

Modelando el espectro de dispersión incoherente medido por el radar de Jicamarca apuntando perpendicular al campo magnético de la Tierra

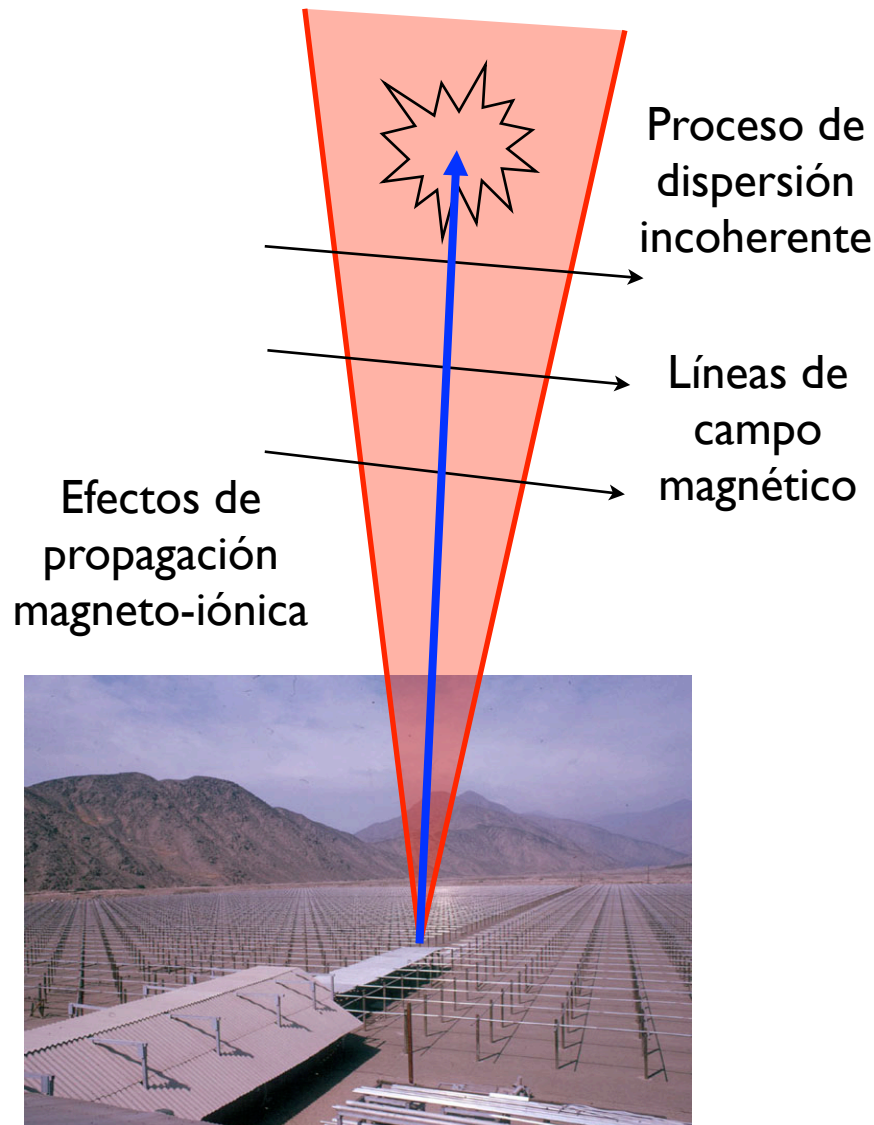
Marco Milla¹, Erhan Kudeki², Jorge Chau¹

1. Radio Observatorio de Jicamarca, Instituto Geofísico del Perú

2. University of Illinois at Urbana-Champaign, USA

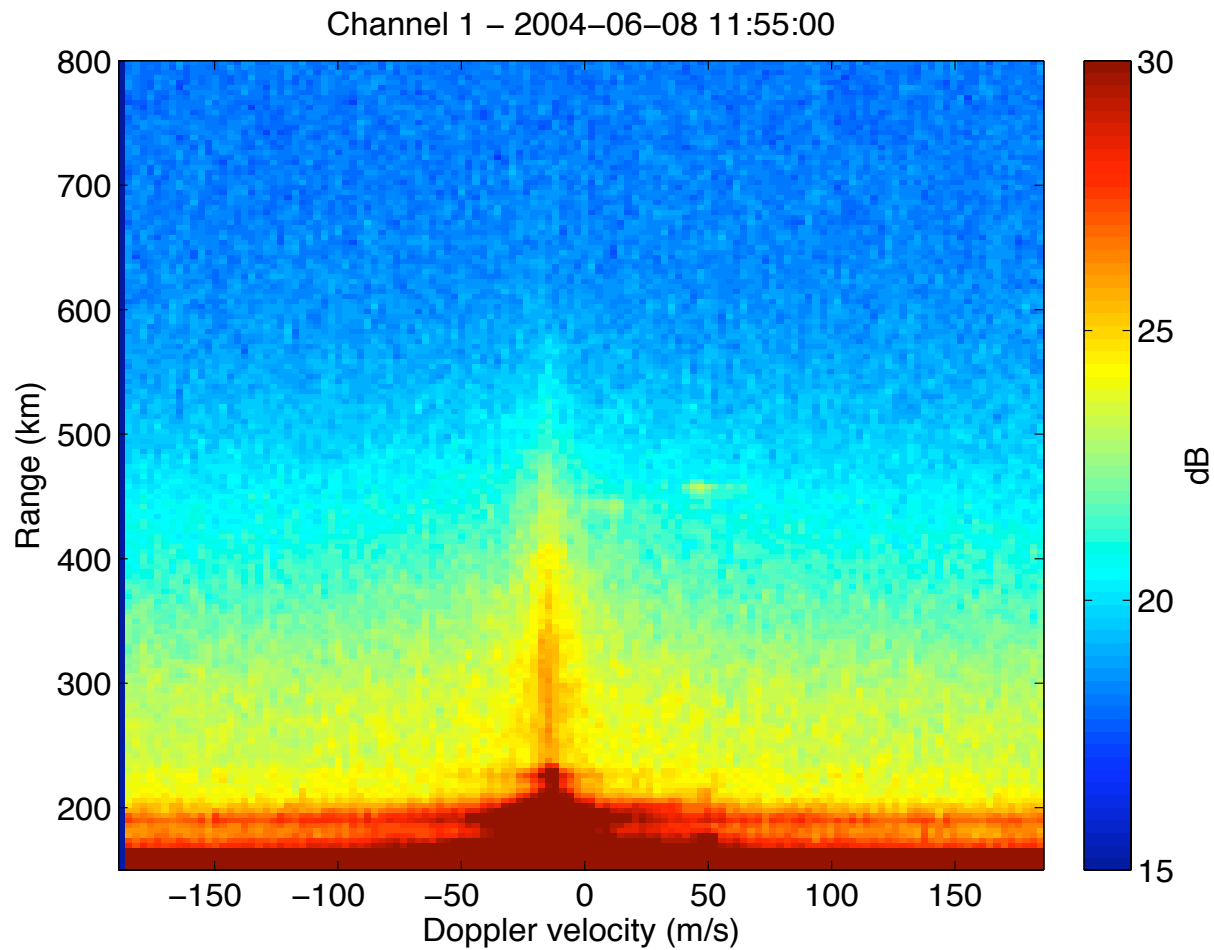
Enero 2010

Radar de dispersión incoherente



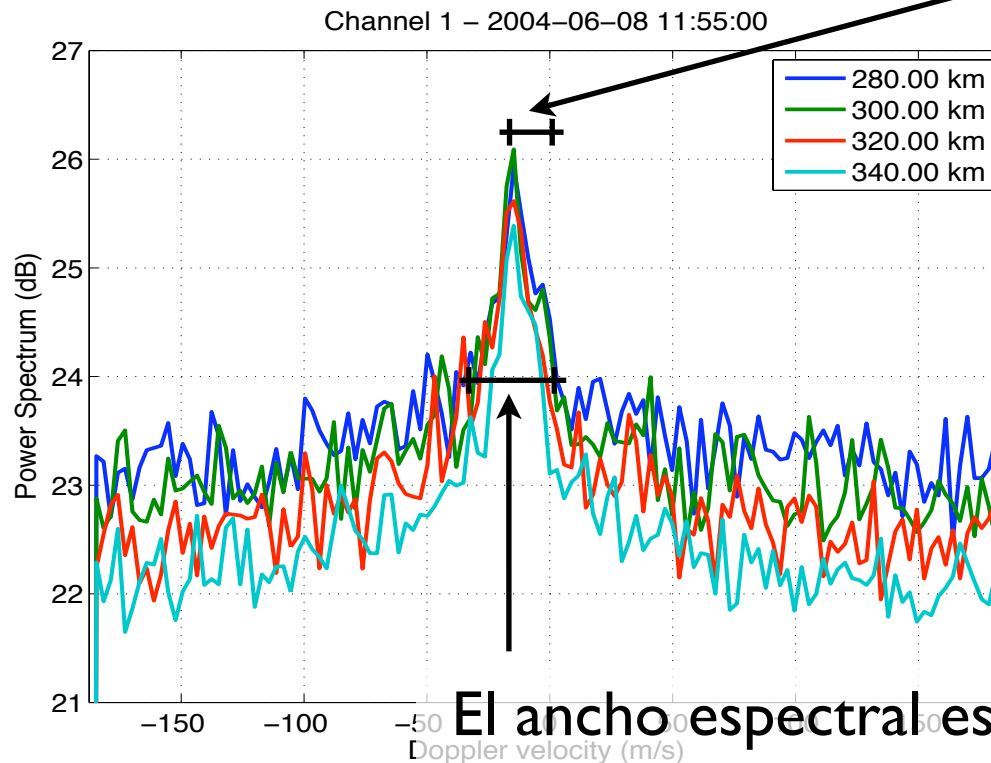
- Incoherent scatter (o dispersión incoherente): Re-radiación de ondas electromagnéticas producida por los electrones en el plasma.
- La estadística de las señales medidas por el radar es usada para estimar parámetros físicos de la ionósfera.
- La propagación de ondas electromagnéticas en un medio magneto-iónico (como la ionosfera) también afecta la estadística de las señales.
- Nos enfocamos al estudio teórico de las señales medidas perpendiculares al campo magnético de la Tierra.

