

# Detecção de Meteoros nas Escolas Usando Técnicas de RADAR

Fernando Marroquim  
IF/UFRJ



# Apresentação

- Introdução.
- Motivação
- Método
- Ondas Electromagnéticas
- Aparato Experimental
- Meteoros
- Aviões
- Relâmpagos
- Raios Cósmicos
- Conclusões

# Colaboração

- O estudo apresentado é feito em Colaboração com BNL(Brookhaven National Laboratory) liderado pelo Dr. Hélio Takai que fez o doutorado aqui no IF.
- No BNL há o projeto MARIACHI (Mixed Apparatus for Radio Investigation of Atmospheric Cosmicray of High Ionization) que envolve escolas secundárias, universidades e voluntários (rádio-amadores, curiosos, etc.) e vem obtendo um grande apoio da NSF.
- No Brasil estamos trabalhando no projeto DRACON(Detecção de RAios Cosmicos com ONdas electromagnéticas).

# Raios C3smicos $UE > 10^{15}$ eV

- Grande interesse dos astrof3sicos em entender a natureza, origem, fluxo, etc destas part3culas. De onde ele vem? Como s3o produzidos? S3o sobreviventes do in3cio da forma33o do Universo? S3o res3duos da supernovas?
- Nova e interessante f3sica pode ser explorada, inclusive al3m do Modelo Padr3o, estudando-se a intera33o destas part3culas com a atmosfera.
- Temos recentes trabalhos te3ricos que sugerem a possibilidade de se produzir “mini-black holes” os quais seriam assinaturas da exist3ncia de dimens3es f3sicas extras.

# Caracterização do Problema

- Atualmente somente com raios cósmicos ultra-energéticos é que se tem acesso ao estudo da Física em escalas de energias acima de  $10^6$  TeV.
- Estes eventos são raros e para se ter uma estatística razoável são precisos detectores que cubram uma grande área.



# Caracterização do Problema

- O fluxo de partícula primária para partículas acima de  $10^6$  TeV é menor que de 1 partícula /  $\text{km}^2$  por ano.
- Na tecnologia convencional cobrem-se áreas de alguns milhares de  $\text{km}^2$  com detectores espaçados e fica assim restrita pelo enorme custo, limitações físicas, etc.

# Onda Eletromagnética

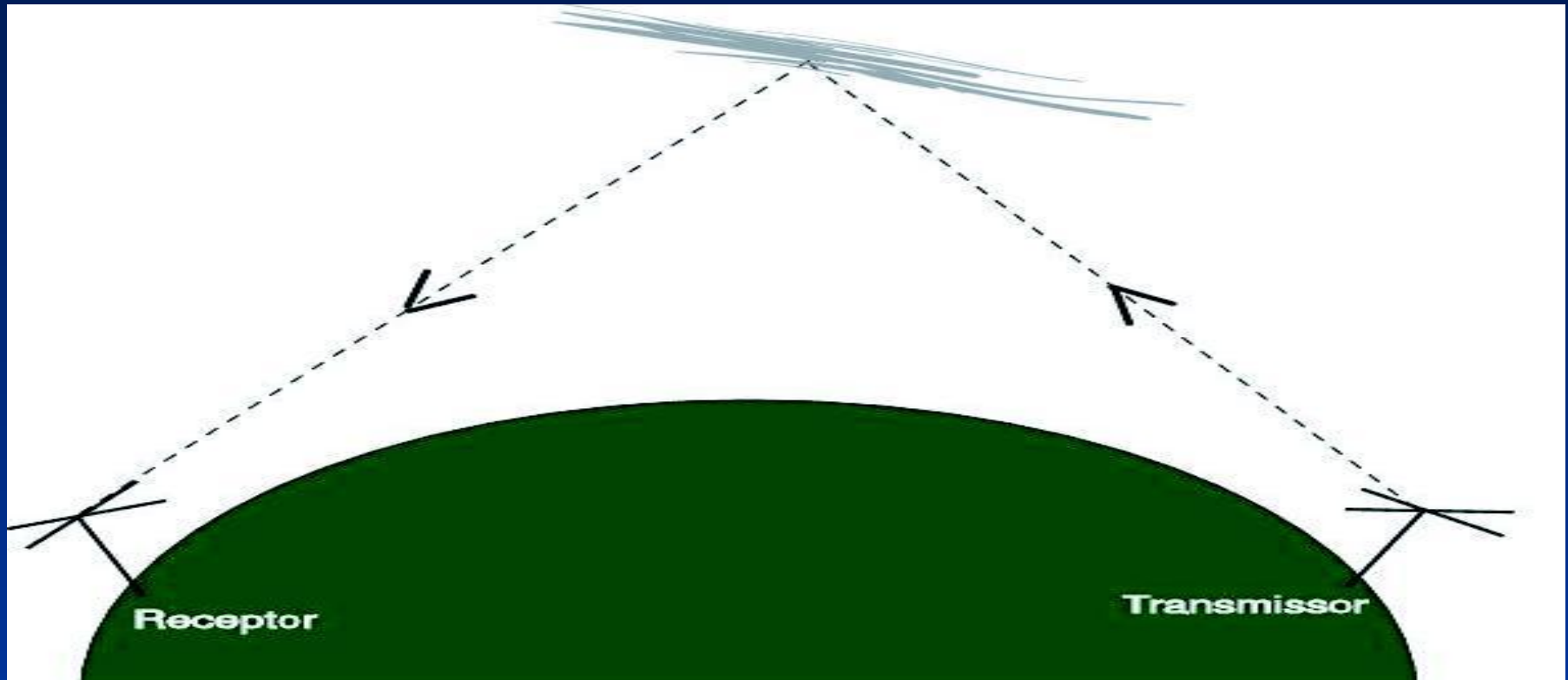
- Partículas carregadas geram campo elétrico.
- Partículas carregadas em movimento geram campo magnético.
- Partículas carregadas aceleradas emitem ondas eletromagnéticas.
- A luz é uma “forma” de onda eletromagnética.
- Um elétron ao ser atingido por uma OEM ele começa a oscilar e portanto também emite OEM.

# Proposta

- Aplicar a técnica do espalhamento de uma onda eletromagnética contínua emitida pelas estações comerciais de televisão para se detectar raios cósmicos ultra-energéticos.
- Adaptando a técnica “Radio Meteor Scatter” (RMS), há décadas usada, para se estudar diversas características de meteoros e micro-meteoros cobrindo uma grande área.



# Método RMS (RADAR Parisítico)



.A antena receptora fica na “sombra” do sinal da antena transmissora. A receptora só detecta um sinal caso “*alguma coisa*” reflita o sinal para a receptora.

# Eventos Detectáveis

Essa “alguma coisa” pode ser:

- Aviões
- Meteoros
- Relâmpagos e Raios
- Nuvens Elétricamente Carregadas
- Fenômenos atmosféricos que produzam ionização.
- Raios Cósmicos (?)
- OVNI(??)
- ???

# Técnica RMS

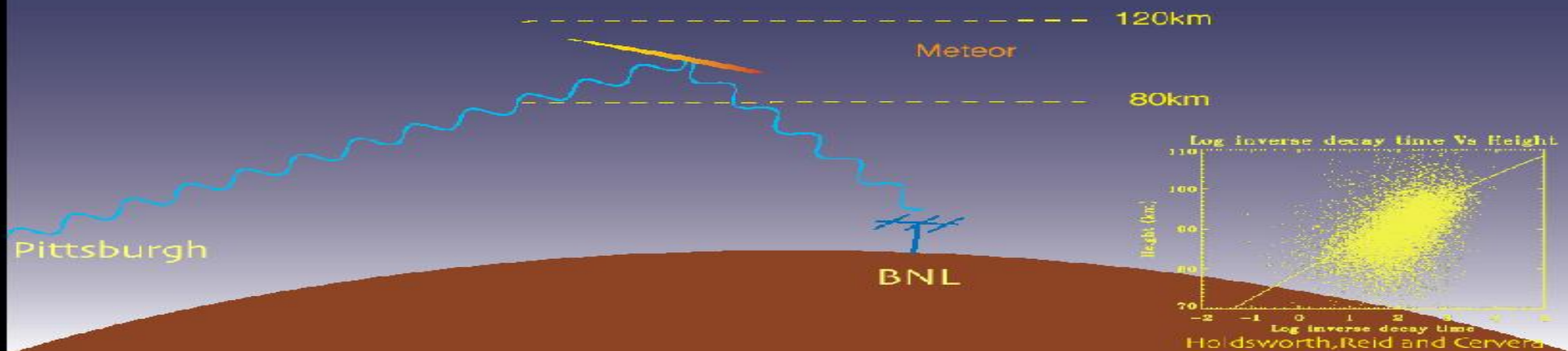
Curvatura da Terra impede que um receptor a grande distância do transmissor, e operando na mesma frequência, receba diretamente o sinal proveniente deste último.

- O meteoro deixa um rastro de ar ionizado (cauda), que pode passar a refletir as ondas provenientes do transmissor, podendo ser detectadas pelo receptor.

## Radio Meteor Scatter

Meteors when entering earth's atmosphere vaporizes creating an ionized trail.

Radio waves from far (1000-2000 km typical) are reflected by the ionization created by them.



# Proposta Nova para RC ?

- Colwell & Friend (1937), Appleton & Piddington (1936) & muitos outros “mediram” ecos de transientes esporádicos de radar pulsado na faixa de 1-10 MHz.
- Blackett & Lovell (1940) propuseram que pode ser devido aos grandes chuveciros atmosféricos .
- B&L estimaram muito bem o fluxo de raios cósmicos e seção de choque do radar. Alguém testou esta proposta?
- K. Suga (1962) & T. Matano et al (1968) reanalisaram o problema mas nenhum resultado experimental foi relatado.
- Até o momento nenhum resultado.....
- Possível agora usando novas técnicas ?



# Espectro da Onda EM

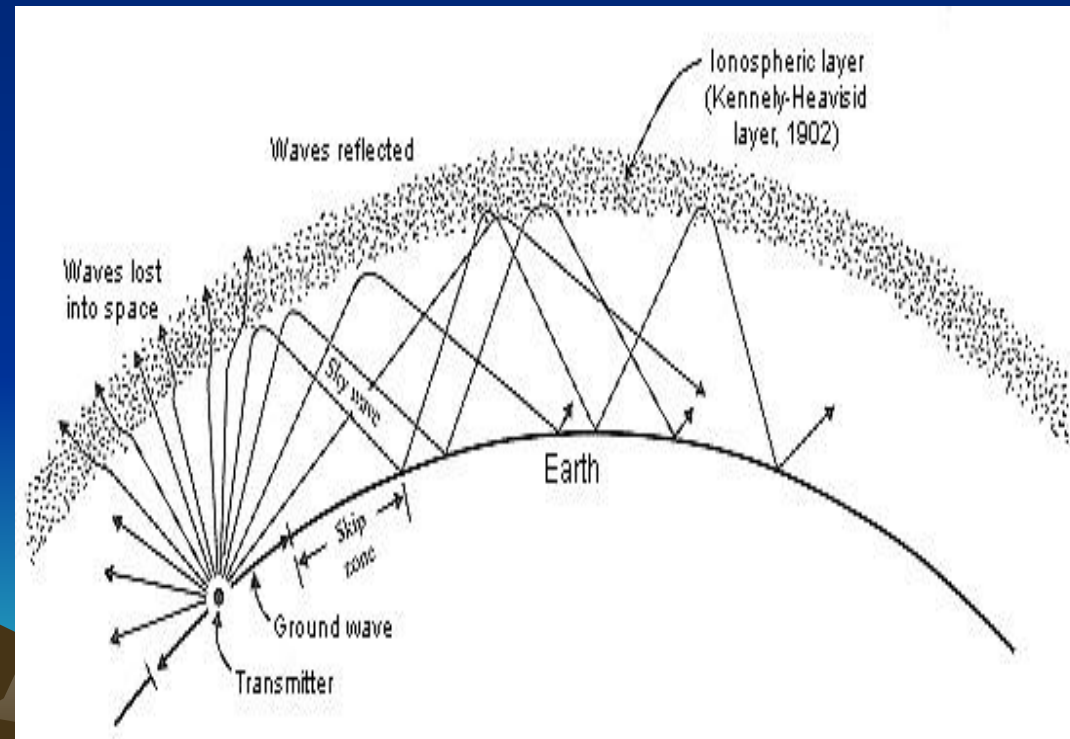
- Ondas de Alta Freqüência (HF) – 3 a 30 MHz
  - Refletem na atmosfera terrestre, retornando à superfície terrestre;
  - Utilizadas para comunicação em grandes distâncias por radioamadores.
- Ondas de Freqüência Muito Alta (VHF) – 30 a 300 MHz
  - Não refletem na atmosfera terrestre, sendo restritas a área local;
  - Utilizadas por transmissões de rádio FM, televisão aberta, balizas de aviões, etc.



