-induced alignment in the arrival directions measured by the Pierre Auger Observatory. Astroparticle Physics, 35(6):354-361, January 2012. [arXiv:1111.2472](#)
- Y. Wiaux et al. Exact reconstruction with directional wavelets on the sphere. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 288:770-788, August 2008. [arXiv:0712.3519](#)
- R. Alves Batista et al. Identifying Patterns on Cosmic Ray Maps with Wavelets on the Sphere. [arXiv:1201.2183](#)

agradecimentos

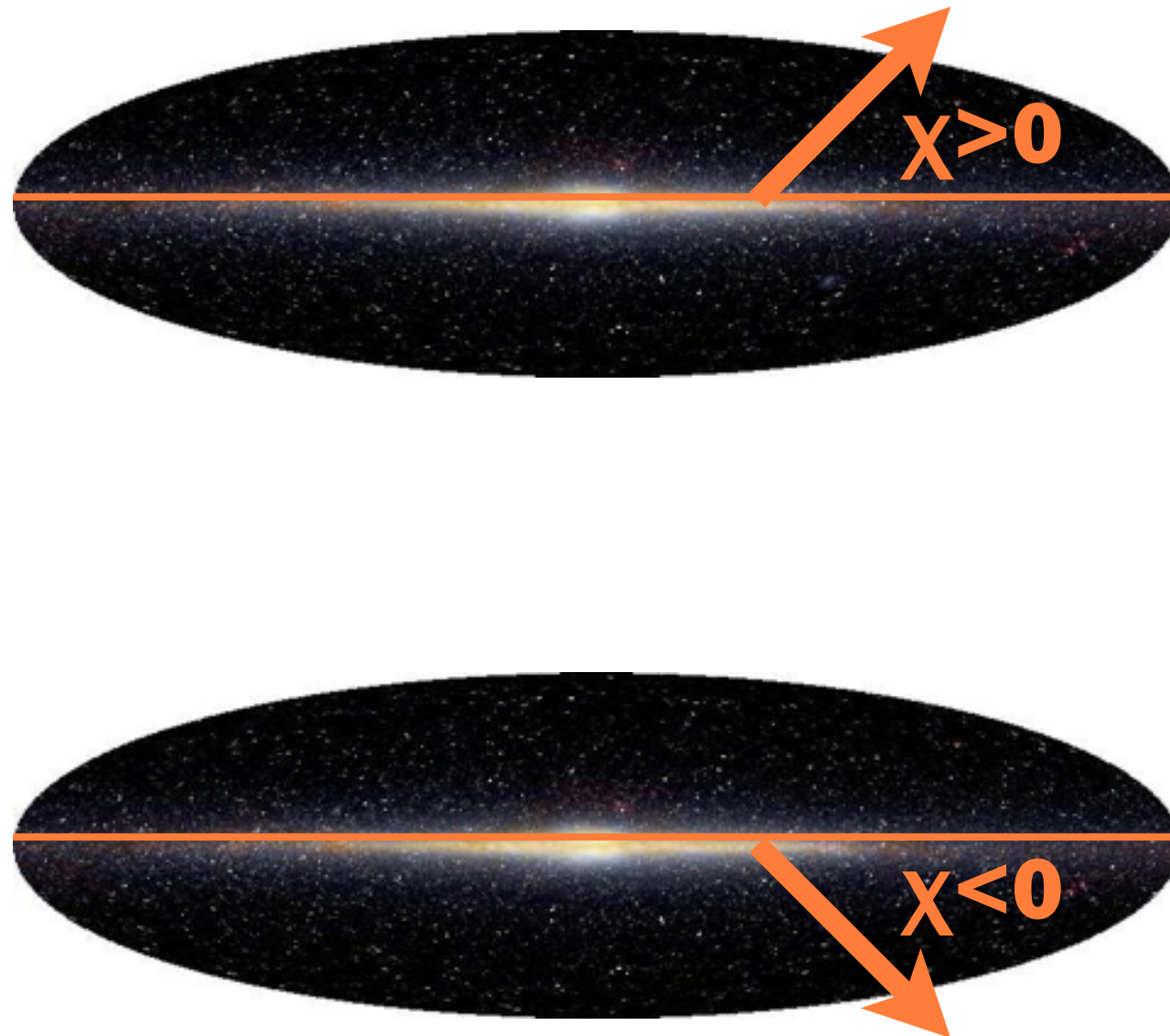


- ♦ Marcelo Zimbres: ajuda com a transformada de wavelets na esfera
- ♦ Cluster de processamento IFSC/USP

(backup) ângulos



(backup) orientação



Créditos: COBE - Ned Wright

(backup) multipletos - Auger

<http://arxiv.org/pdf/1111.2472.pdf>

multiplet	$D[^\circ 100 \text{ EeV}]$	$(l, b)_S[^\circ]$	$\Delta u_S[^\circ]$	$\Delta w_S[^\circ]$	C
12 – plet	4.3 ± 0.7	$(-46.7, 13.2)$	2.4	0.9	0.903
10 – plet I	5.1 ± 0.9	$(-39.9, 23.4)$	2.7	0.9	0.901
10 – plet IIa	8.2 ± 1.3	$(-85.6, -80.4)$	4.3	1.9	0.920
10 – plet IIb	7.6 ± 1.2	$(-79.6, -77.9)$	4.0	1.6	0.919
10 – plet IIc	6.5 ± 1.1	$(-91.5, -75.7)$	3.9	1.6	0.908

Table 1: Deflection power, D ; reconstructed position of the potential source in galactic coordinates, $(l, b)_S$; uncertainty in the reconstructed position of the potential source along the direction of deflection, Δu_S , and orthogonal to it, Δw_S ; and linear correlation coefficient, C , for the largest correlated multiplets found. The data correspond to events with energy above 20 EeV from 1st January 2004 to 31st December 2010.

(backup) trigger T5

- ✦ a estação com sinal mais intenso deve estar circundada por 5 estações ativas dentre os 6 vizinhos próximos
- ✦ o centro reconstruído do chuveiro deve estar dentro de um triângulo de estações ativas no momento do evento
- ✦ não falta nenhuma informação relevante para a reconstrução do chuveiro
- ✦ rejeita eventos próximos à borda do conjunto de detectores e/ou tanques temporariamente inativos

hexágono completo



hexágono incompleto com 5 estações ativas