Espectro medido perpendicular a B



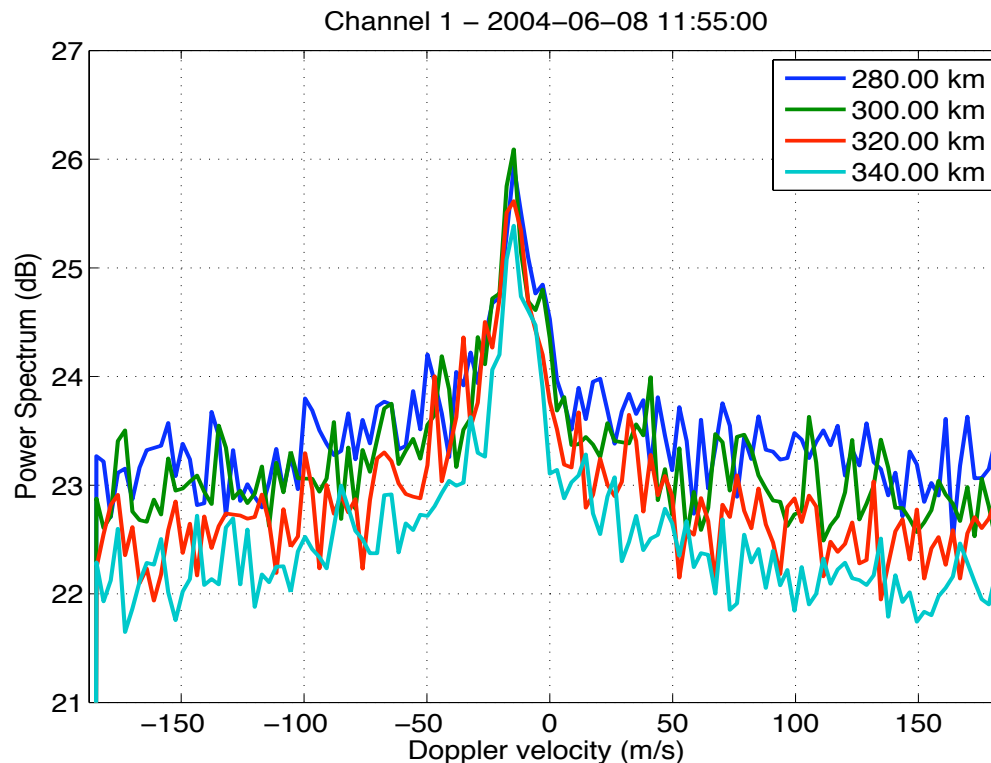
Espectro medido perpendicular a B

El desplazamiento en frecuencia del espectro (efecto Doppler) es una medida directa de la velocidad del plasma (drift).



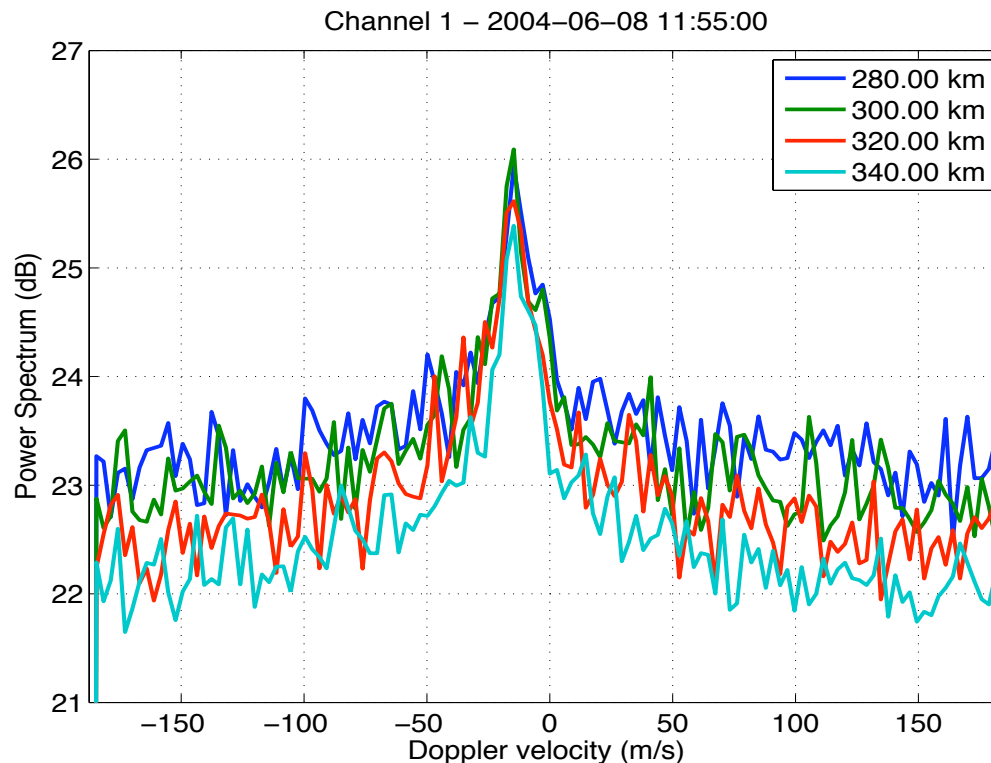
El ancho espectral es función de la temperatura y de las colisiones.

Espectro medido perpendicular a B



Kudeki et al (1999) ajustó las medidas a un modelo espectral simplificado basado en la teoría de IS sin colisiones. Las temperaturas que se obtuvieron fueron aproximadamente la mitad de lo que se esperaba.

Espectro medido perpendicular a B



Kudeki et al (1999) ajustó las medidas a un modelo espectral simplificado basado en la teoría de IS sin colisiones. Las temperaturas que se obtuvieron fueron aproximadamente la mitad de lo que se esperaba.

El espectro medido es más angosto de lo que la teoría (sin colisiones) predice. Por ello, la teoría de dispersión incoherente para modos de propagación perpendiculares al campo magnético necesita ser revisada.

El proyecto

- **Objetivo principal:** Desarrollar un modelo espectral de los ecos de dispersión incoherente para modos de propagación perpendiculares al campo magnético de la Tierra.
- El proyecto fue dividido en dos etapas.
 - Estudio de los efectos de colisiones de Coulomb en el espectro.
 - Modelado de los efectos de propagación magneto-iónica.
- **Aplicación:** La estimación simultánea de velocidades, densidades y temperaturas de la ionósfera con el radar de Jicamarca apuntando perpendicular al campo magnético de la Tierra.

Primera etapa:

Modelando el espectro de dispersión incoherente considerando colisiones de Coulomb en el movimiento de las partículas del plasma

Simulación de las trayectorias de partículas

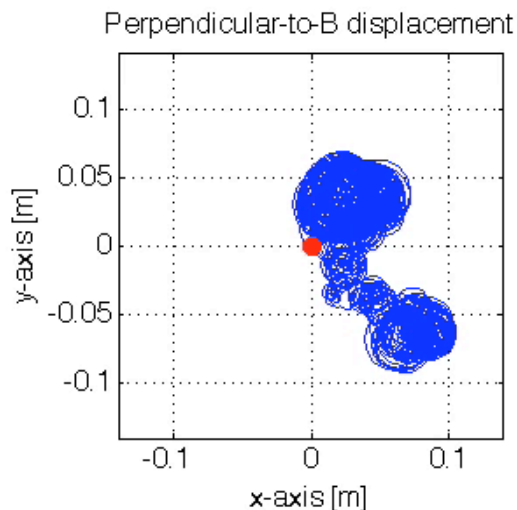
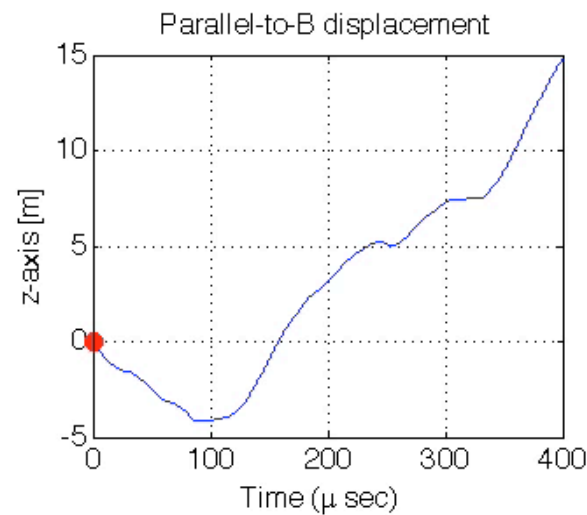
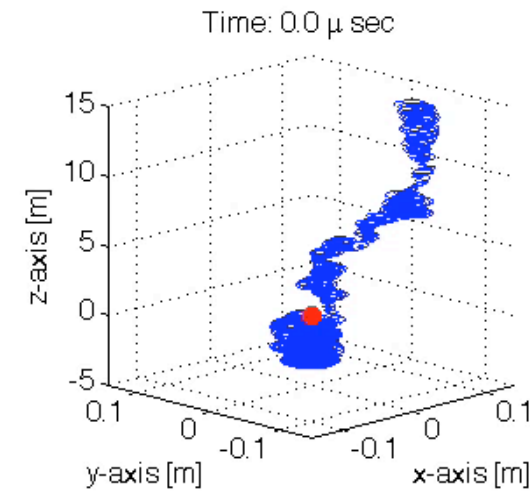
- La trayectoria de una partícula es simulada usando la ecuación de Langevin