# Espectro da Onda EM

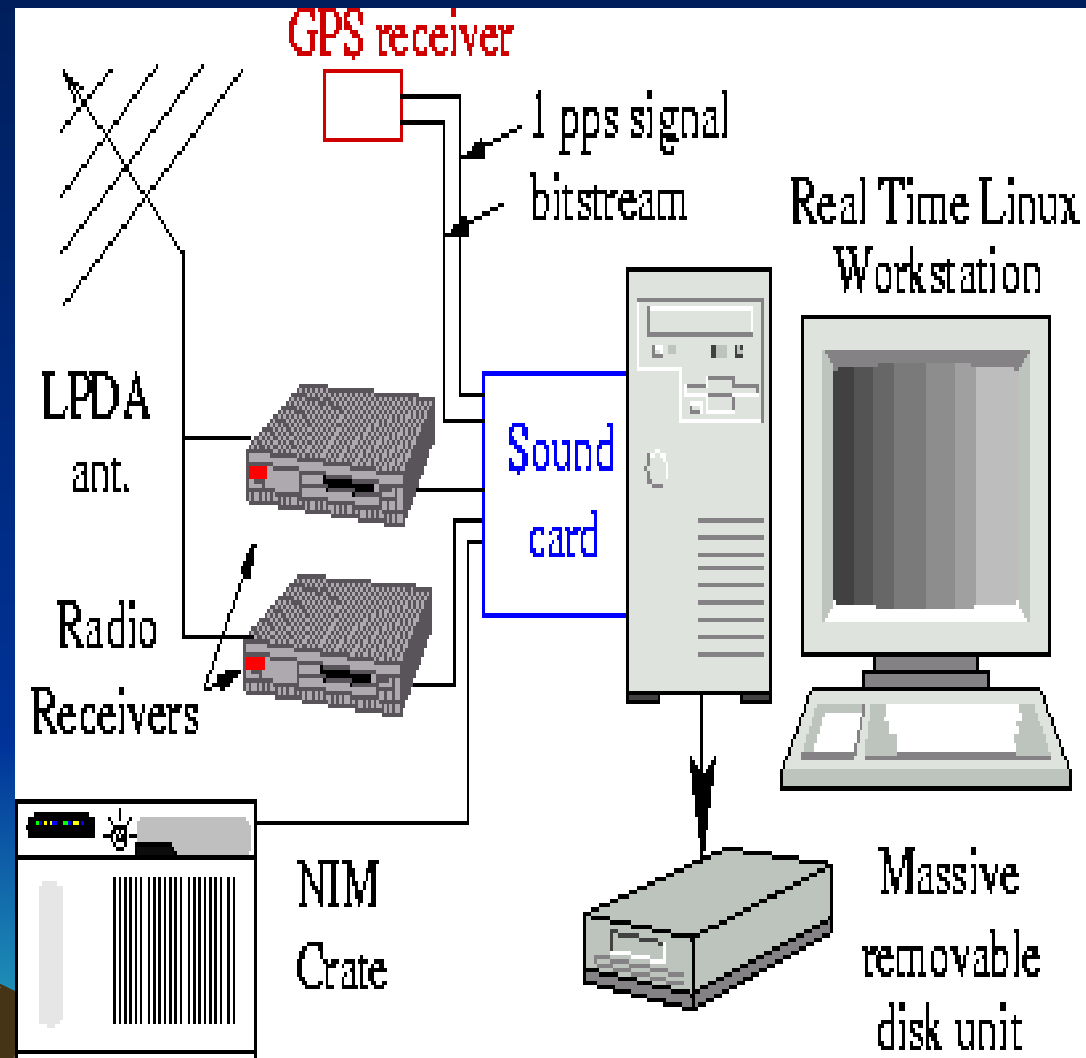
Canal	Faixa de Freqüência (MHz)
2	54-60
3	60-66
4	66-72
5	76-82
6	82-88
7	174-180
8	180-186
9	186-192
10	192-198
11	198-204
12	204-210
13	210-216

- Estamos usando aqui na UFRJ a freqüência de 61,25MHz, Canal 3

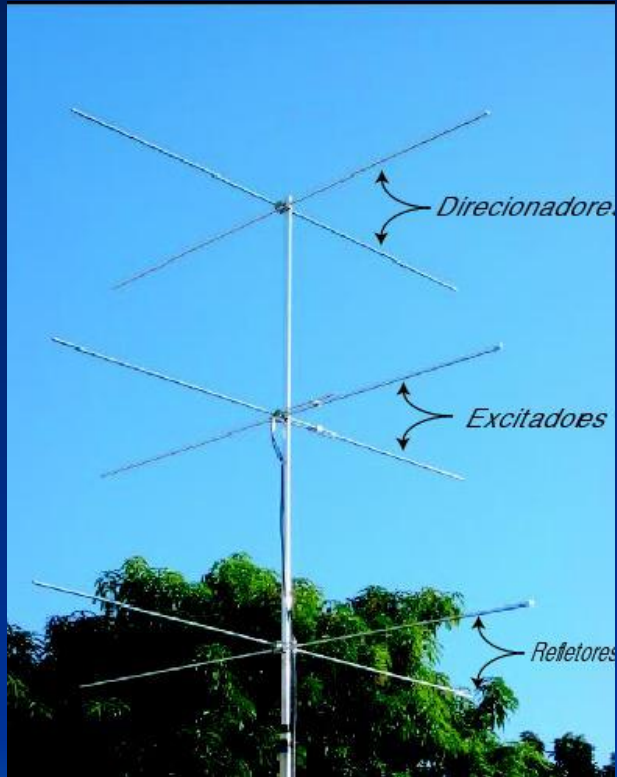


# Aparato Experimental

- Kit Inicial
  - MicroComputador
  - Um radio receiver controlado por microcomputador
  - Uma placa de som de boa qualidade, 96kHz
  - Um GPS
  - Uma antena



# Antenas



Antena capaz de captar ondas com qualquer polarização num hemisferio. É preciso fazer um estudo detalhado para as antenas.



# Antenas



É preciso fazer um estudo detalhado para as antenas.

# Antenas



É preciso fazer um estudo detalhado para as antenas.

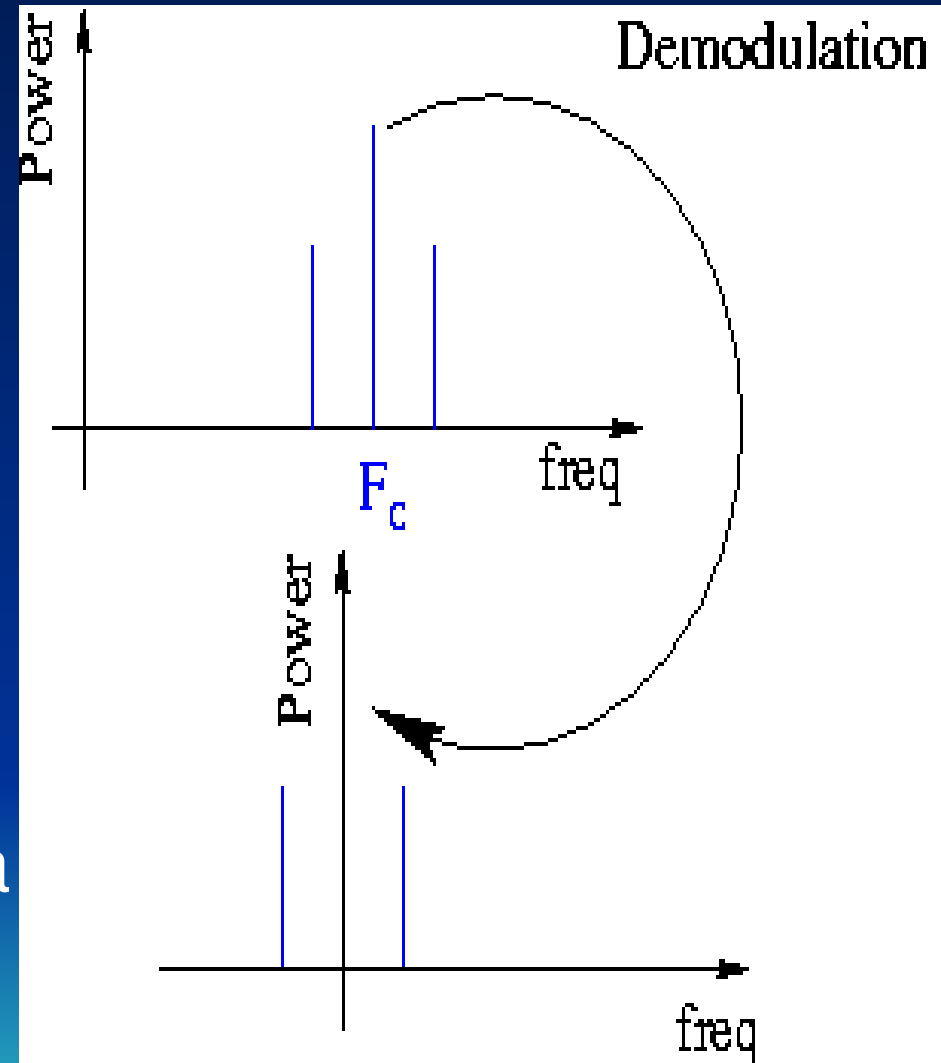
# Antenas



É preciso fazer um estudo detalhado para as antenas.

