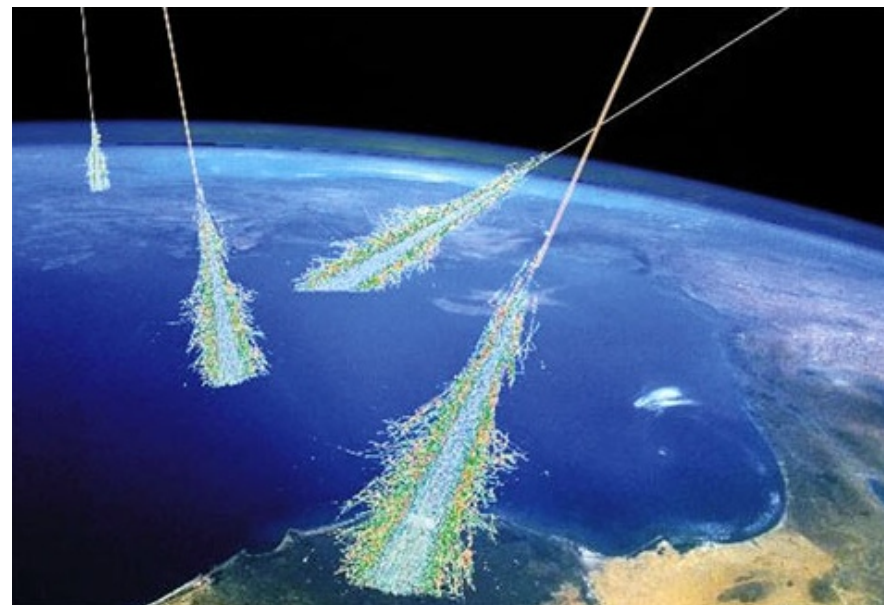


# Raios Cósmicos: Fundamentos e técnicas de detecção

Carla Bonifazi  
Instituto de Física - UFRJ

# Conteúdo do Curso

- ✓ Introdução: historia e primeiros detectores
- ✓ Medições diretas e indiretas
- ✓ Chuveiros atmosféricos extensos
- ✓ Mecanismos de aceleração (conceitos básicos)
- ✓ Propagação (conceitos básicos)
- ◆ Detecção e de reconstrução de chuveiros atmosféricos extensos
- ◆ Raios cósmicos de alta energia
- ◆ Raios cósmicos de ultra alta energia