$$\vec{v}_{n+1} = \vec{v}_n + \frac{q}{m} \vec{v}_n \times \vec{B} \Delta t - \beta(v_n) \Delta t \vec{v}_n + \sqrt{D_{\parallel}(v_n) \Delta t} \mathcal{N}_1 \hat{v}_{\parallel} + \sqrt{D_{\perp}(v_n) \frac{\Delta t}{2}} \mathcal{N}_2 \hat{v}_{\perp 1} + \sqrt{D_{\perp}(v_n) \frac{\Delta t}{2}} \mathcal{N}_3 \hat{v}_{\perp 2}$$

$$\vec{r}_{n+1} = \vec{r}_n + \frac{\vec{v}_{n+1} + \vec{v}_n}{2} \Delta t$$

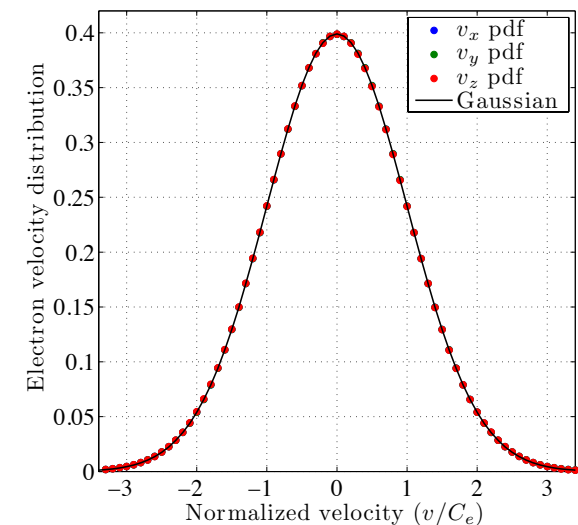
- La ecuación de Langevin es una ecuación estocástica donde el efecto de colisiones en el movimiento de una partícula es modelado como fuerzas de fricción y difusión.
- Los coeficientes de fricción y difusión de Spitzer son usados para modelar el efecto de las colisiones de Coulomb.
- Dada una configuración de plasma, las simulaciones corren por varias horas para obtener estimados con buena calidad estadística.

Trayectorias de partículas en 3-D



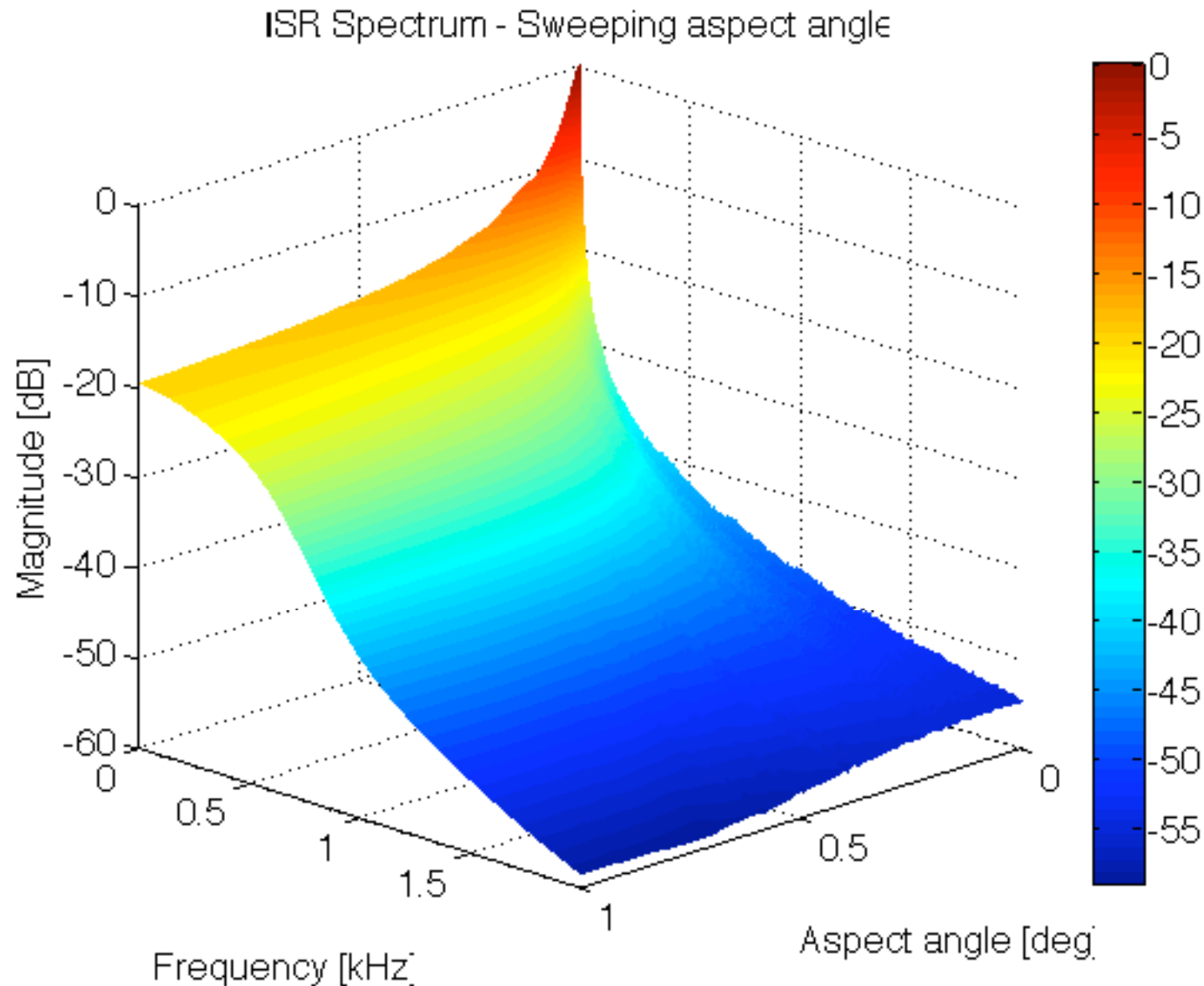
O⁺ Plasma:
 $N_e = 10^{12} \text{ m}^{-3}$
 $T_e = 1000 \text{ K}$
 $T_i = 1000 \text{ K}$
 $B = 25\,000 \text{ nT}$

10^4 secuencias de 2^{17} muestras son generadas (30 GB), solo las estadísticas (ACF's) son guardadas (60 MB).