# Método de Análise

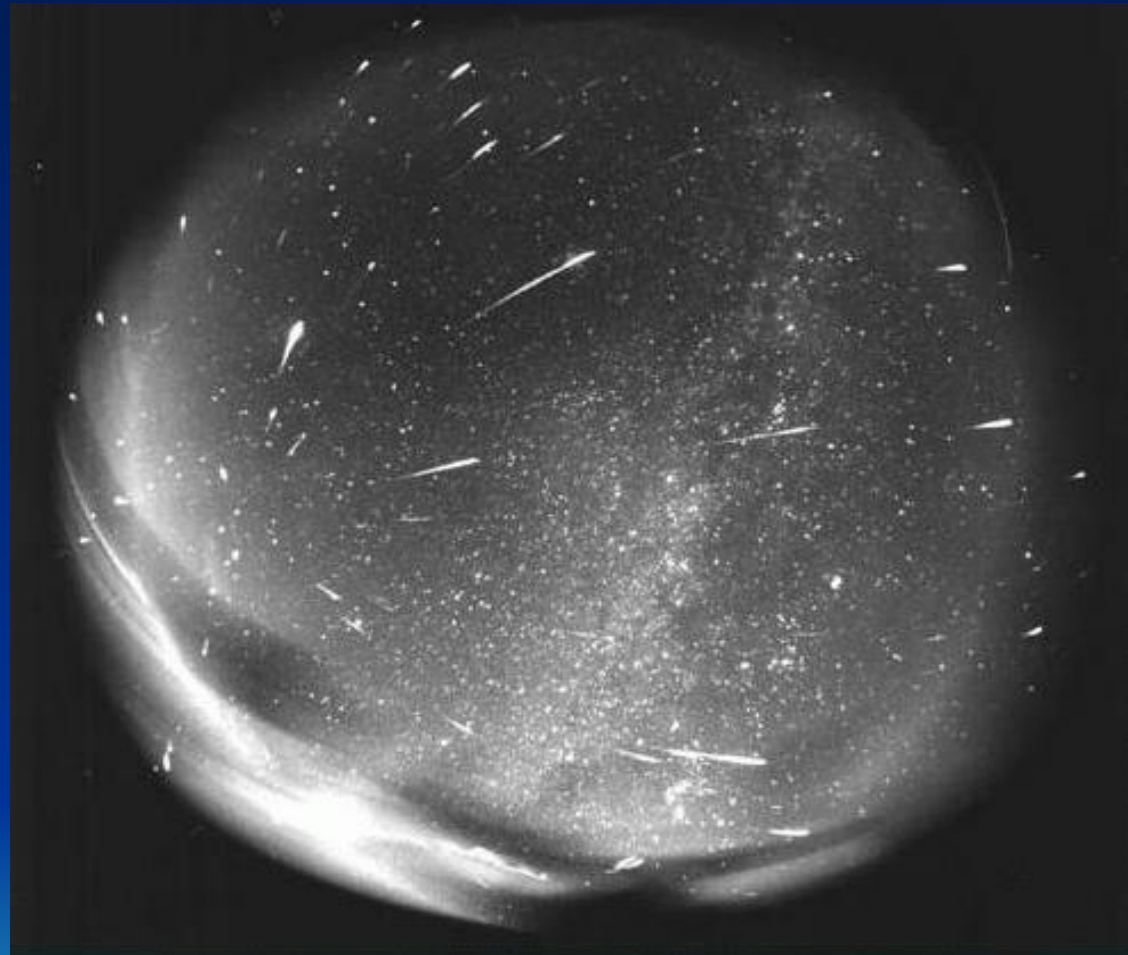
- O radio receiver faz a demodulação do sinal recebido.
- A frequência da portadora  $F_c$  é “transladada” para a posição  $\sim 0$  Hz chamada de demodulação.
- As ondas refletidas sofrem variações em torno de  $F_c$ .
- Análise da amplitude da onda demodulada adquirida e de sua transf. de Fourier



# Meteoros

## Dois tipos:

- **Esporádicos:**
  - Vistos por todo o ano;
- **Periódicos ou Chuvas de Meteoros:**
  - Vistos durante alguns dias do ano e parecem originar de um único ponto ou pequena área do céu (radiante);
  - São conhecidos pela constelação da qual parecem se originar.



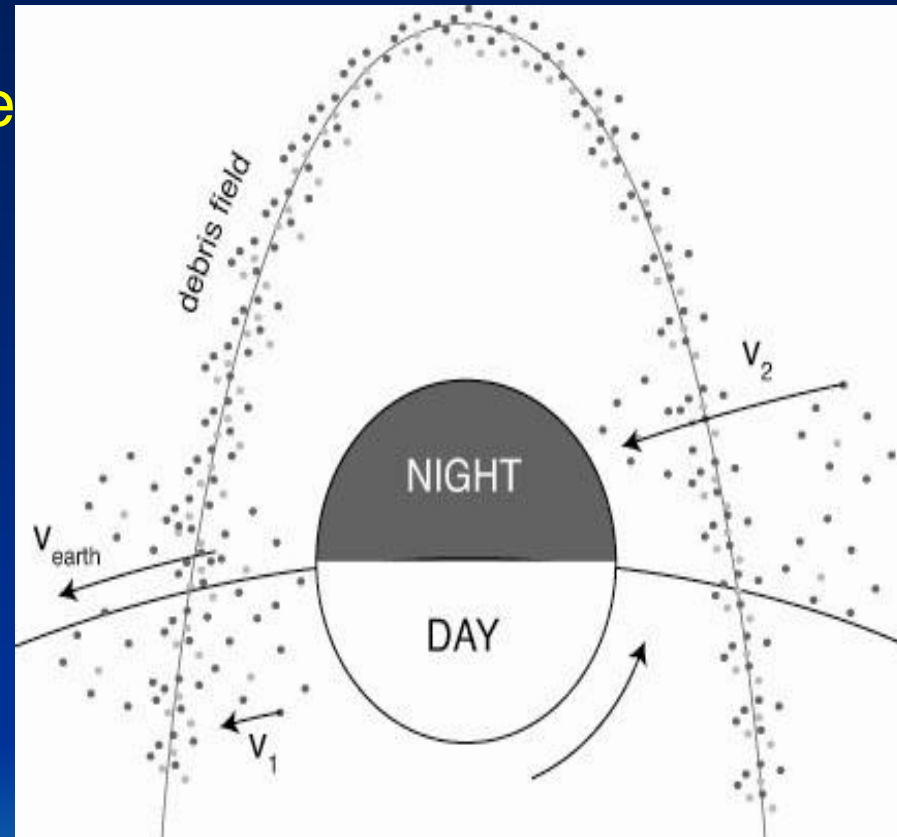
This four-hour exposure, taken by Juraj Toth of Modra Observatory during the 1998 Leonid meteor shower demonstrates how meteor showers appear emanate from a certain point in the sky -- the *radiant*.

# Meteoros

<b>Chuva</b>	<b>Período de Visibilidade</b>
Quadrantídeos	1 a 4 de Janeiro
Lirídeos	19 a 24 de Abril
Aquarídeos	21 de Abril a 12 de Maio
Arietídeos	29 de Maio a 19 de Junho
Aquarídeos Austrais	21 de Julho a 15 de Agosto
Perseídeos	15 de Julho a 17 de Agosto
Orionídeos	18 a 26 de Outubro
Taurídeos Austrais	18 de Setembro a 15 de Dezembro
Leonídeos	14 a 20 de Novembro
Geminídeos	7 a 15 de Dezembro
Ursídeos	17 a 24 de Dezembro

# Meteoros: Incidência

- Há maior fluxo de meteoros durante o dia.
- Velocidade da Terra em relação ao Sol:  $v_{TS} = 30\text{km/s}$
- Velocidade de escape do sistema solar:  $v_{ESS} = 42\text{km/s}$
- Velocidade máxima em relação a Terra  $v_{tmax} = 72\text{km/s}$ .



A massa terrestre aumenta mais de  $10^6$  kg por ano devido a incidência de meteoros.

# Meteoros: Cauda

- **Altitude:**
  - Depende da velocidade, massa e ângulo zênite do meteoro;
  - Geralmente:  $80\text{km} < h < 120\text{km}$
- **Comprimento:**
  - Depende da massa e do ângulo zênite;
  - Meteoros esporádicos:  $\sim 15\text{km}$
  - Meteoros periódicos:  $\sim 50\text{km}$

Raio inicial:  $0.55\text{ m} < r_0 < 4.35\text{ m}$

– Pode ser aproximado por:

- $\mu_a$  – massa média dos átomos da atmosfera;
- $v$  – velocidade do meteoro;
- $\rho_a$  – densidade atmosférica.

• **Difusão:**

$$r = \sqrt{r_0^2 + 4D_a t}$$

$$D_a = \frac{7 \mu_a}{8 \rho_a \delta} \sqrt{\frac{kT}{\pi \mu_m}}$$

- $D_a$  – coeficiente de difusão;
- $k$  – constante de Boltzmann;
- $T$  – temperatura;
- $\mu_m$  – massa média dos átomos;
- $\delta = 7 \times 10^{-19}\text{ m}^2$ . Em um segundo o raio varia de 2 a 20 metros.

$$\log_{10} D_a = 0.067 h - 5.6$$



# Meteoros: Cauda

- A cauda do meteoro é um plasma com frequência característica:

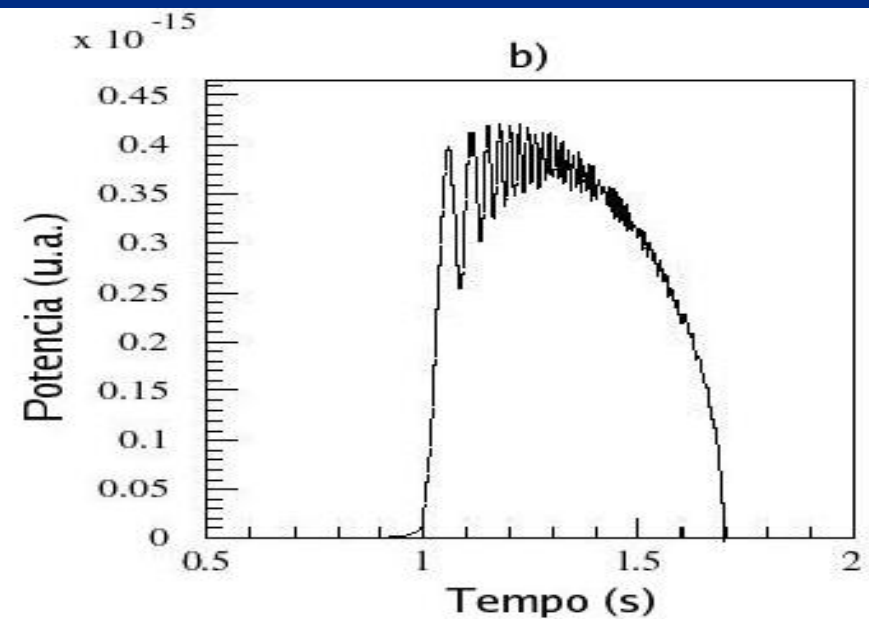
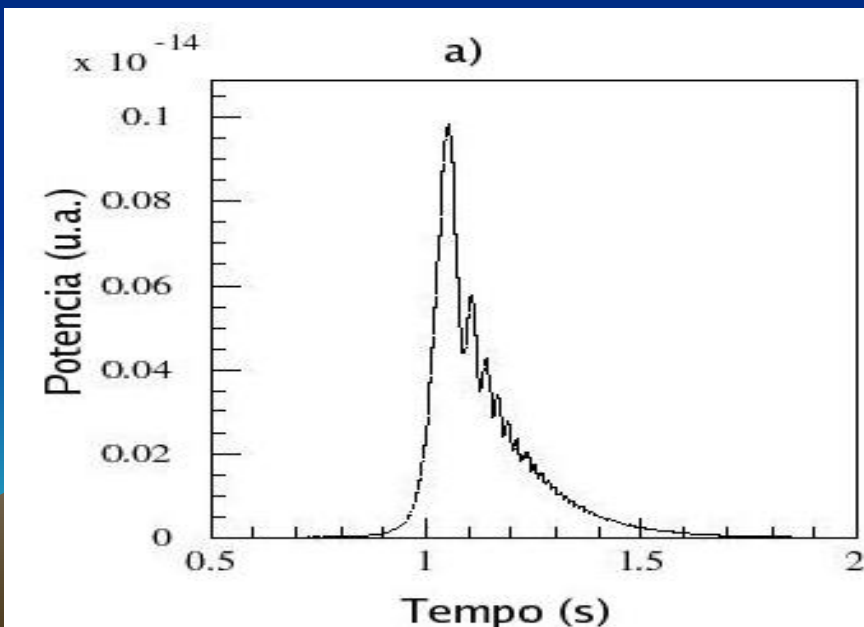
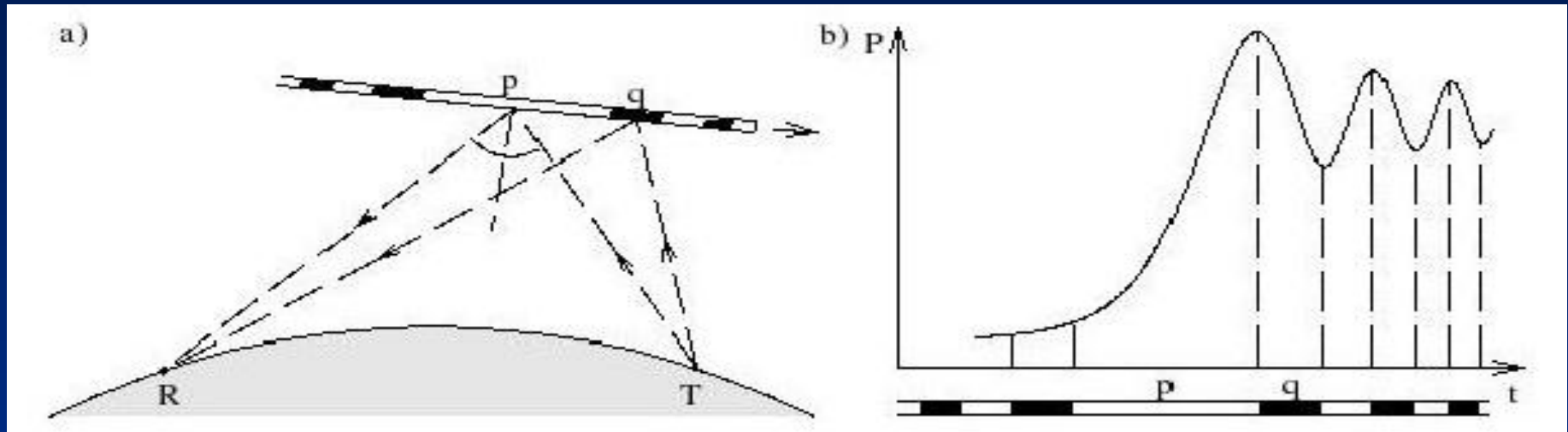
$$f_{\text{plasma}} = \sqrt{N_e e^2 / \epsilon_0 m_e} / (2 \pi)$$