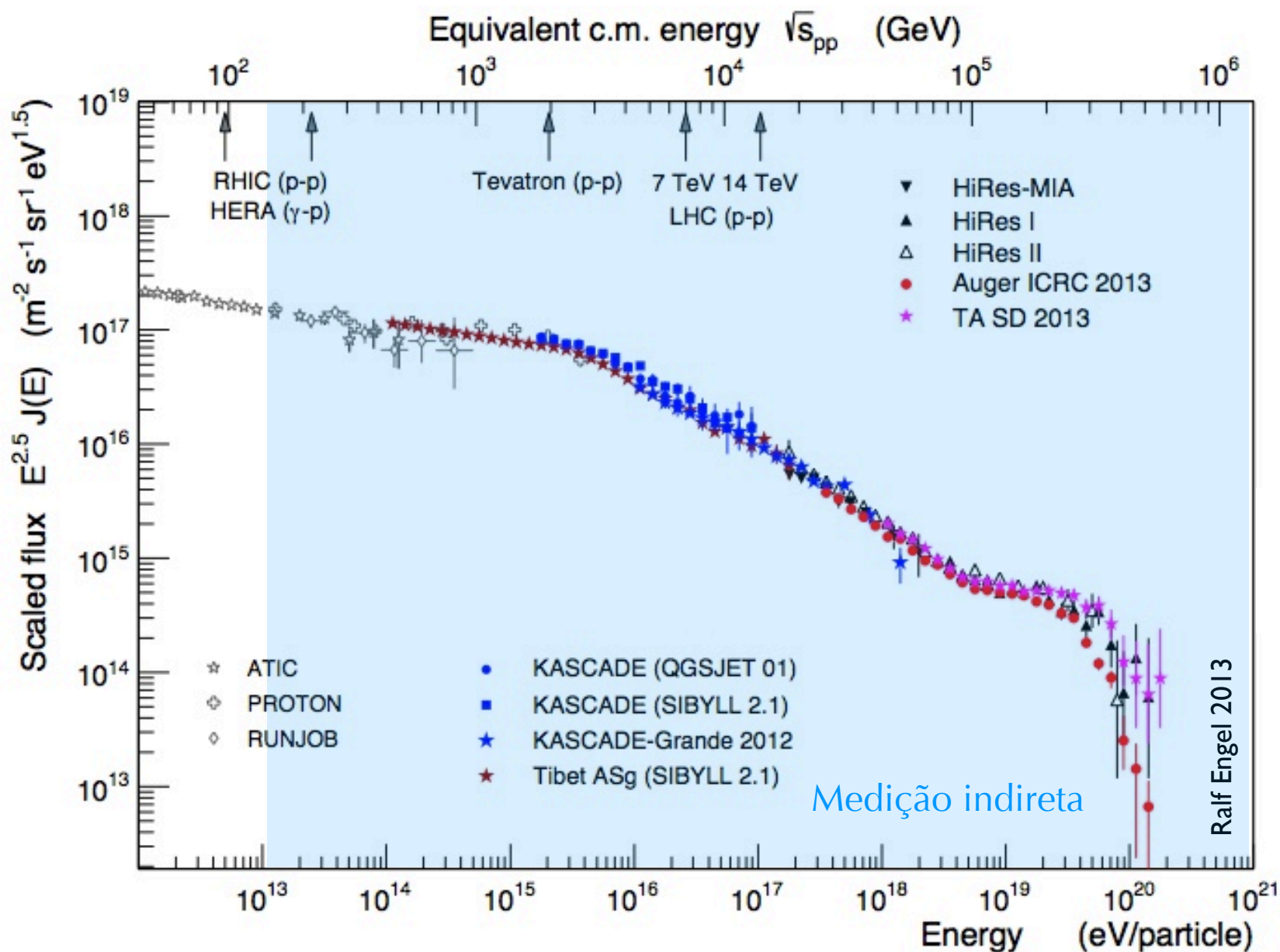


# Bibliografia

- ◆ Bruno Rossi, Cosmic Rays, Mc Graw-Hill
- ◆ Michael W. Friedlander, Cosmic Rays, Harvard University Press
- ◆ Yataro Sekido and Harry Elliot, Early History of Cosmic Ray Studies, Reidel Publishing Company
- ◆ Malcolm S. Longair, High Energy Astrophysics, Cambridge University Press
- ◆ William.R.Leo: Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer
- ◆ Todor Stanev, High Energy Cosmic Rays, Springer
- ◆ Thomas K. Gaisser, Cosmic Rays and Particle Physics, Cambridge University Press
- ◆ Glenn Knoll, Radiation Detection and Measurement, Wiley