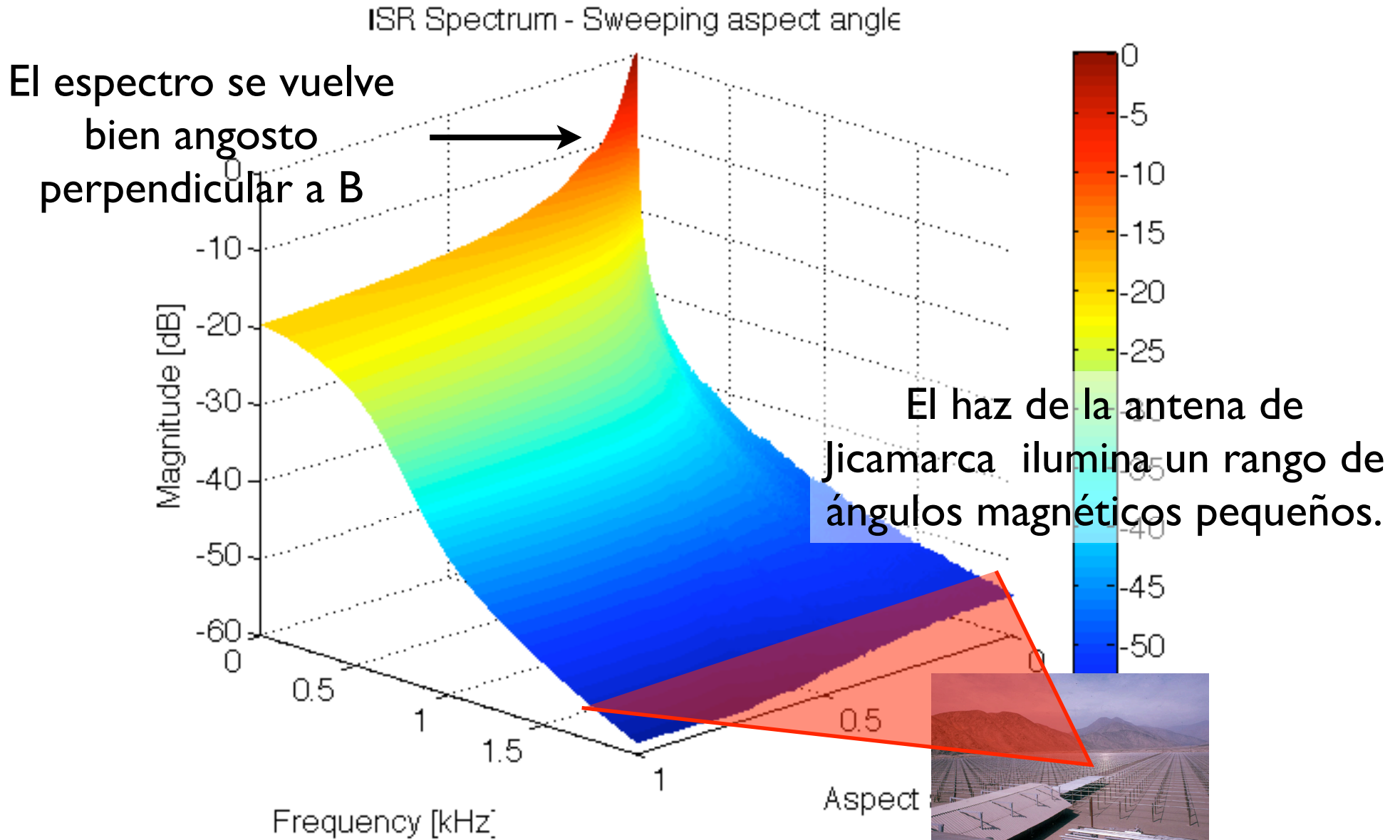


La distribución de las velocidades simuladas tiene forma gaussiana.

Espectro simulado (con colisiones)

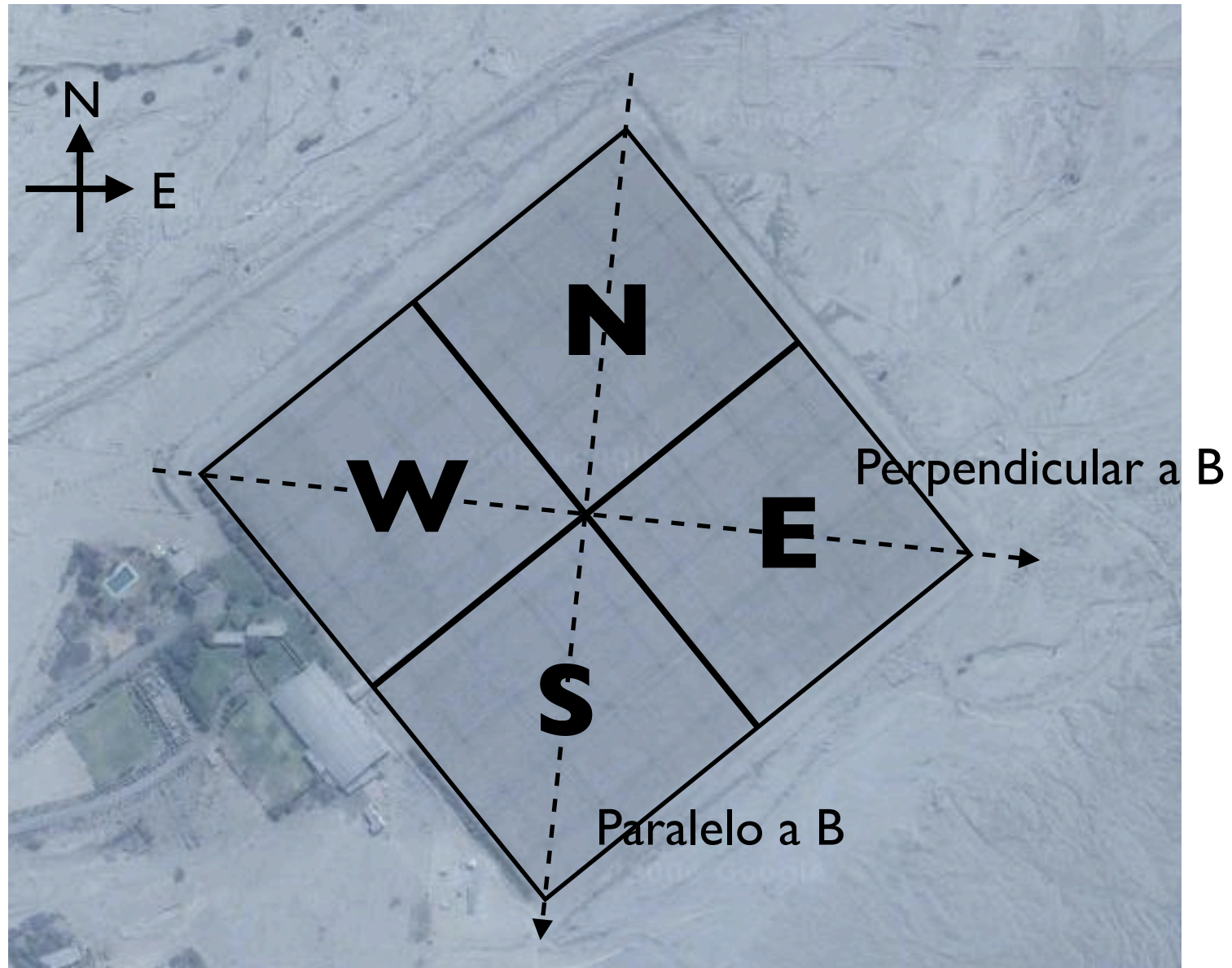


Espectro simulado (con colisiones)

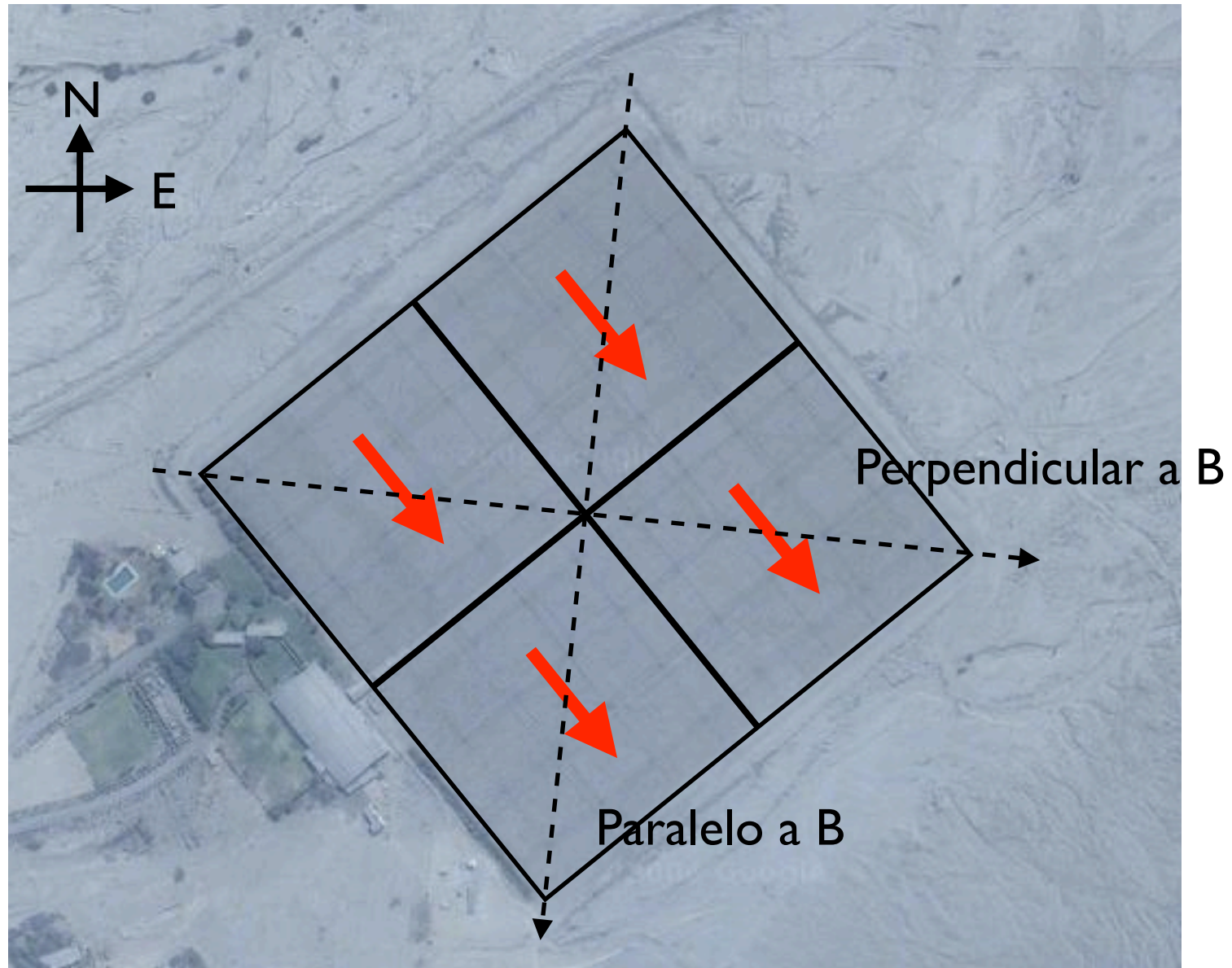


**Primeras mediciones:
Modelando el espectro de dispersión
incoherente medido por el radar
considerando el haz de la antena**