Espera-se  $N_e$  da ordem  $10^{14}$  a  $10^{20}$  eletrons/m<sup>3</sup>

- Dois casos:

- Caudas Sub-densas:  $f_{\text{portadora}} < f_{\text{plasma}}$ . O espalhamento é feito individualmente por cada elétron;
  - Caudas Super-densas:  $f_{\text{portadora}} > f_{\text{plasma}}$ . Reflete completamente a onda incidente e a cauda é tratada como um cilindro refletor.
- Para os Canais 2 ( $f_{\text{portadora}} = 55.25$  MHz) e 4 ( $f_{\text{portadora}} = 67.25$  MHz), o limite entre os dois casos ocorre quando  $N_e = 3.86 \times 10^7$  cm<sup>-3</sup> e  $N_e = 5.61 \times 10^7$  cm<sup>-3</sup>.
  - A frequência ideal da portadora está entre 50 a 120 MHz;
  - Acima de 120 MHz, a capacidade de reflexão da cauda diminui.

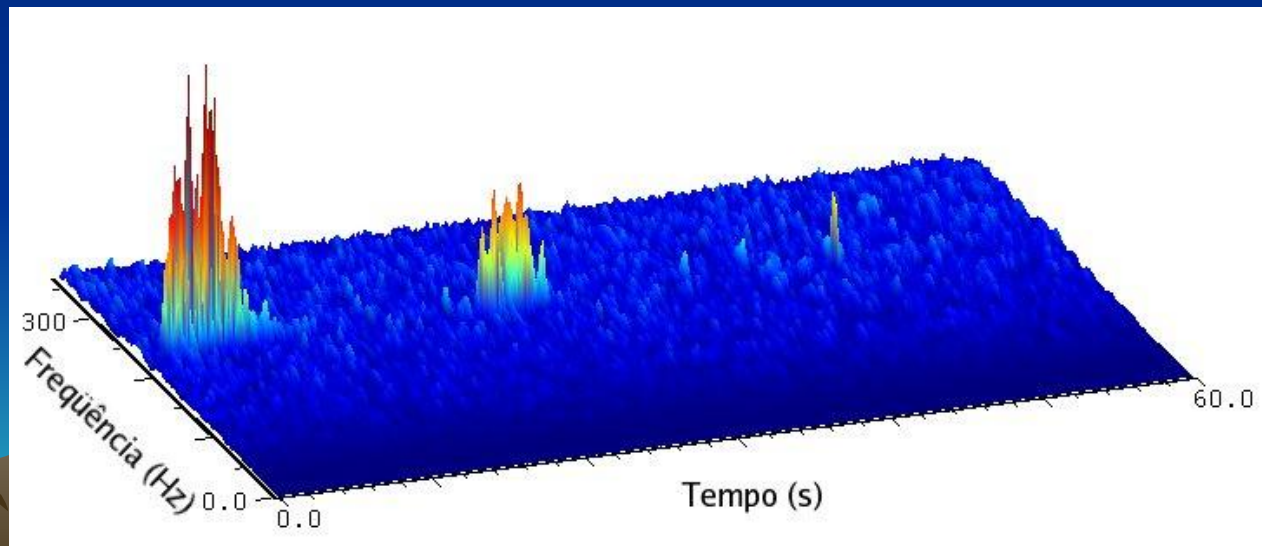
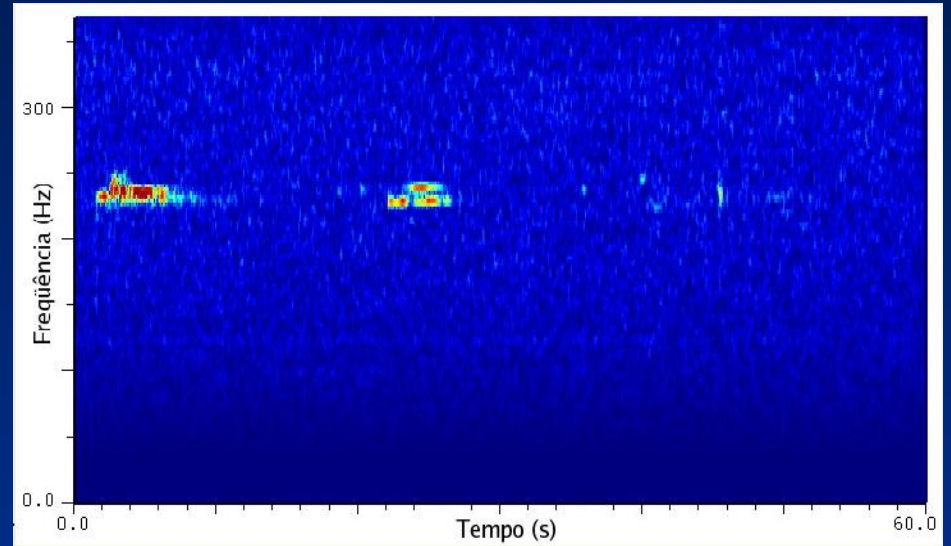
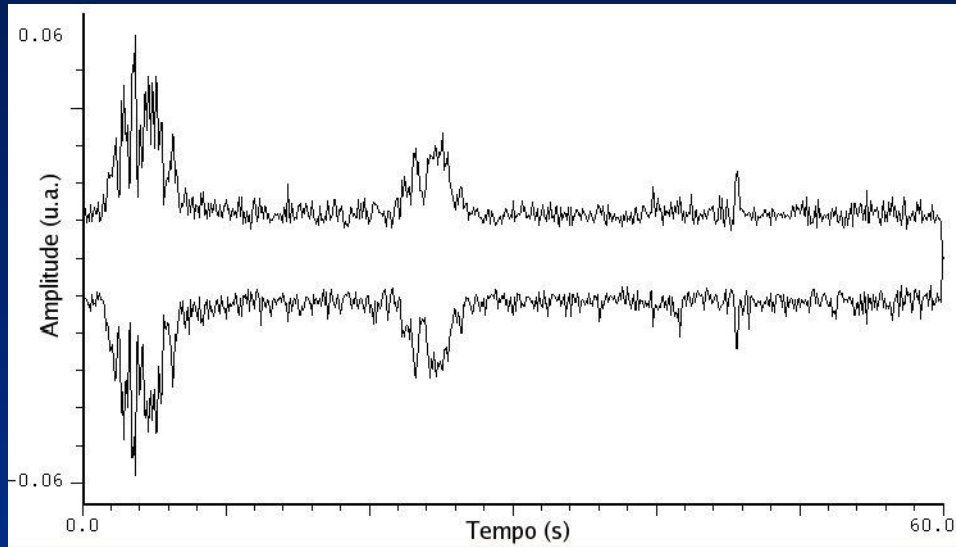
# Meteoros: Reflexão pela Cauda



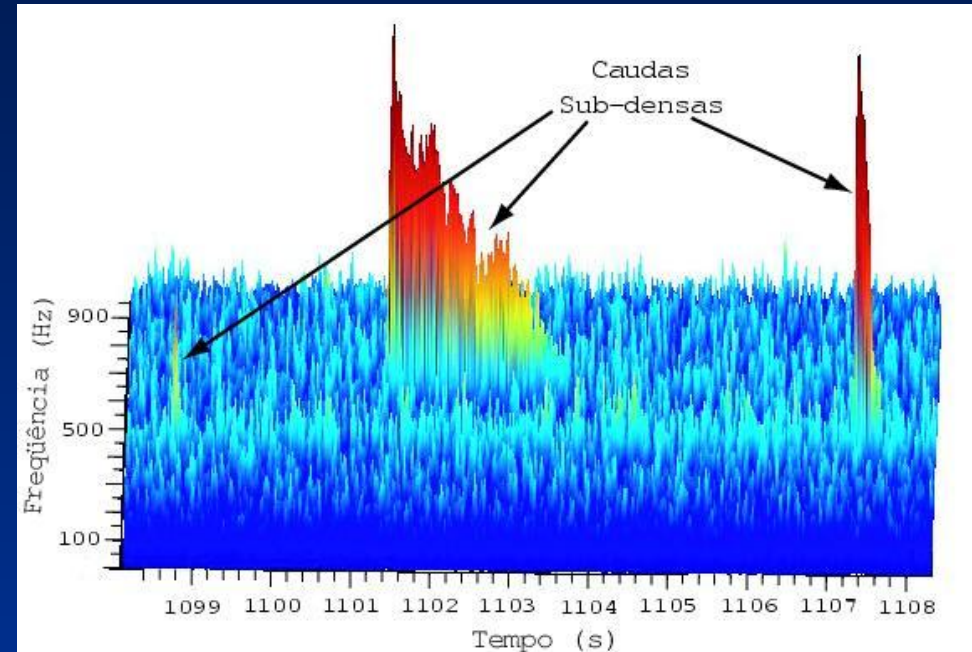
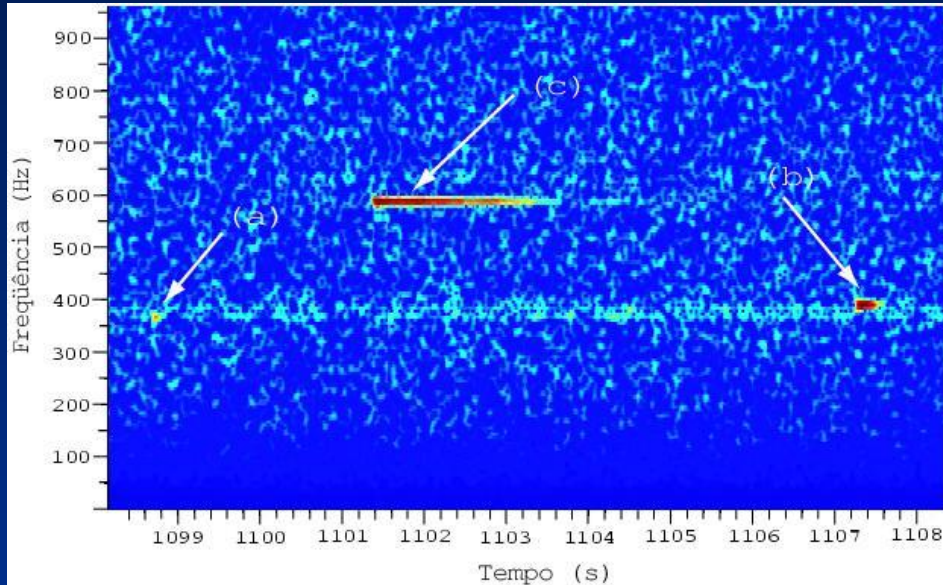
# Meteoros: Mostrar Filme