# Espectro de raios cósmicos

## Detecção de chuveis atmosféricos extensos



# Detecção indireta de raios cósmicos

## Chuveiros Atmosféricos Extensos

**Proton  $10^{15}$  eV:  
on ground**

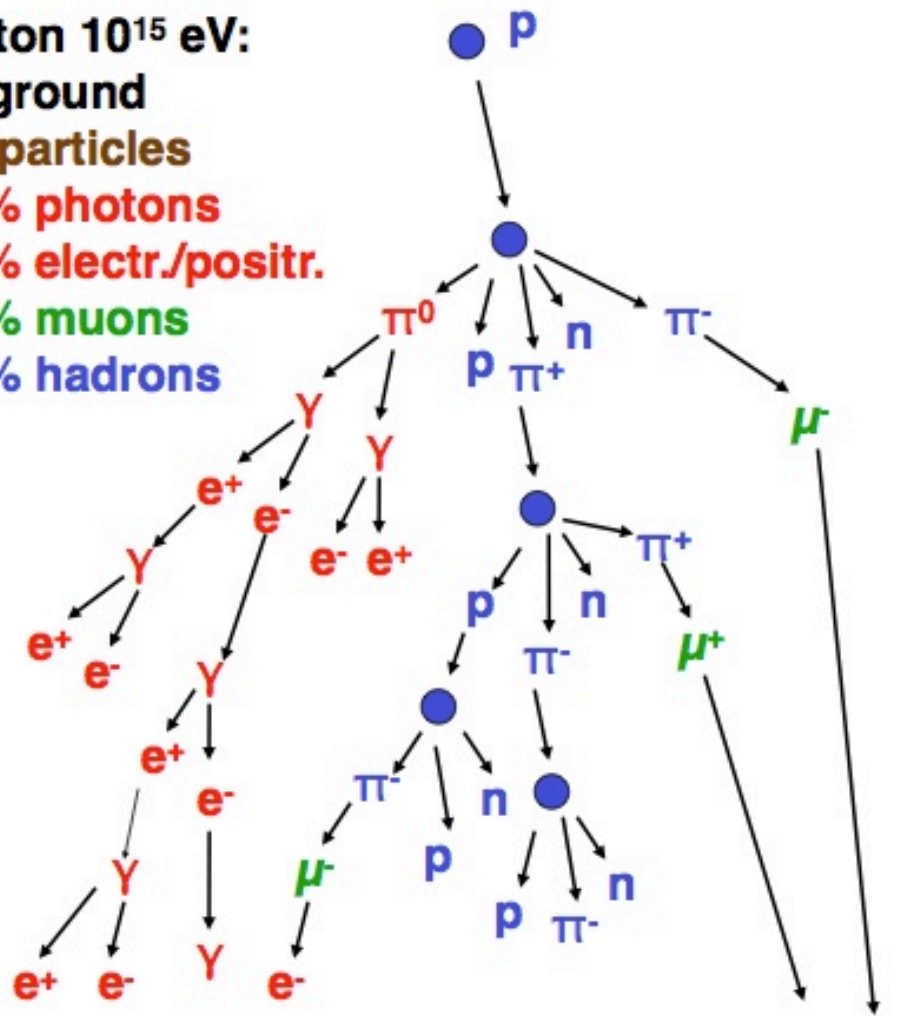
**$10^6$  particles**

**80% photons**

**18% electr./positr.**

**1.7% muons**

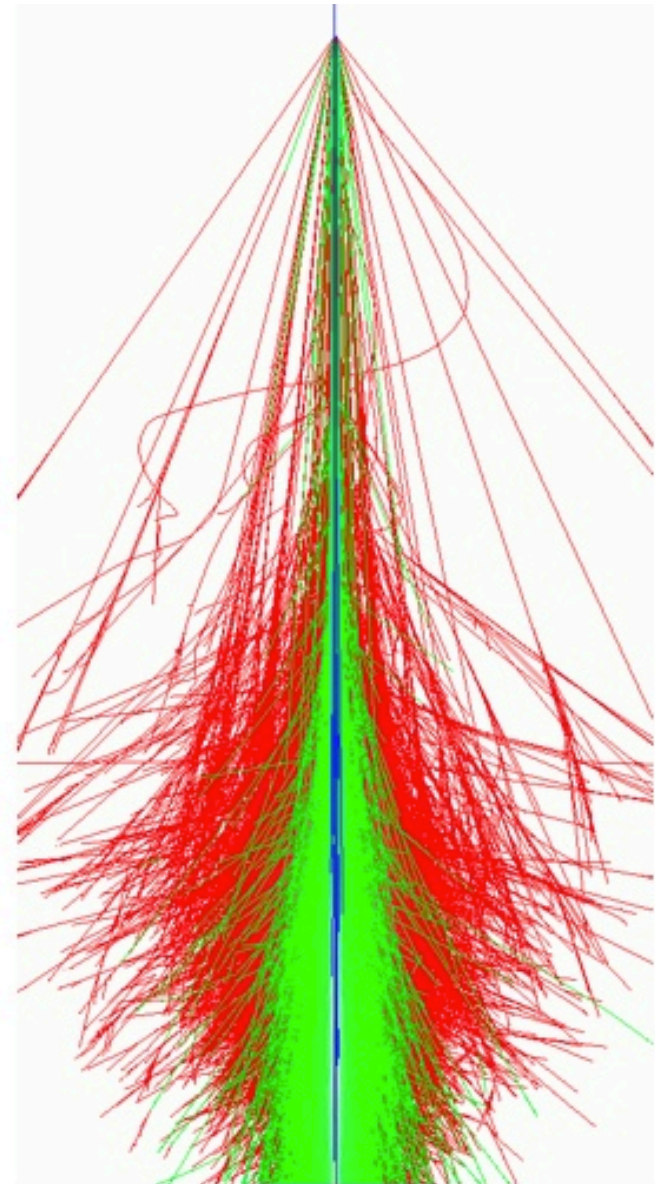
**0.3% hadrons**



**electromagnetic**

**hadronic  
shower component**

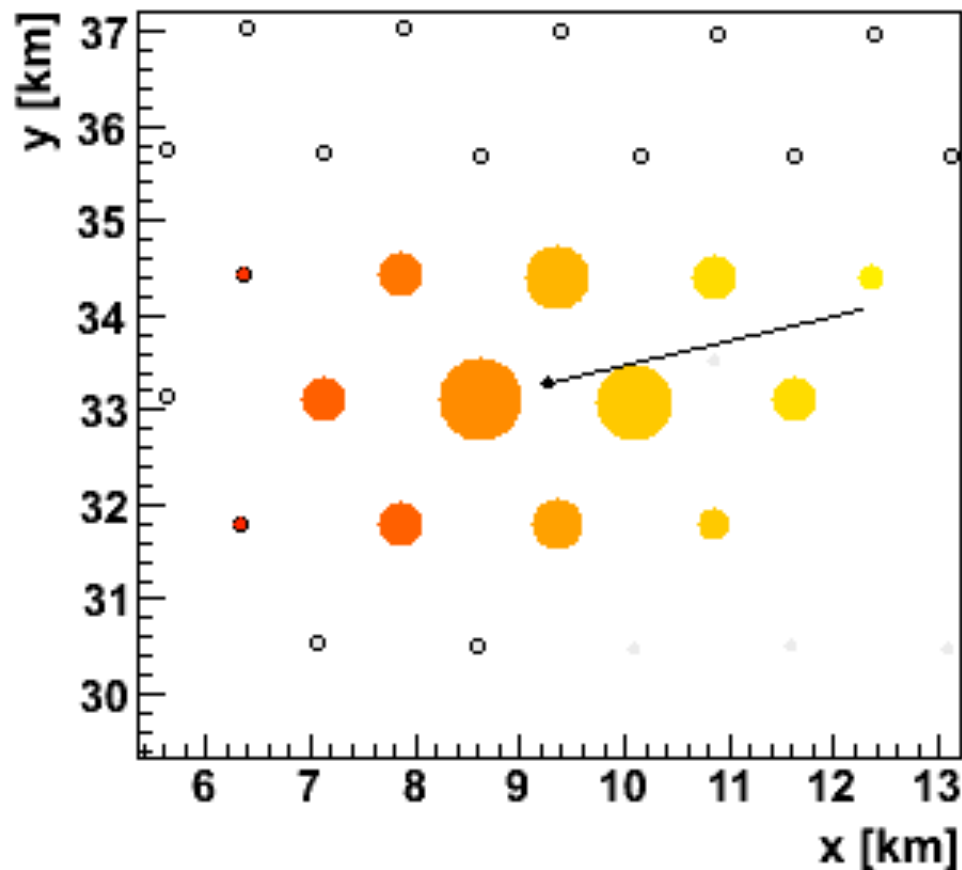
**muonic**



# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Reconstrução do evento com um detector de superfície

“pegada” do chuva no solo



Para cada  $i$ -ésima estação:

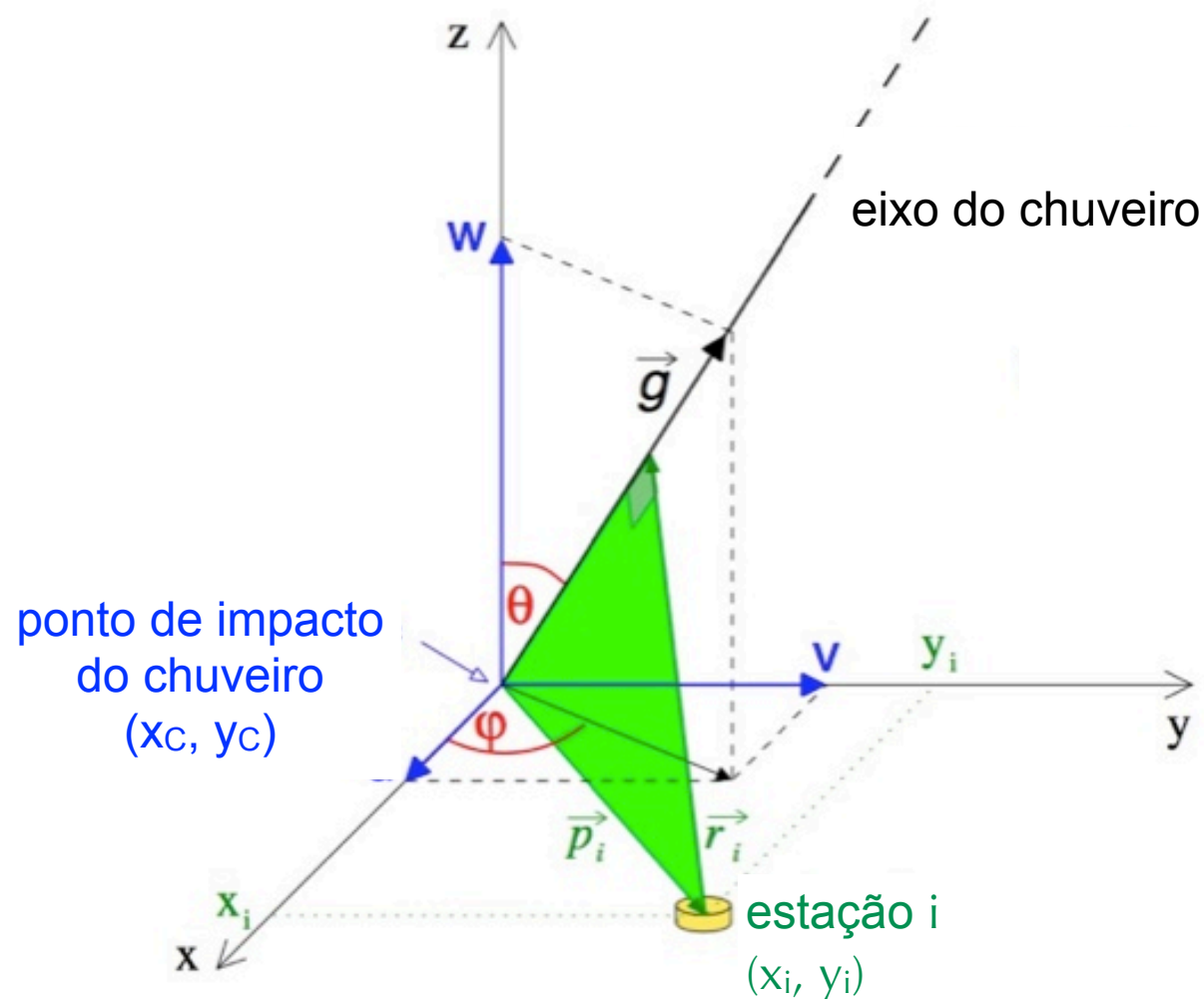
$t_i$  = tempo de disparo

$S_i$  = sinal



# Chuveiros Atmosféricos Extensos

# Reconstrução geométrica



Frente plano:

tempo de disparo da  $i$ -ésima estação  
na posição  $(x_i, y_i)$  com respeito à  
posição do ponto de impacto do  
chuveiro  $(x_C, y_C)$

$$t_i = T_0 - \frac{\vec{p}_i \cdot \vec{g}}{c}$$

$$t_i = T_0 - \frac{\Delta x_i u + \Delta y_i v}{c}$$

cossenos diretores

$$u = \sin\theta \cos\phi$$

$$v = \sin\theta \sin\phi$$

$$r_i^2 = |p_i|^2 - |\vec{p}_i \cdot \vec{g}|^2$$

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Reconstrução geométrica

Frente plano: 
$$t_i = T_0 - \frac{(x_i - x_C)u + (y_i - y_C)v}{c}$$

Minimização de chi2: 
$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{t_i^m - t_i}{\sigma_i} \right)^2 \quad w_i = 1/\sigma_i^2$$

$$\Rightarrow \frac{\partial \chi^2}{\partial T_0} = \frac{\partial \chi^2}{\partial u} = \frac{\partial \chi^2}{\partial v} = 0 \quad (u', v') = (-u/c, -v/c)$$

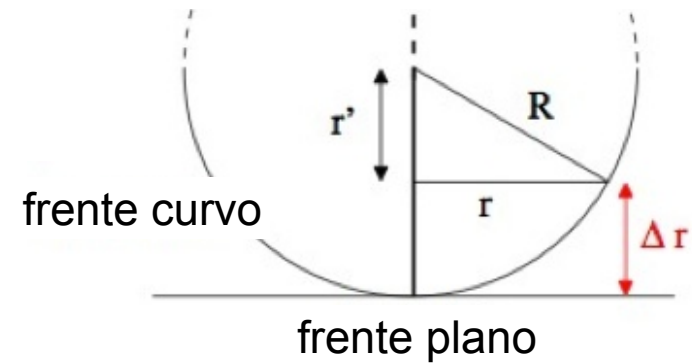
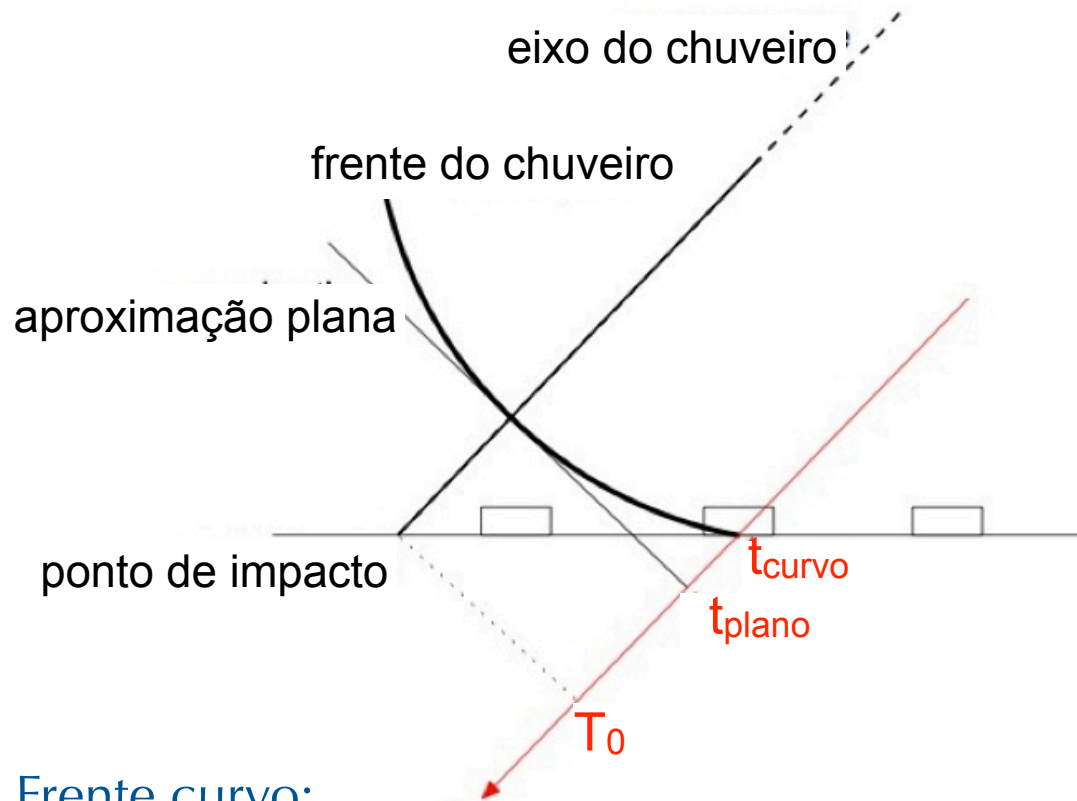
$$\underbrace{\begin{pmatrix} \sum_i w_i & \sum_i w_i \bar{x}_i & \sum_i w_i \bar{y}_i \\ \sum_i w_i \bar{x}_i & \sum_i w_i \bar{x}_i^2 & \sum_i w_i \bar{x}_i \bar{y}_i \\ \sum_i w_i \bar{y}_i & \sum_i w_i \bar{x}_i \bar{y}_i & \sum_i w_i \bar{y}_i^2 \end{pmatrix}}_{\mathbf{A}} \underbrace{\begin{pmatrix} T_0 \\ u' \\ v' \end{pmatrix}}_{\mathbf{x}} = \underbrace{\begin{pmatrix} \sum_i w_i t_i^m \\ \sum_i w_i \bar{x}_i t_i^m \\ \sum_i w_i \bar{y}_i t_i^m \end{pmatrix}}_{\mathbf{b}}$$