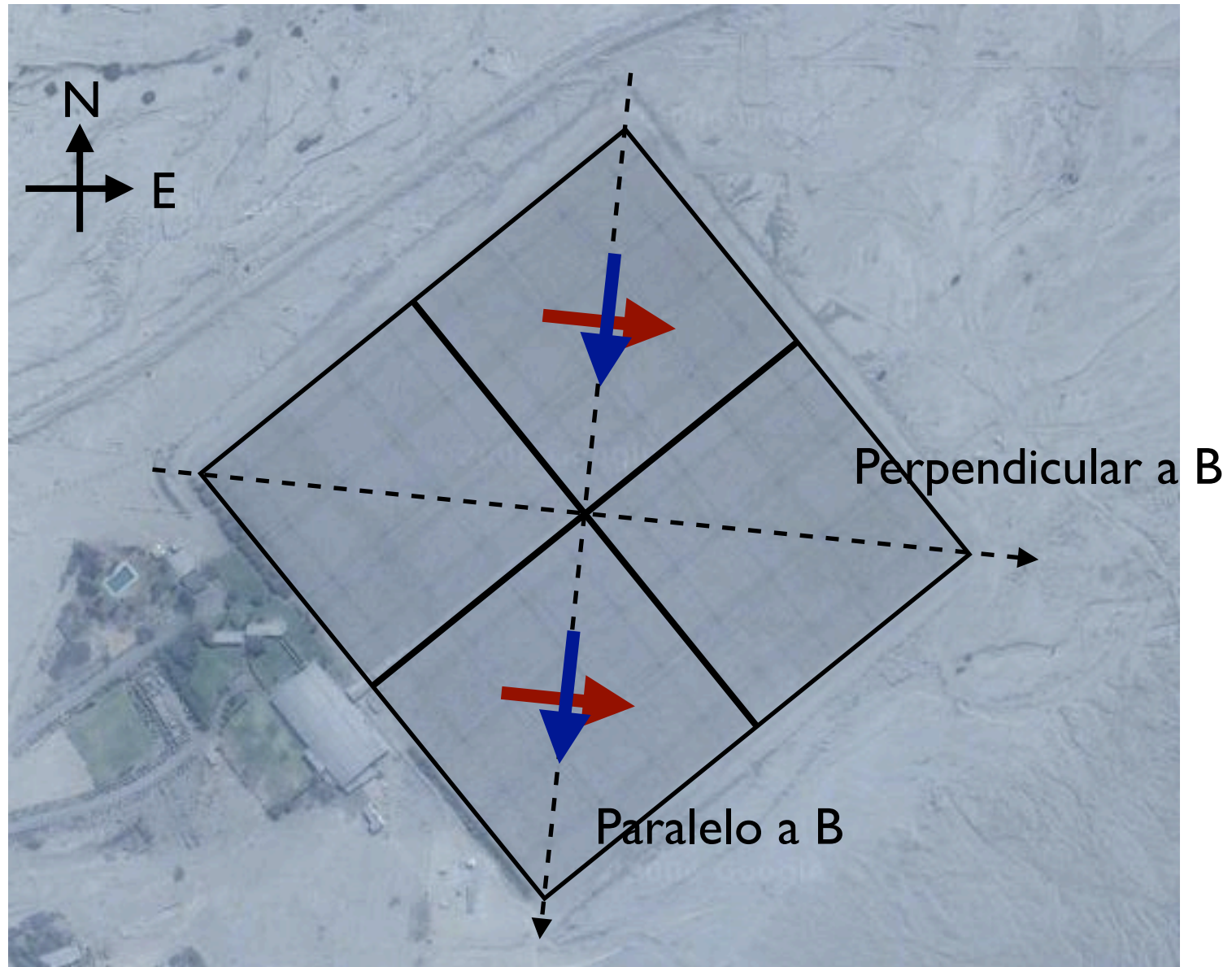
Aplicación: Experimento DVD



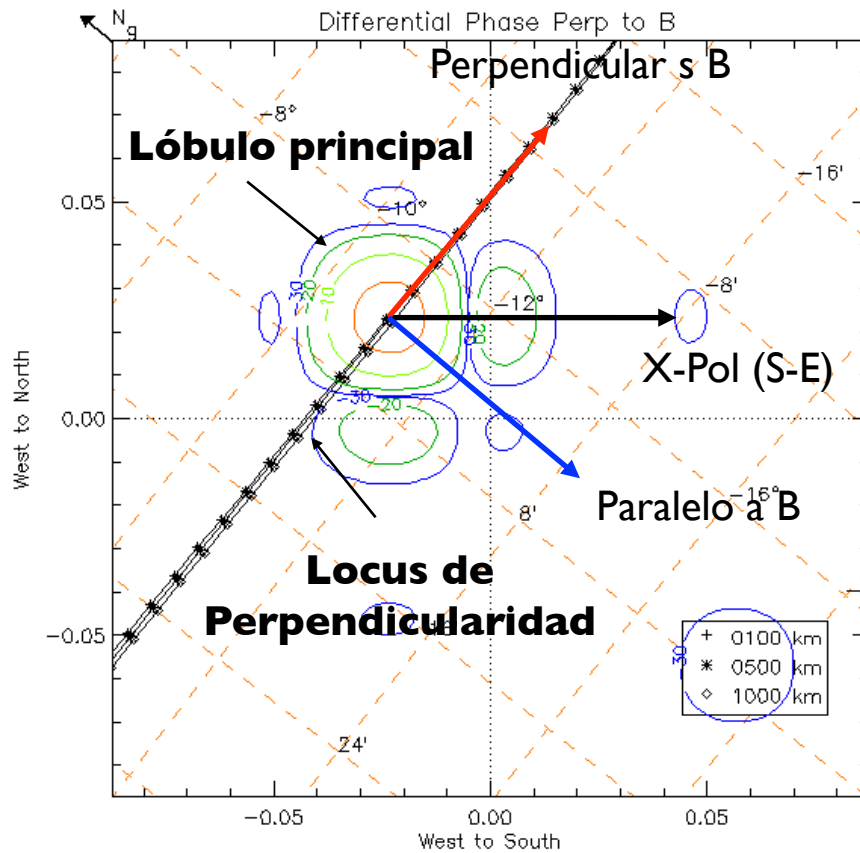
Aplicación: Experimento DVD



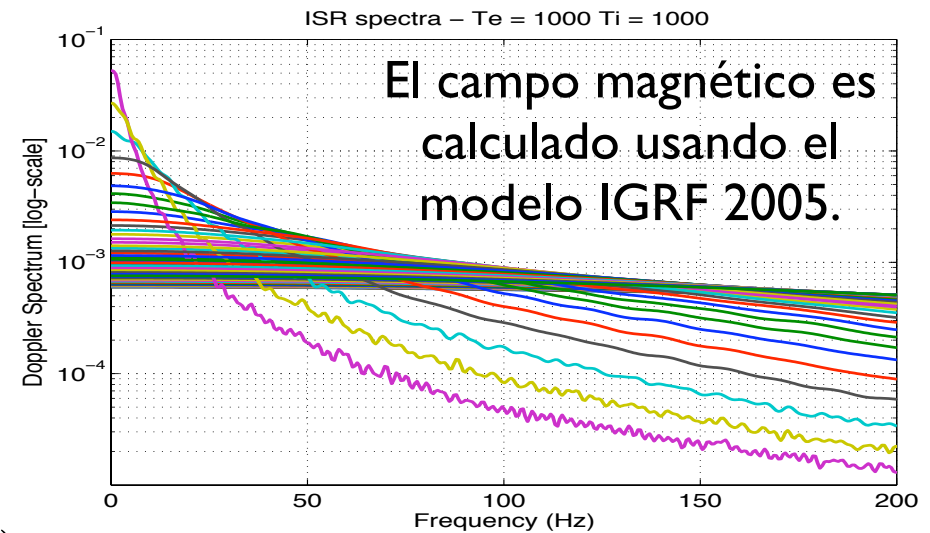
Aplicación: Experimento DVD



Espectro de IS pesado por el haz de la antena



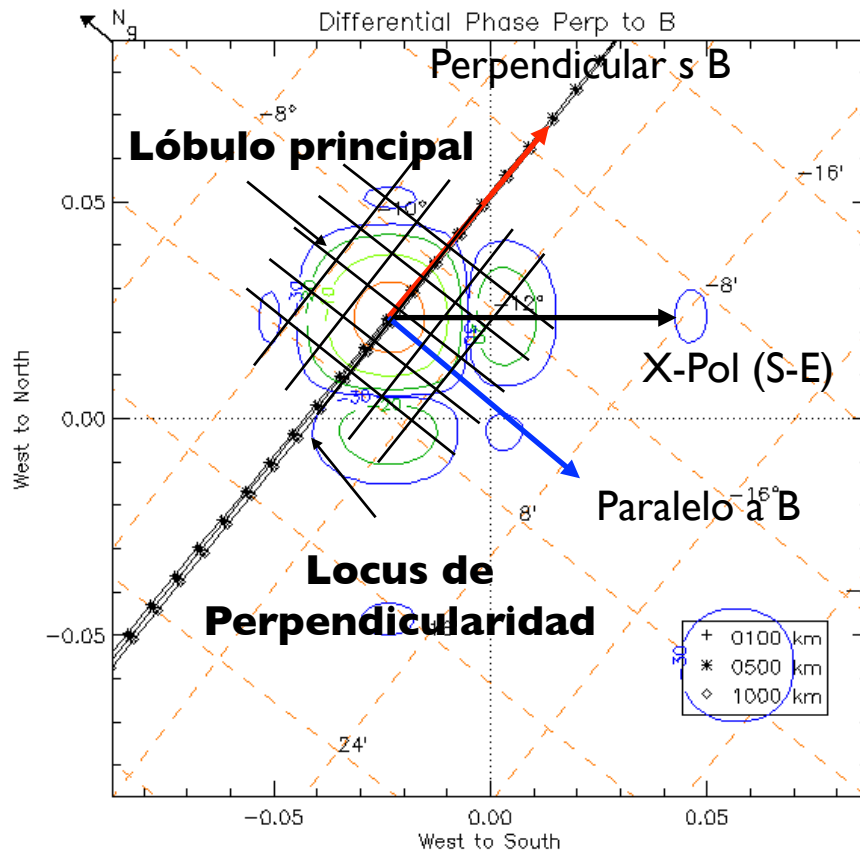
- Experimento DVD: cuartos norte y sur de la antena de Jicamarca son enfatados para apuntar perpendicular a B.
- Ancho del haz: ~1 deg.
- El espectro medido es modelado como la suma de los espectros correspondientes a diferentes ángulos.



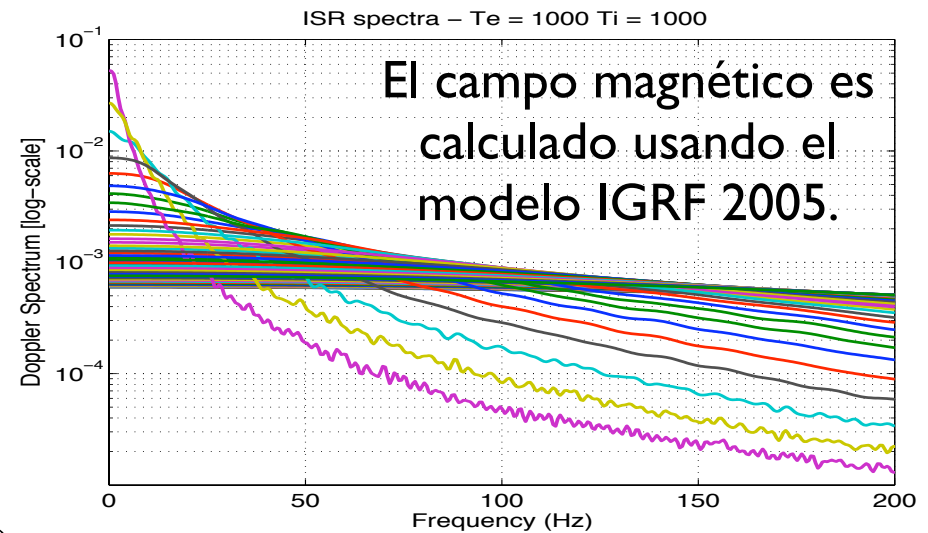