# Meteoros: Sinais (Som)

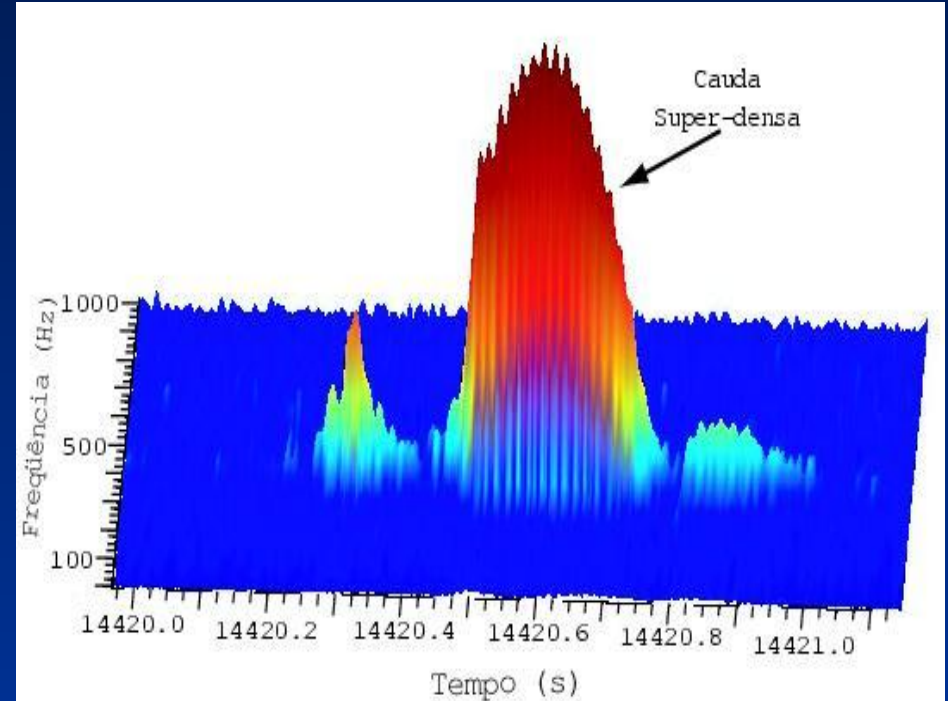
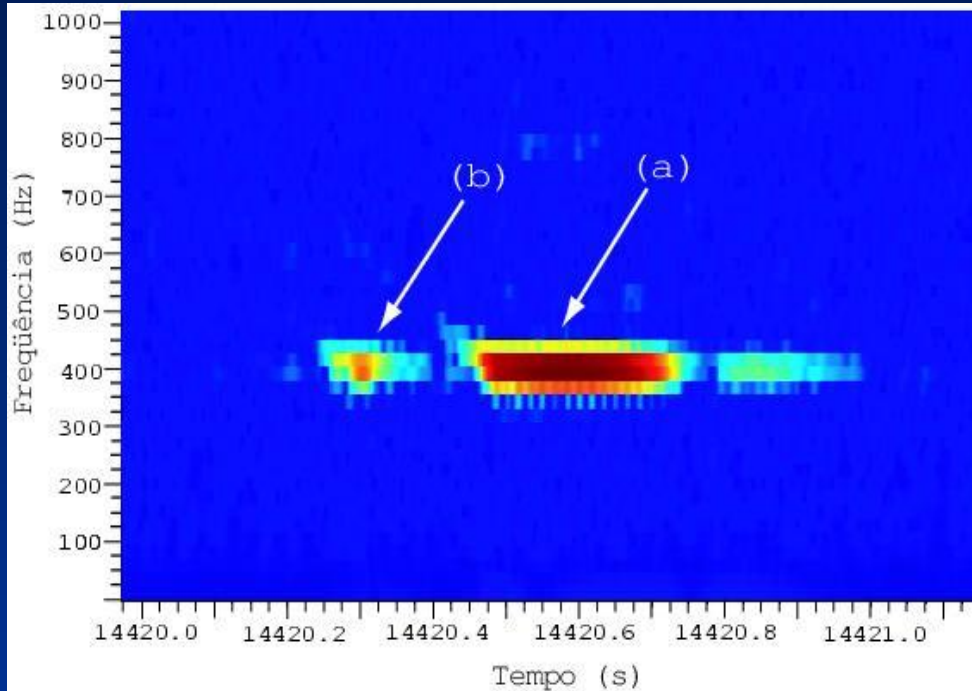


# Meteoros: Sinais Sub-Densos



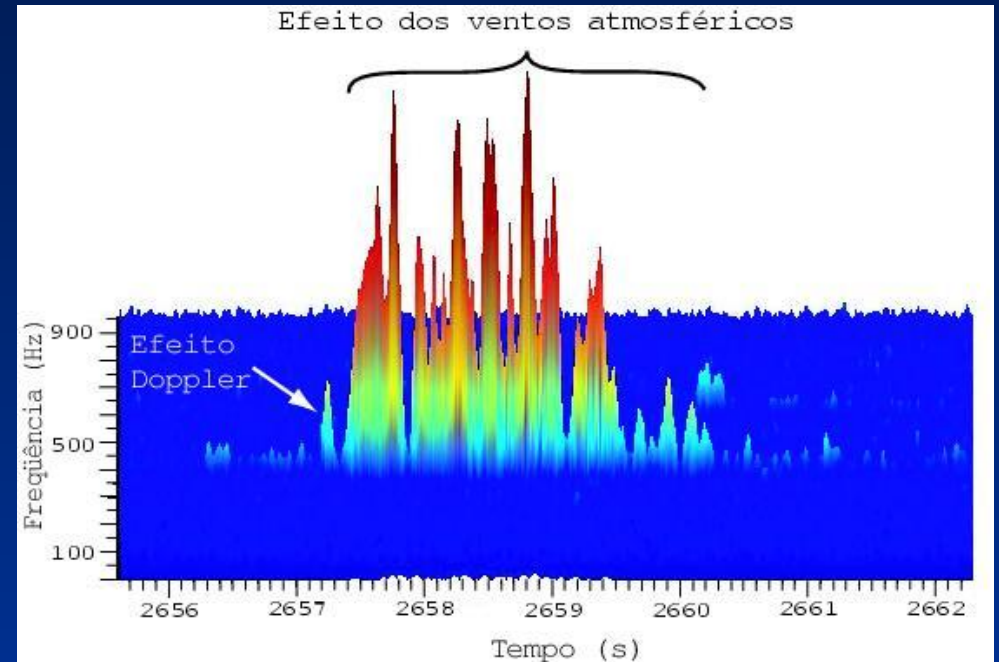
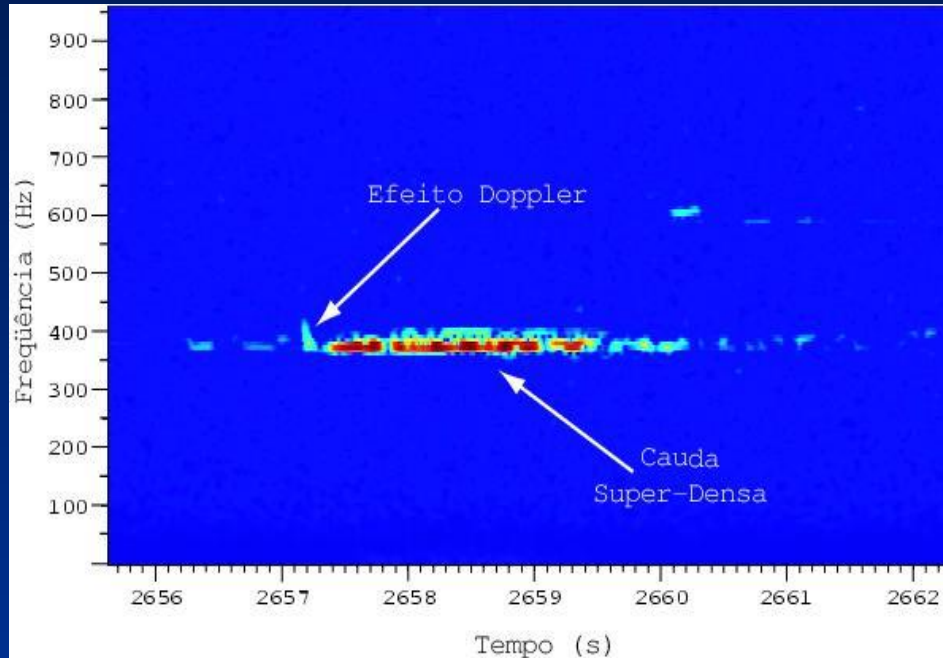
- (a) Cauda sub-densa se afastando da estação receptora;
- (b) Cauda sub-densa se aproximando da estação receptora;
- (c) Longa cauda sub-densa.

# Meteoros: Sinais Super-Densos



- (a) Cauda super-densa;
- (b) Cauda sub-densa ou fragmentação da cauda super-densa.

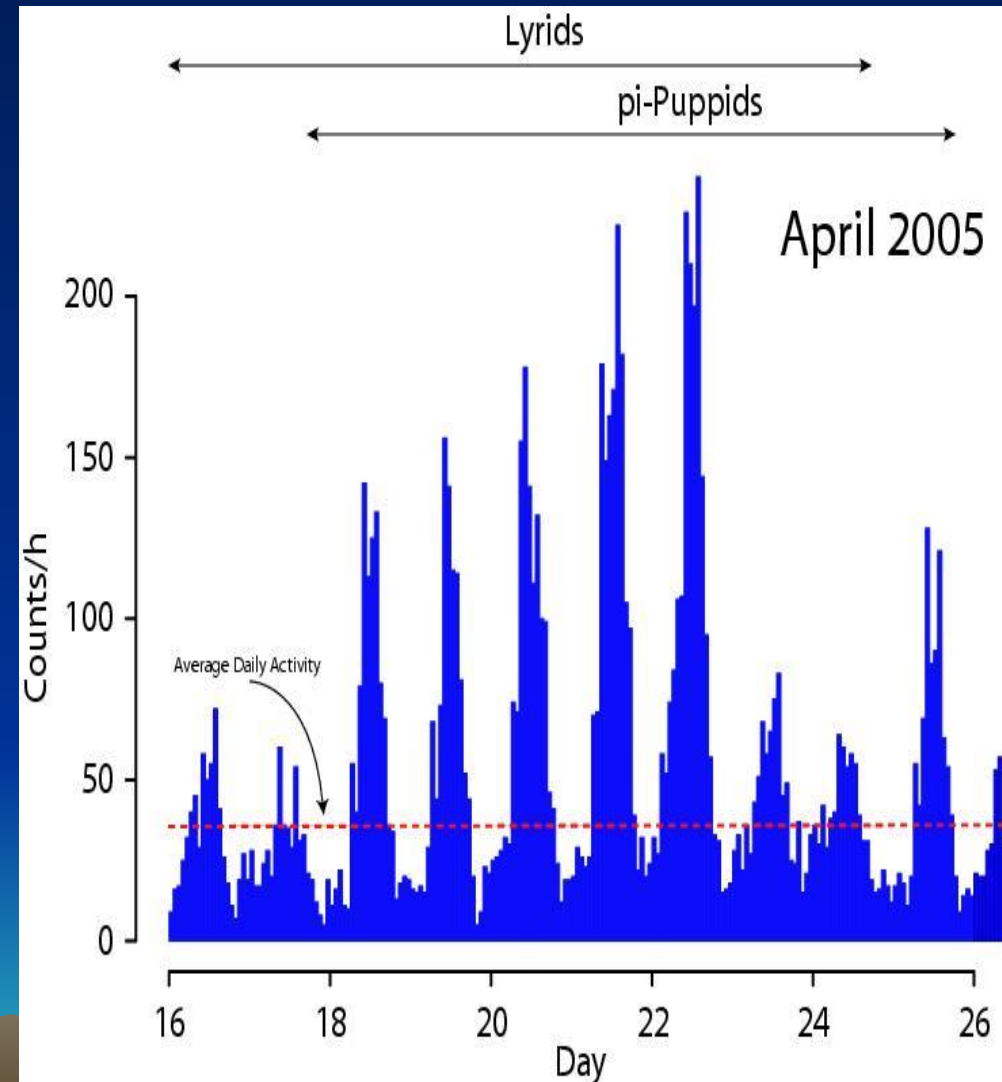
# Meteoros: Sinais com Vento



- Observa-se o efeito Doppler causado pela reflexão da ionização na cabeça do meteoro;
- A interferência de ondas provenientes de diferentes pontos de reflexão produzem as oscilações observadas.