Resolver o sistema:  $Ax = b$  invertendo a matriz  $A$  ( $x = A^{-1}b$ ). As estações não podem estar alinhadas pois neste caso o  $\det(A) = 0$  (sistema singular)



# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Reconstrução geométrica



Frente curvo:  
modelização mais realista da frente do chuveiro.

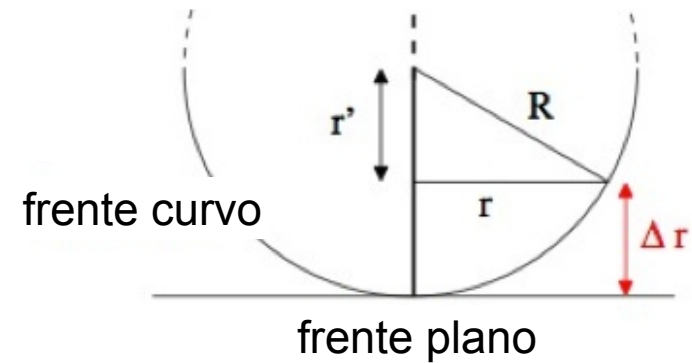
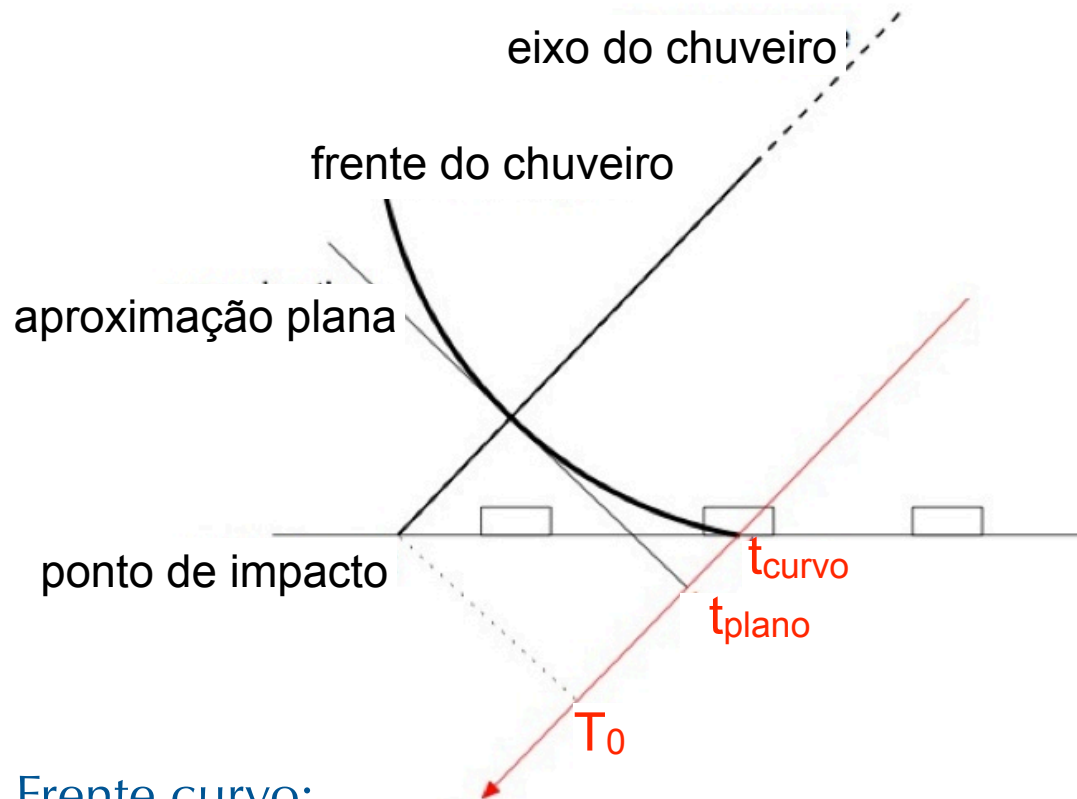
$$t_i = T_0 - \frac{\vec{p}_i \cdot \vec{g}}{c} + \frac{\Delta r_i}{c}$$