Radar equation:

$$\frac{S_r(\omega)}{E_t K_s} \approx \frac{\delta R}{R^2} \int d\Omega g^2(\hat{r}) \sigma(\vec{k}, \omega)$$

Espectro de IS pesado por el haz de la antenna



- Experimento DVD: cuartos norte y sur de la antenna de Jicamarca son enfatados para apuntar perpendicular a B.
- Ancho del haz: ~ 1 deg.
- El espectro medido es modelado como la suma de los espectros correspondientes a diferentes ángulos.

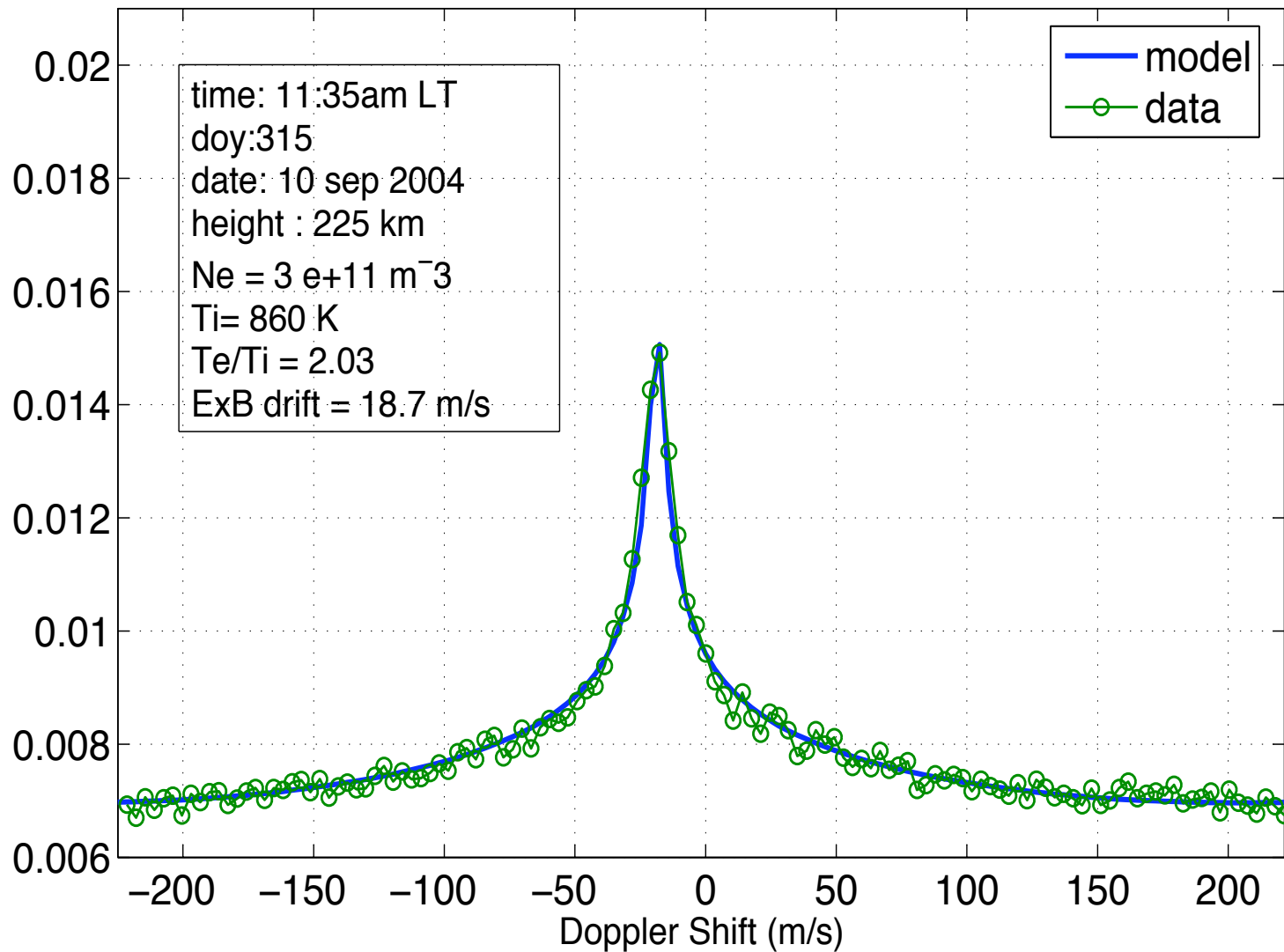


Radar equation:

$$\frac{S_r(\omega)}{E_t K_s} \approx \frac{\delta R}{R^2} \int d\Omega g^2(\hat{r}) \sigma(\vec{k}, \omega)$$