# Meteoros: Fluxo (Lirídeos)

- Ocorreu no período de 16 a 25 de Abril.
- Obtém-se um máximo durante o dia, por volta de 11 horas da manhã;
- A incidência máxima ocorreu em 22 de Abril, com mais de 200 meteoros por hora;
- Observa-se um aumento na contagem no dia 25 de Abril, devido à Chuva Pi-Puppids;
- Extensão do campo de meteoros de aproximadamente  $13 \times 10^6$  km;
- Adquirir dados nos próximos anos para observar se o campo de meteoros está se alterando.





# Meteoros

- Precisa-se de pelo menos três estações em diferentes posições para se determinar a posição da cauda do meteoro. Triângulação.
- Pode-se utilizar diversas frequências para se estudar a evolução da cauda do meteororo já que cada frequência vai penetrar diferentemente na região ionizada
- Pretendemos colocar estações no CAP-UFRJ, CEFET-Rio, Pedro II e FAETEC- Nova Iguaçu.

# METEOROS

- Professores e alunos participariam de workshops teóricos e experimentais para:
- Montagem da experiência (antena, micro, etc)
- Aquisição de dados.
- Análise de dados.
- Colocaríamos todos os dados num servidor central e estes estarão disponíveis para todos.

# Meteoros: Vantagens do Método

Independente das condições meteorológicas;

Pode-se adquirir dados 24 horas por dia;

Detecta-se meteoros a partir microgramas;

Baixo custo do sistema;

Fácil instalação;

Ampla área de cobertura  $\sim 10^6 \text{ km}^2$



# Meteoros: Alguns Estudos

- Distribuição de velocidade
- Distribuição de massa
- $dm/dt$  ao penetrar a atmosfera
- Acompanhar a trajetória e obter posição aproximada de queda.
- Variação anual da largura do campo de meteoros.



# Meteoros: Alguns Estudos

- Variação anual da intensidade do campo de meteoros
- Aquisição simultâneas BNL, Rio, Florianópolis e João Pessoa .
- Procurar diferenças entre hemisférios Norte e Sul.
- Medir a densidade da camada de Ozônio
- Medir ventos no alto da atmosfera.
- etc



# Aviões

- A freqüência da onda recebida é dada pelo efeito Doppler Relativístico, que pode ser aproximado para:

$$\Delta f = -f_t \left[ \frac{\vec{r}_a}{|\vec{r}_a|} + \frac{(\vec{r}_a - \vec{r}_t)}{|\vec{r}_a - \vec{r}_t|} \cdot \frac{\vec{v}_a}{c} \right]$$

$$\Delta f = f_r - f_t$$

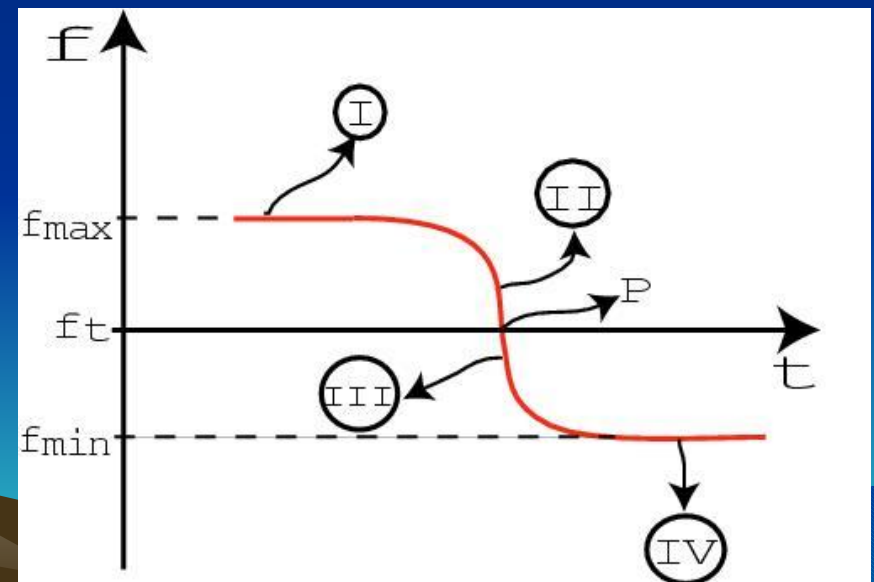
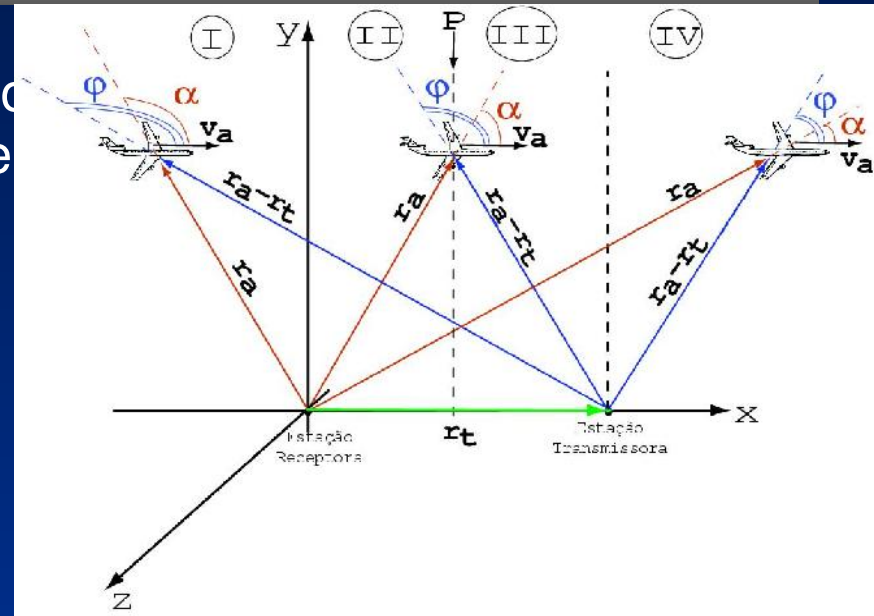
- Onde:

- $r_a$  = vetor posição do avião;
- $r_t$  = vetor posição da estação transmissora;
- $f_r$  = freqüência da onda recebida;
- $f_t$  = freqüência da onda transmitida;
- $v_a$  = velocidade do avião;
- $c$  = velocidade da luz.

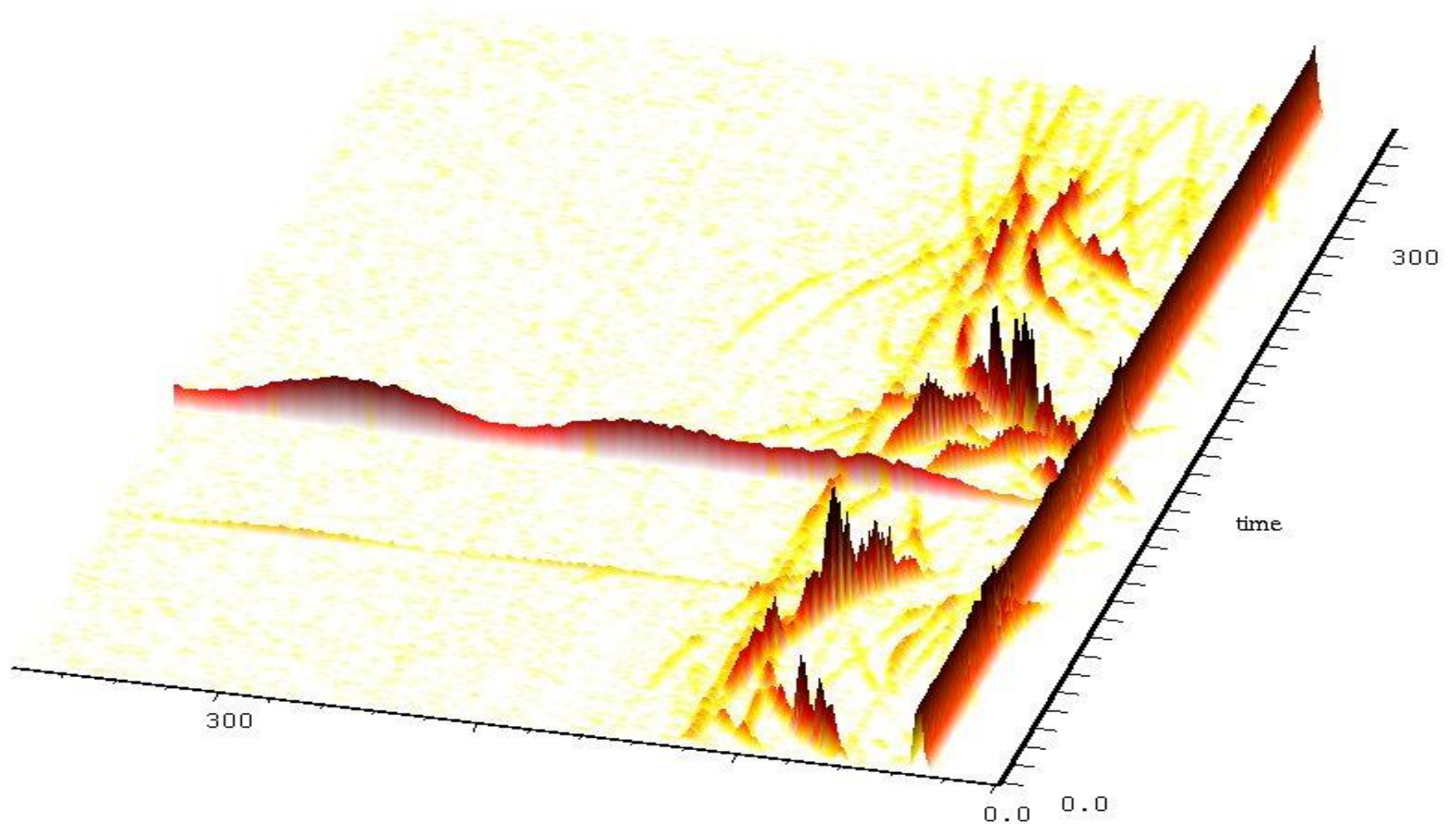
- Quando o avião estiver muito distante de ambas estações:

$$f_{max} = f_t \left( 1 + 2 \frac{v_a}{c} \right)$$

$$f_{min} = f_t \left( 1 - 2 \frac{v_a}{c} \right)$$



# Aviões: Transf. de Fourier



# Raios C3smicos

## A ioniza33o:

- Produzida por raios c3smicos ultra-energ3ticos 3 similar ou maior em magnitude do que as produzidas pelos meteoros apesar de serem de diferentes origens.
- Produzida pelos meteoros 3 devido a queima e dura at3 20 segundos pois sua velocidade 3 no m3ximo de 72km/s.





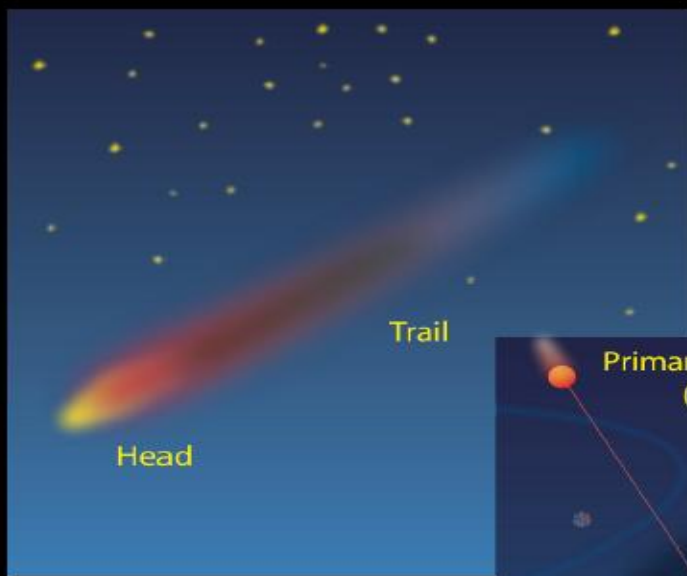
# Raios C3smicos: Ioniza33o

- A ioniza33o dos raios c3smicos 3 causada pelos subprodutos do chuveiro e dura at3 100 microseg e se propaga com a velocidade  $c$ .
- Se a t3cnica RMS tiver uma performance similar para os raios c3smicos ultra-energ3ticos obteremos um fator em potencial na estat3stica de  $10^3$  em rela33o a t3cnica convencional por um custo bem menor.