$$\Delta r_i = R - r'_i = R - \sqrt{R^2 - r_i^2} = R \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{r_i^2}{R^2}} \right) \quad \frac{r_i^2}{R^2} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad \Delta r_i \simeq \frac{r_i^2}{2R}$$

$$t_i = T_0 - \frac{\Delta x_i u + \Delta y_i v}{c} + \frac{r_i^2}{2Rc}$$

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Reconstrução geométrica



Frente curva:  
modelização mais realista da frente do chuvaeiro.

$$t_i = T_0 - \frac{\vec{p}_i \cdot \vec{g}}{c} + \frac{\Delta r_i}{c}$$

$$t_i = T_0 - \frac{\Delta x_i u + \Delta y_i v}{c} + \frac{r_i^2}{2Rc}$$

$$\text{com } r_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 - (\Delta x_i u + \Delta y_i v)}$$

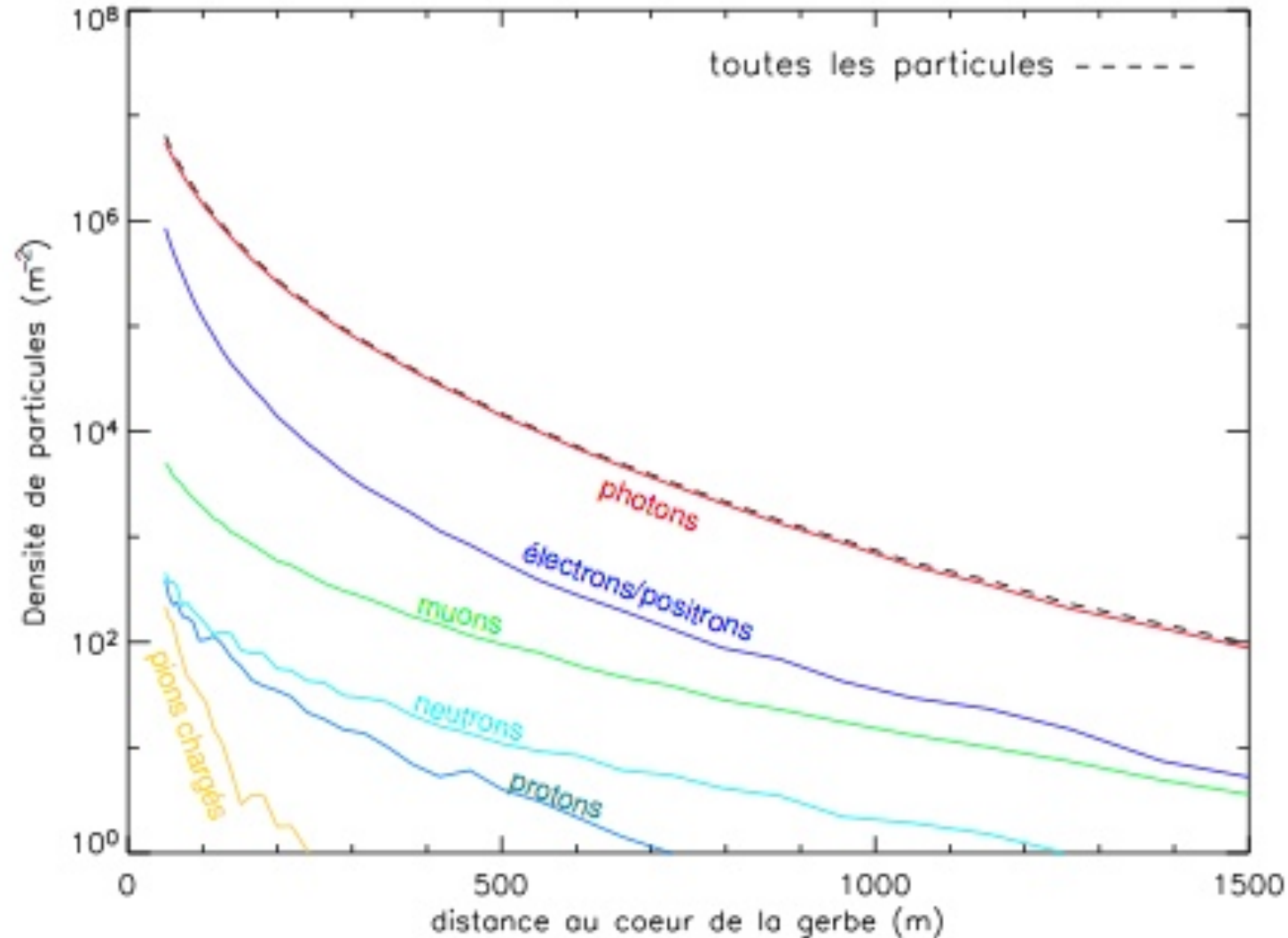
Para ajustar  $R$  precisamos de um mínimo de 4 estações disparadas

Ao final do processo, teremos os seguintes parâmetros,  $T_0$ ,  $\theta$ ,  $\phi$  e  $R$

Posição do ponto de impacto determinado pelo baricentro

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Distribuição lateral de partículas da cascata