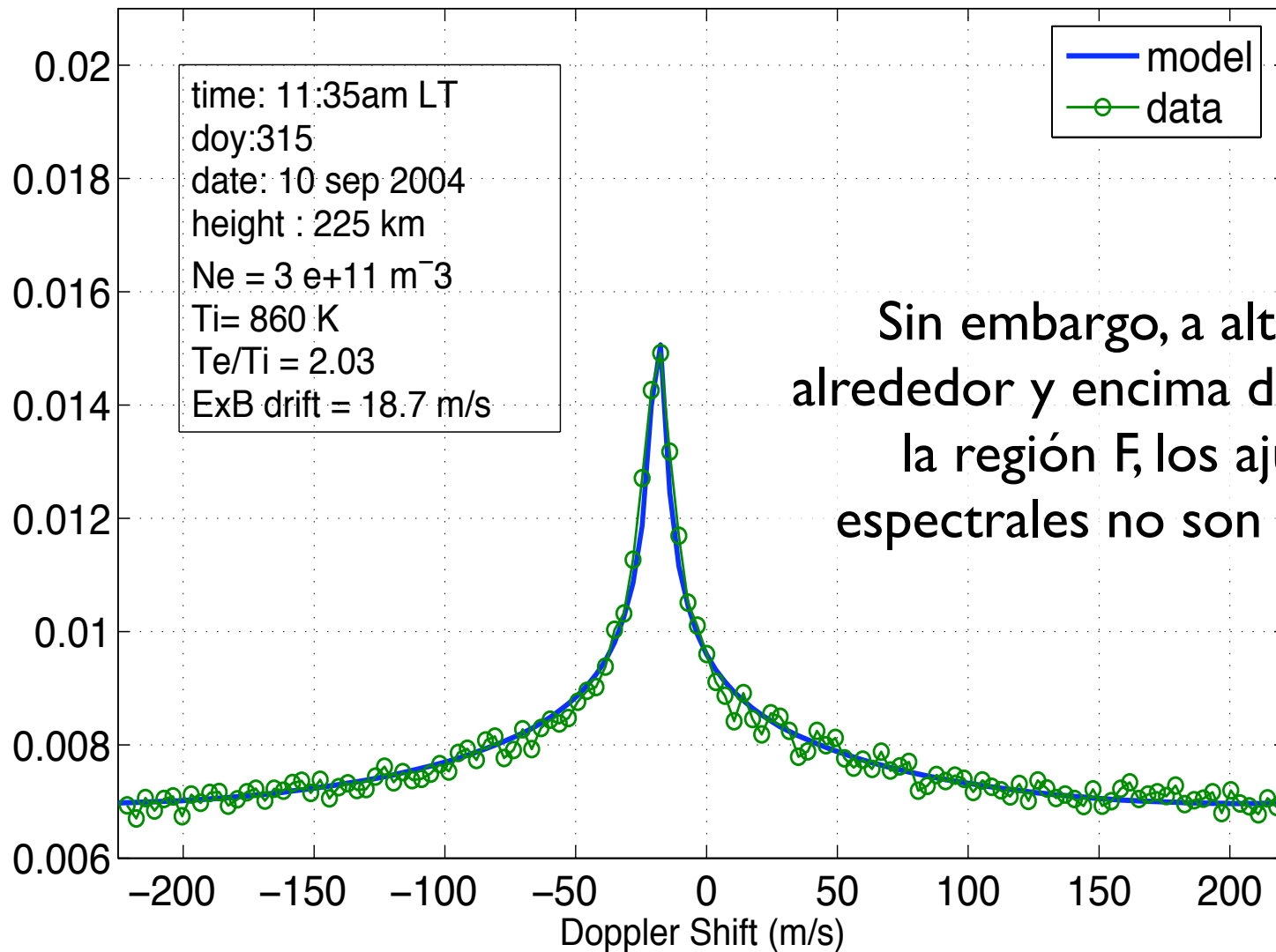
Primer ajuste espectral

Self Spectrum Normalized by the power N_{zonal}



Primer ajuste espectral

Self Spectrum Normalized by the power N_{zonal}

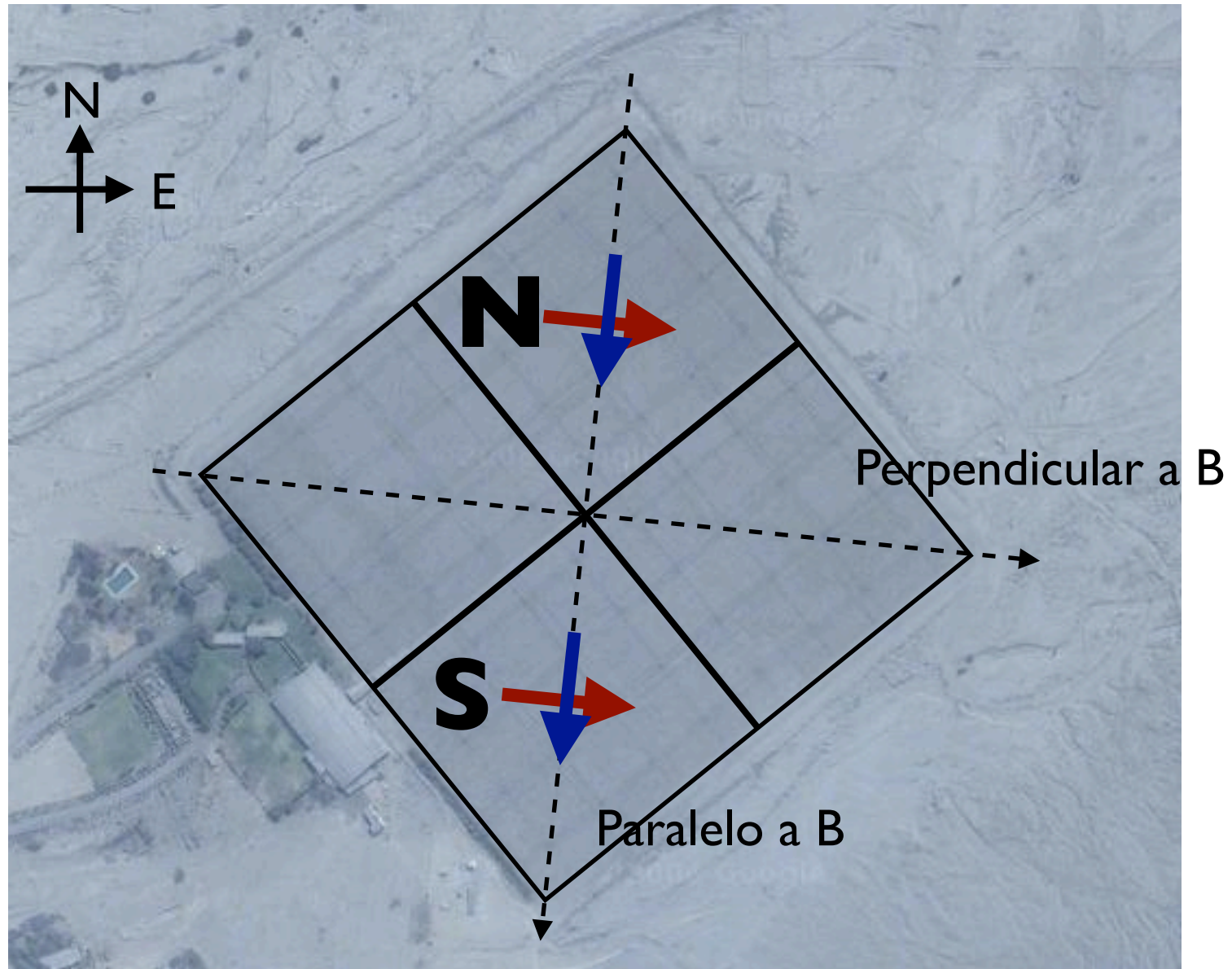


Sin embargo, a altitudes
alrededor y encima del pico de
la región F, los ajustes
espectrales no son buenos.

Segunda etapa:

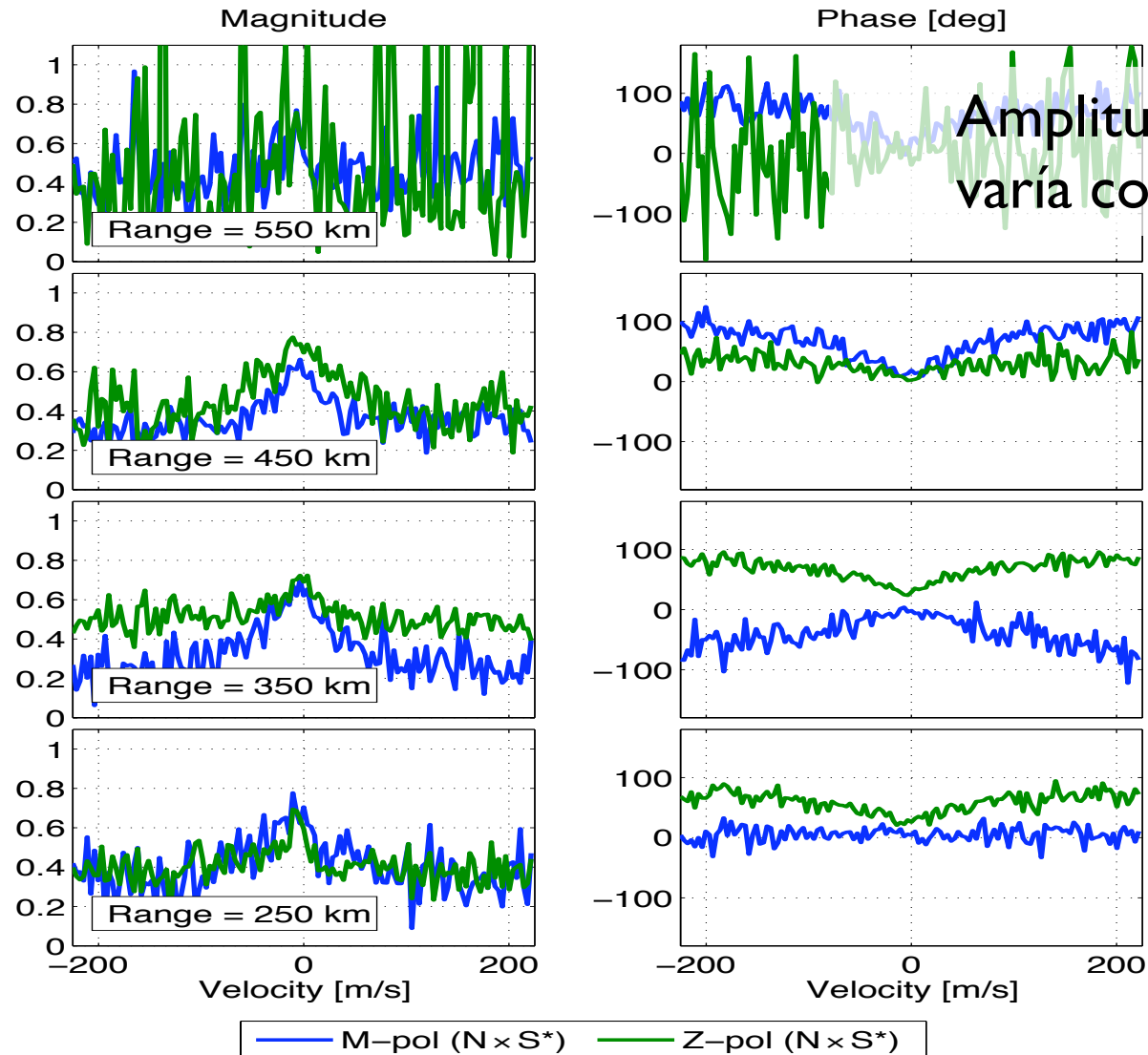
**Modelando los efectos de propagación
magneto-iónica en el espectro de dispersión
incoherente**