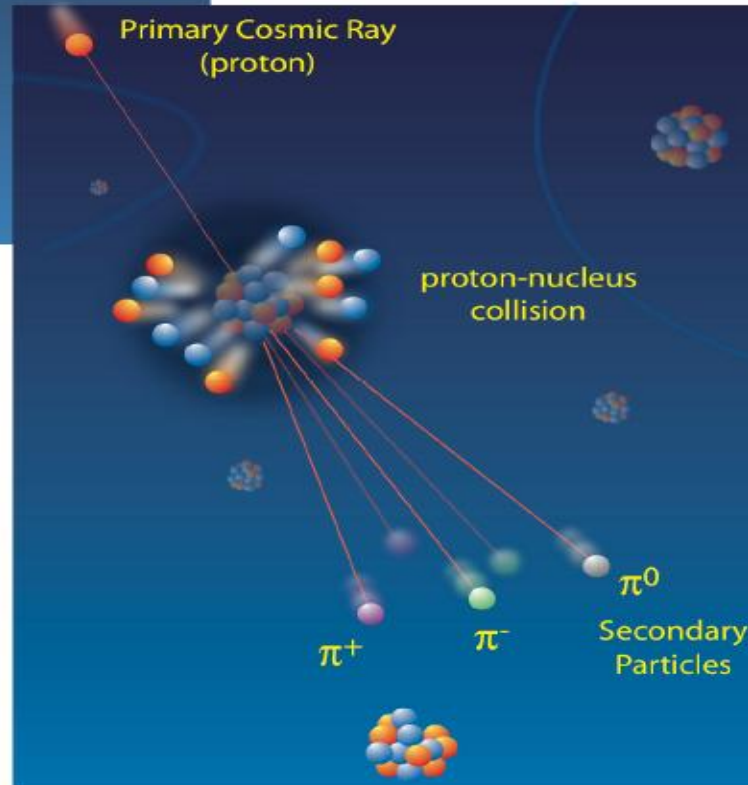
# Shower production and ionization<sup>4</sup>

Meteor

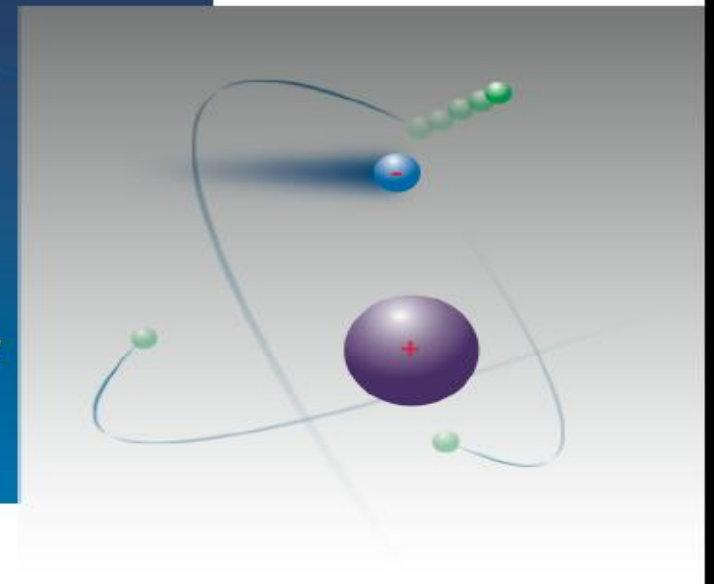


Trail

Head



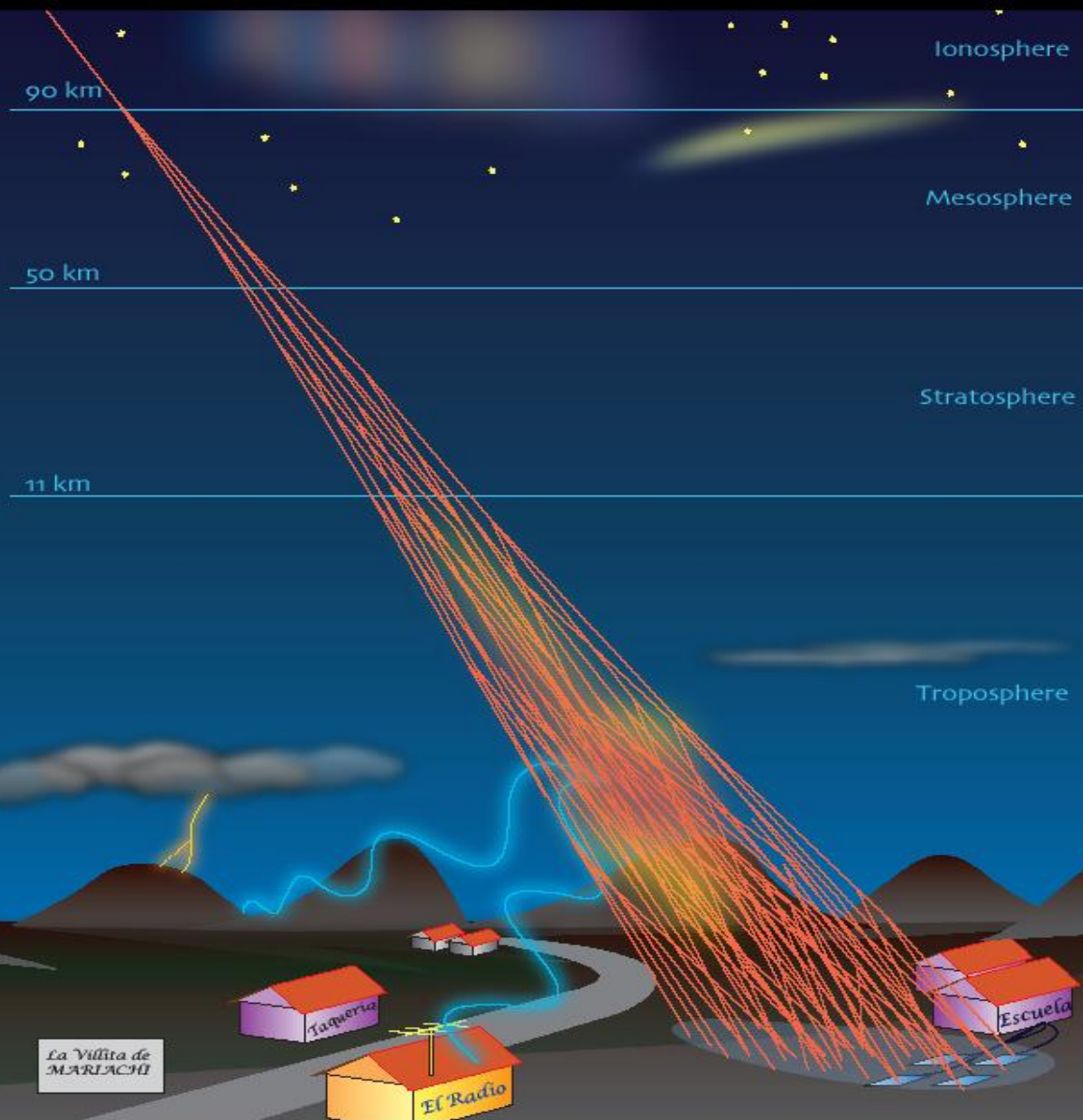
Particle  
Production



Cold Ionization

# A Experiência

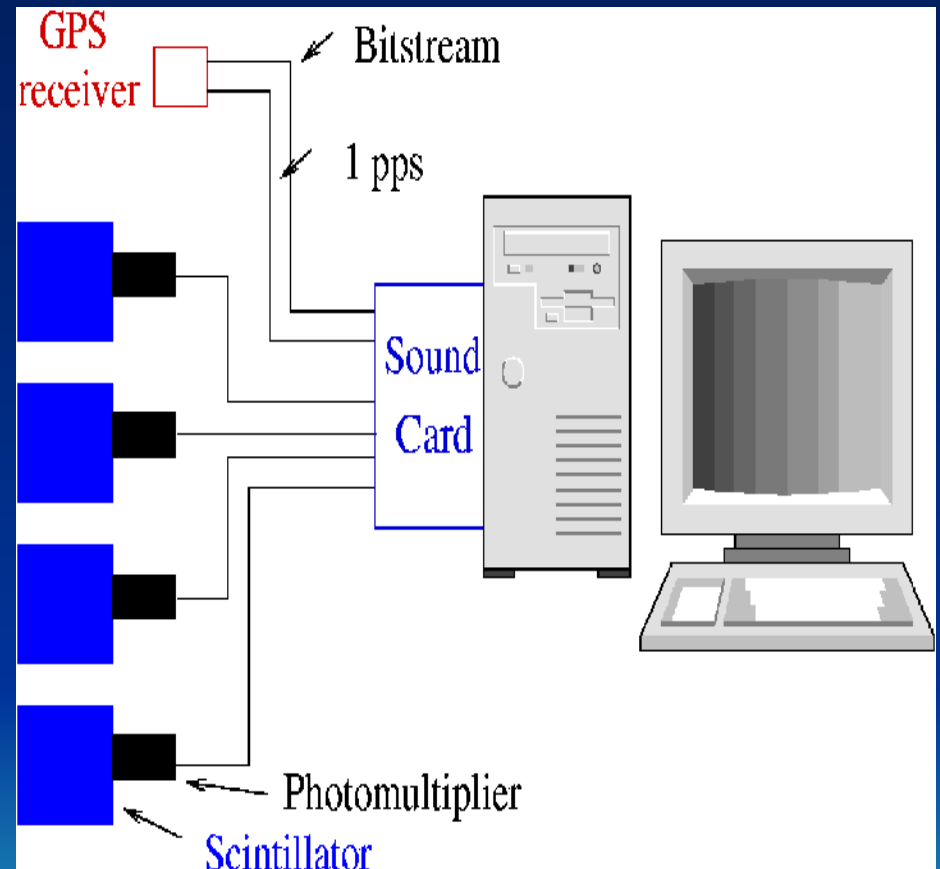
## The Experiment



# Coincidência de Eventos

Coincidência de eventos:

- Sistema de aquisição para foto-multiplicadoras.
- O sinal é inserido diretamente na placa de som (40 kHz frequência de corte).
- GPS para localizar eventos no tempo.
- Arranjo experimental flexível e de baixo custo.
- Idéia é colocar nas escolas.
- Substituir cintiladores por caixas d'água. Em estudo na UFRJ.