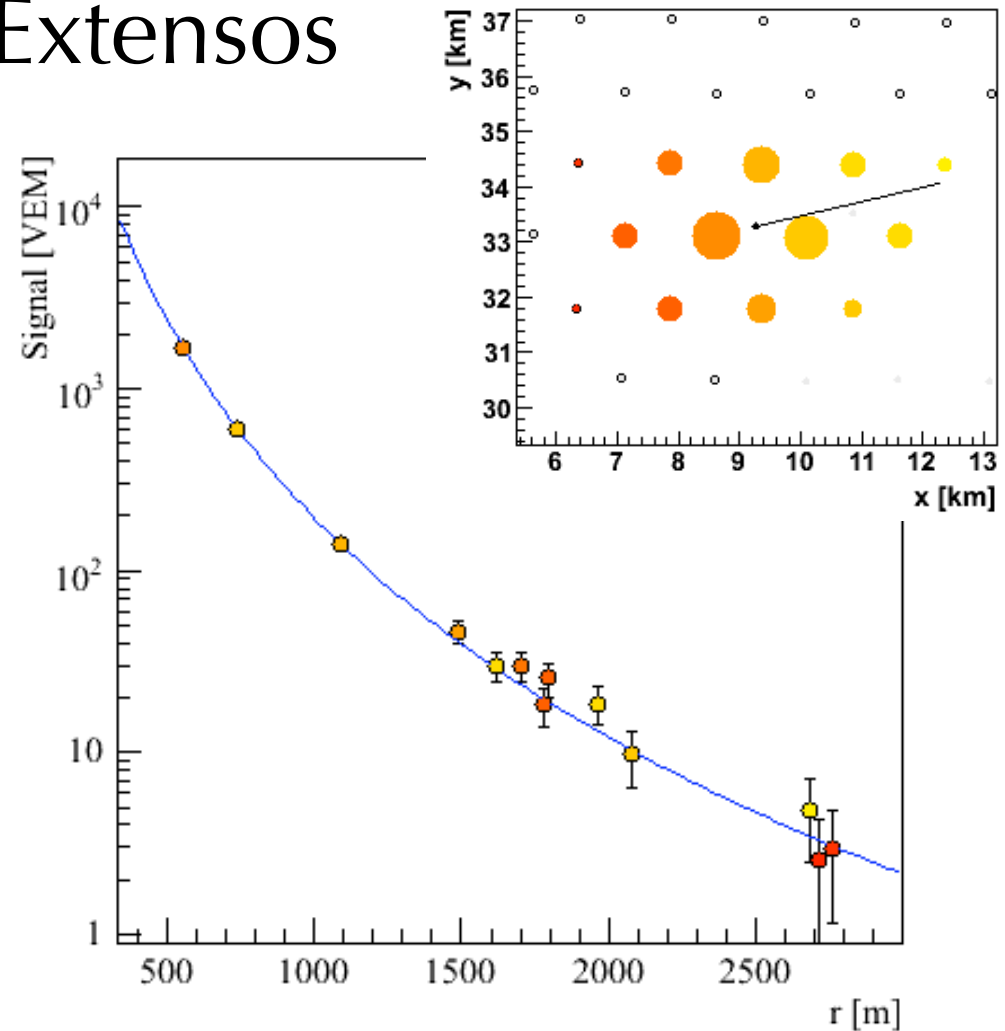
# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Distribuição lateral (LDF)

Função de distribuição lateral:  
definida empiricamente, depende das  
caraterísticas do detector de superfície  
utilizado

### 1) Tipo NKG (Volcano Ranch, Yakutsk, AGASA)

baseada na solução das equações de  
difusão das partículas nos chuveis  
atmosféricos extensos.



$$\rho(r) = C \left( \frac{r}{R_M} \right)^{-1,2} \left( 1 + \frac{r}{R_M} \right)^{-\eta+1,2} \left[ 1 + \left( \frac{r(m)}{1000} \right)^2 \right]^{-0,6}$$

$C$  = constante

$\eta = \eta(\cos\theta)$

$R_M$  = radio de Molire

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Distribuição lateral (LDF)

Função de distribuição lateral:  
definida empiricamente, depende das  
características do detector de superfície  
utilizado