Aplicación: Experimento DVD

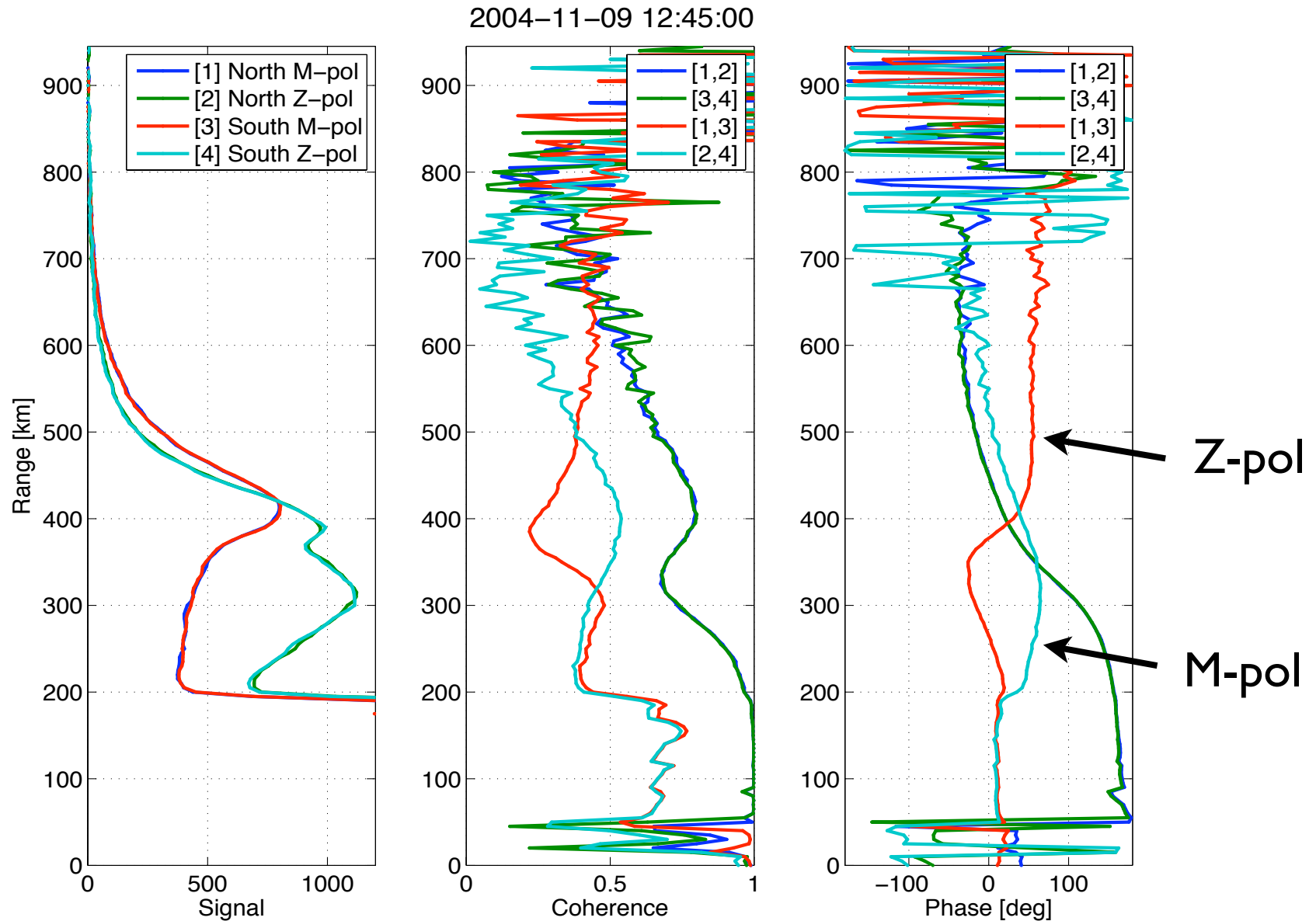


Espectro de coherencia en función de altura

ISR Coherence Spectra – 2004–11–09 12:45:00
North–South baseline interferometer



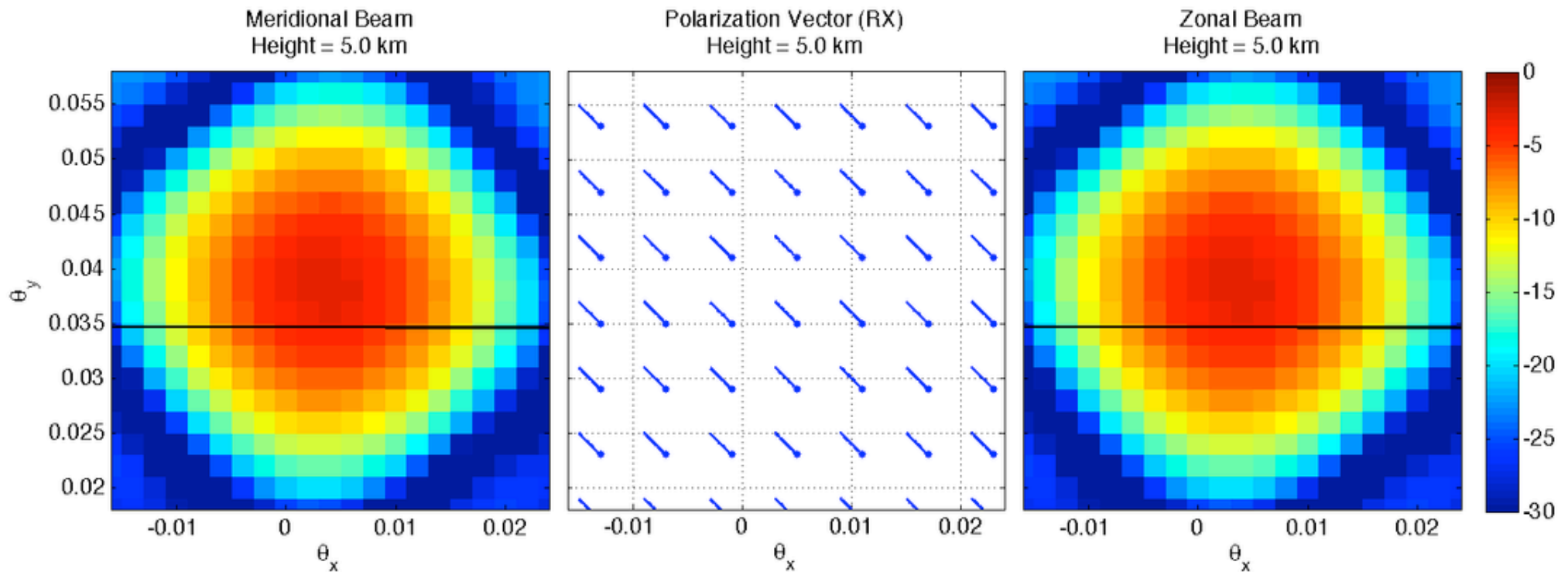
Perfiles de potencia y correlación cruzada



Haz de la antena modificado por los efectos de propagación magneto-iónica

Simulación

Haz de la antena modificado por los efectos de propagación magneto-iónica



Simulación

Resumen y trabajos futuros

- El modelado del espectro de dispersión incoherente perpendicular a B medido por el radar de Jicamarca debe considerar
 - Efectos de colisiones en los electrones e iones
 - Efectos de propagación magneto-iónica
 - Integrado por el haz de la antenna
- Se requiere un análisis espectral full-profile para invertir densidades, temperaturas, y drifts simultáneamente.
- Las herramientas para el modelado del espectro se han desarrollado en forma paralela, el paso siguiente es la unión de los modelos, en una sola herramienta para poder realizar las inversiones.
- Otras configuraciones de radar que combinan haces perpendiculares y fuera de perpendicular están siendo estudiadas.