# Receita para Detectar Raios C3smicos

- 1. Obtenha a densidade de ioniza33o vs energia do chuveiro e altitude.
  - Podem ser estimados atrav3s de simula33es .
- 2. Obtenha a vida m3dia dos electrons livres na coluna de ar
  - Processo:  $e + O_2 \Rightarrow O^- + O$ . Pode ser calculado e/ou medido experimentalmente.
- 3. Obtenha a se33o de choque dos electrons livres
  - depende das caracter3sticas do plasma, do comprimento de onda da onda incidente
- 4. Caracterizar a forma do pulso

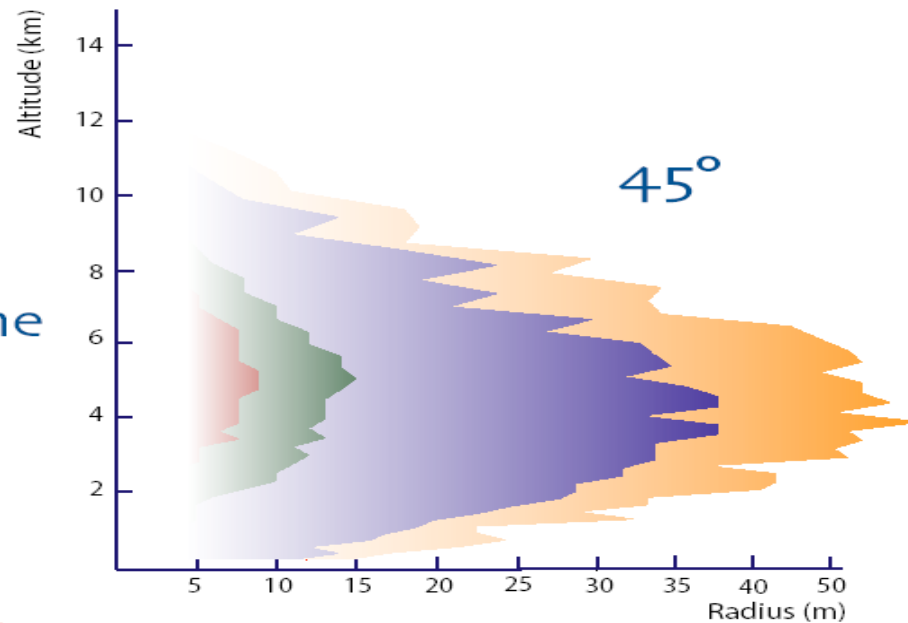
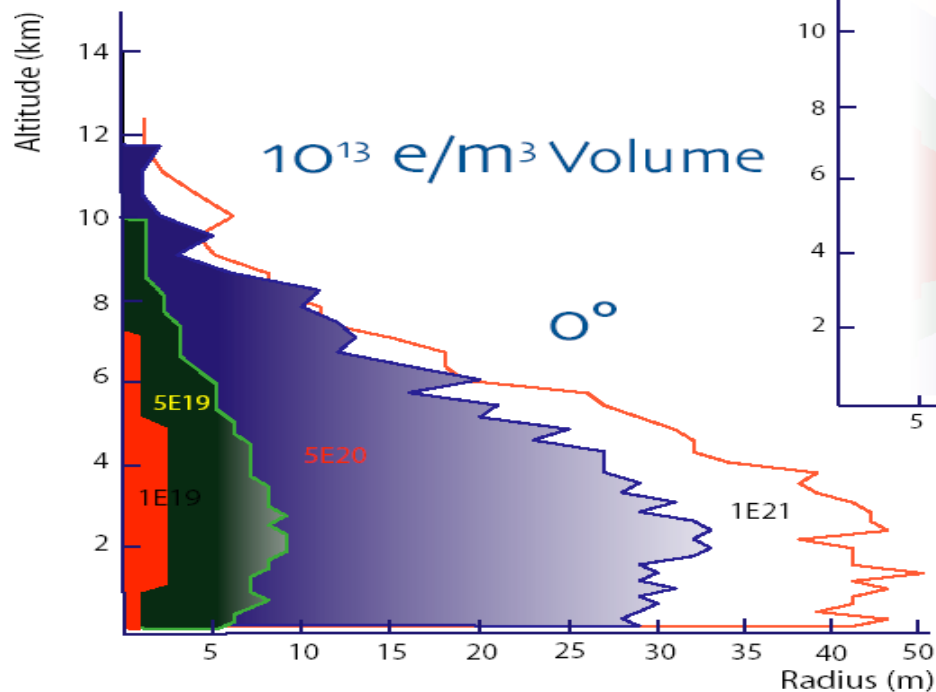
# Simulação da Ionização (Prelim.)

## Electron Cloud Profiles

5

Simulation uses AIRES for sake of computational time

p+A interaction?

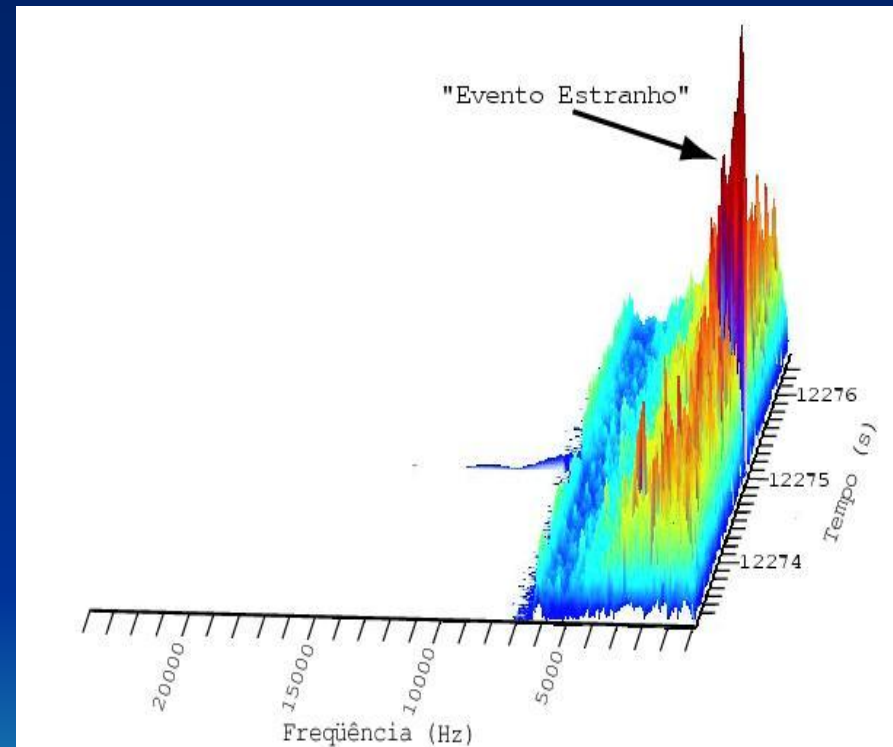
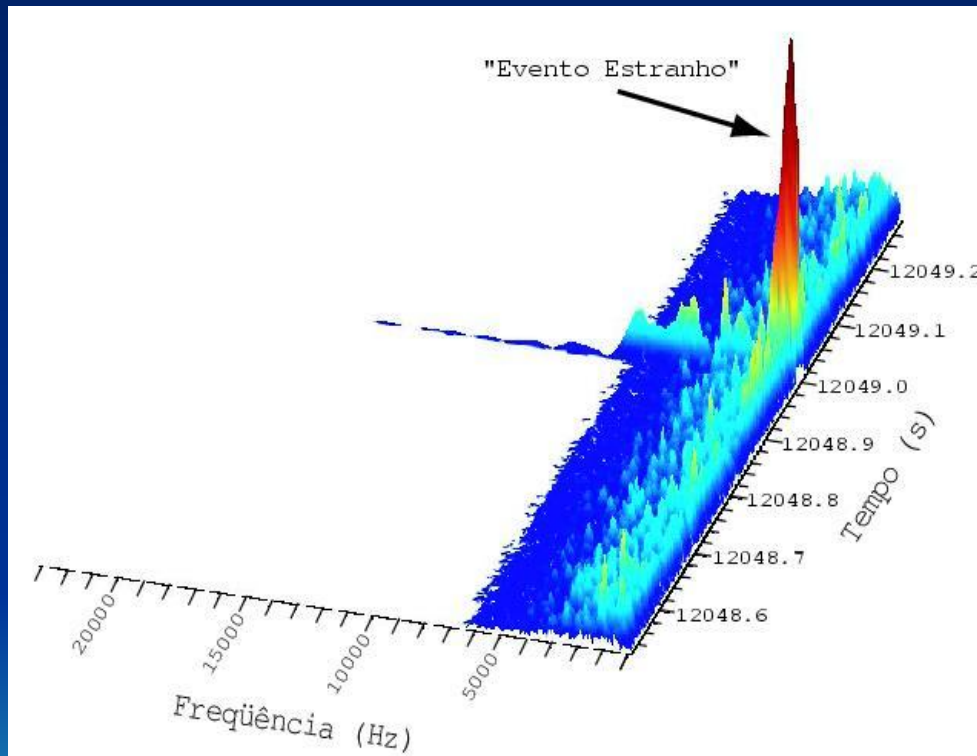


Assume all particles are Minimum Ionizing.

Very uncertain in the core volume.

# Candidatos a RC

- Foram obtidos vários eventos de curta duração:



As diferenças entre os sinais podem ser devido a diferenças de energia, ângulo de incidência ou altura dos chuveiros cósmicos.

# Estudos para RC

- Precisa-se de pelo menos três estações em diferentes posições para se determinar a posição do chuveiro atmosférico. Triângulação.
- Pode-se utilizar diversas frequências para se estudar a evolução do chuveiro já que cada frequência vai penetrar diferentemente na região ionizada.
- Correlacionar chuveiros atmosféricos com relâmpagos. Segundo *Gurevich et al.* a maioria dos relâmpagos são precedidos por raios cósmicos.



# Conclusões

- O problema de detecção de raios cósmicos é geralmente resolvido com o uso de várias unidades detectoras espalhadas numa área de vários kms.
- Nossa aproximação procura resolver o problema com um mínimo de detectores que poderiam explorar uma área muito maior através das reflexões de ondas de rádio (radio scattering).
- Esta é uma técnica usada para detecção de meteoros (background em nossa experiência)



# Conclusões

- Em offline é possível se reconstruir o tempo de cada amostra em sincronia com UTC com um erro menor que ( $20 \mu\text{s}$ ).
- O uso de transmissoras de TV digital reduz o ruído mas o sinal é bem mais fraco.
- Os receptores de rádio possuem um ajuste automático de ganho (problema) -> desenvolvimento de um circuito próprio

# Conclusões

- Montar um experimento com três estações receptoras para se extrair a altura em que o evento ocorreu e se poder distinguir entre RC e outros fenômenos.

# Conclusões

- Estudos dos meteoros revelam efeito de “vácuo” causado pela translação da Terra.
- Aprimoramentos na análise do sinal são necessários tanto para meteoros como para raios cósmicos.



# Conclusões

- Forte apelo educacional
  - É possível envolver estudantes e professores de segundo grau a posdoutores.
- Simplicidade e maturidade de princípio.
  - Há décadas o método RMS é usado pelos radioamadores e cientistas.
- Interdisciplinaridade
  - Física, Eletrônica, Informática, Astronomia, etc.
- Relativo baixo custo
  - “Starter kit” : Uma estação custa 4k dólares e cobre uma grande área.

# Conclusões

- Usando a técnica RMS é possível estudar:
  - Raios Cósmicos,
  - Aviões,
  - Meteoros,
  - E-clouds,
  - Relâmpagos, raios, fenômenos atmosféricos,
  - OVNI's,
  - etc

# Características do Sinal para Análise

- Aviões:
  - Efeito Doppler;
  - Sinais com duração de alguns minutos;
  - Raio de 500 km.
- Meteoros:
  - Caso a reflexão ocorra pela cauda não há Efeito Doppler;
  - Sinais com duração de décimos de segundos a algumas dezenas de segundos;
  - Raio de 1000 km, correspondente a um área da ordem  $10^6$  km<sup>2</sup>.
- Raios Cósmicos:
  - Sinais com duração da ordem de dezenas de microsegundos;
  - Raio 300 km, correspondente a uma área da ordem  $10^5$  km<sup>2</sup>, para uma única estação.
  - Para raios cósmicos ultra-energéticos, significa aproximadamente  $10^5$  eventos/ano, ou seja 2 eventos/minutos.
- Relâmpagos e Raios, e-clouds, OVNIs, etc.

# Conclusões

- Considero este um projeto de pesquisa experimental polivalente interdisciplinar e de ensino ideal para o Brasil.
- É possível fazer Física Experimental de Altas Energias no Brasil com baixo custo e sem depender de aceleradores.





Raios cósmicos e aviões:

$R \sim 400 \text{ km}$

.(na figura)

Meteoros: alterar para  $R \sim 1000 \text{ km}$ .

Cobre-se todo o Brasil.