### 2) Utilizada em Haverah Park

$$\rho(r) = k r^{-\left(\eta + \frac{r(m)}{4000}\right)}$$

$k$  = parâmetro de normalização

$\eta$  = pendente, onde  $\eta(\cos\theta)$

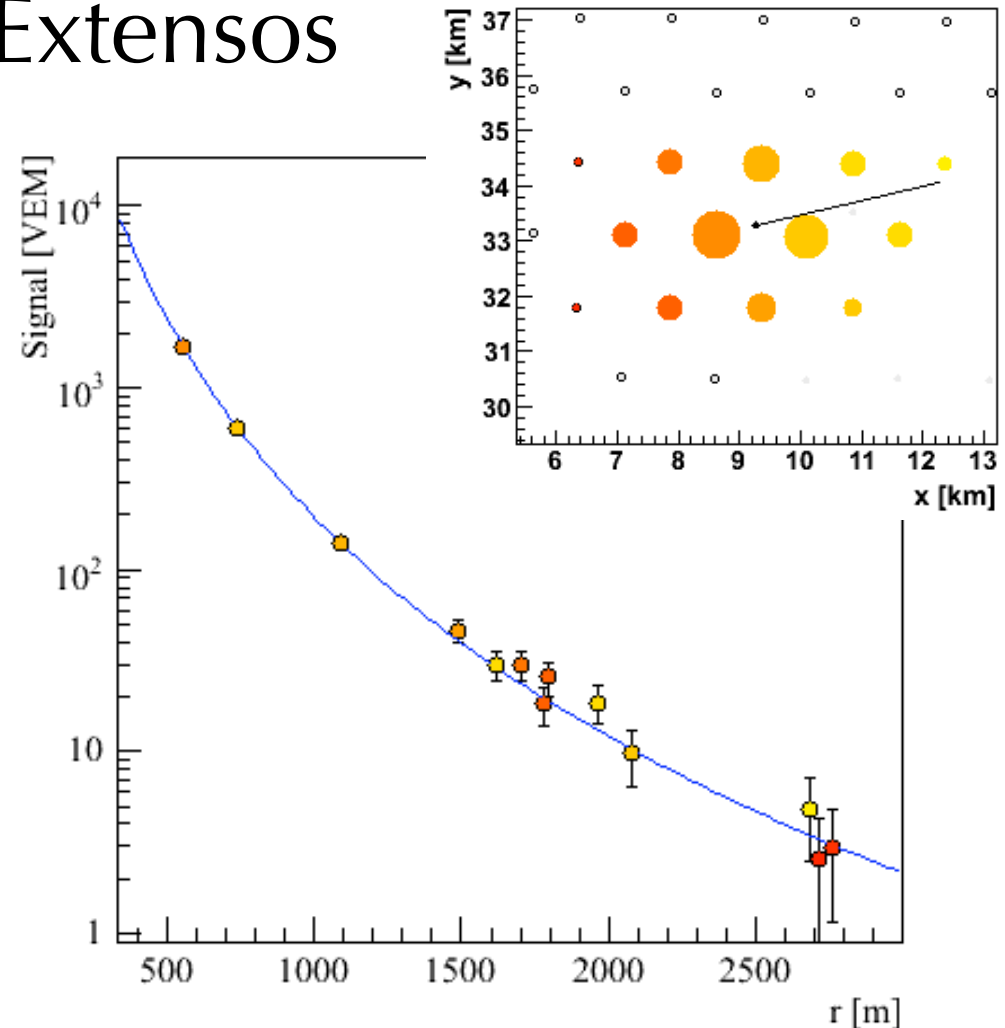
$r$  = distância ao eixo do chuveiro

### 3) Log-Log (Auger)

$$S(r) = S_{ref} \left( \frac{r}{r_{ref}} \right)^{\beta + \gamma \log \left( \frac{r}{r_{ref}} \right)}$$

$S_{ref}$  = normalização

$r_{ref}$  = distância de referência



Minimização de chi2:

$$\chi^2_{signal} = \sum_{j=1}^m \frac{(S_i^m - S_i)^2}{\sigma_{signal}^2}$$

Ao final do processo, teremos os seguintes  
parâmetros,  $(x_c, y_c)$ ,  $S_{ref}$  e a pendente se possível

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Reconstrução geométrica híbrida

Informação do desenvolvimento do chuveiro  
+ estação do detector de superfície

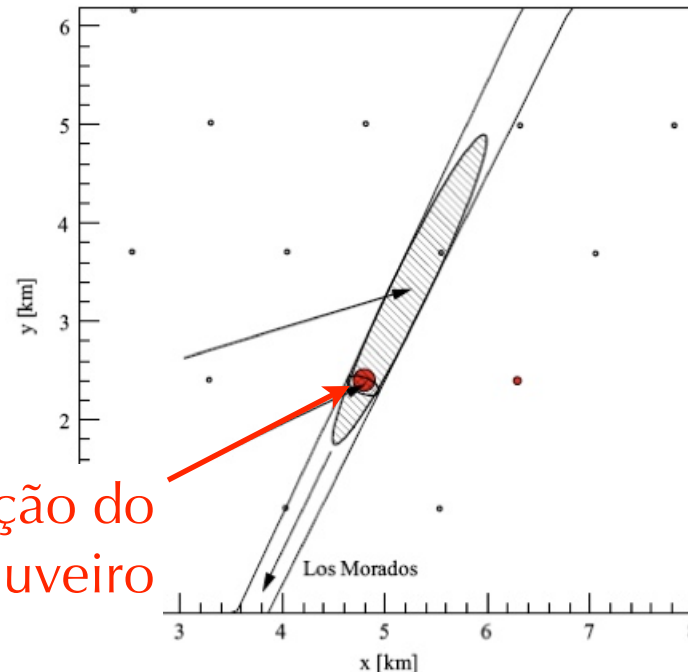
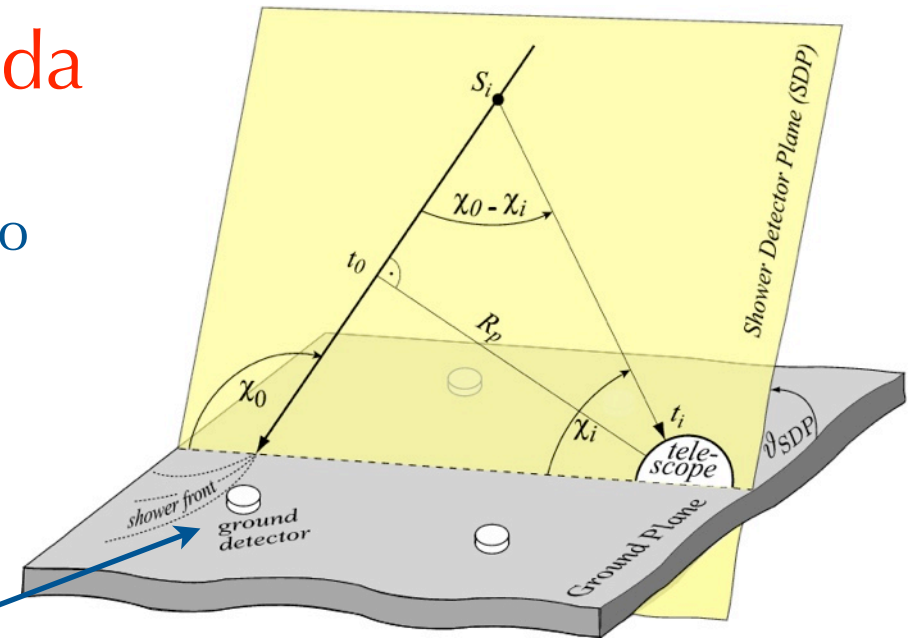
Tempo de disparo do i-ésimo pixel  
da câmera do telescópio

$$t_i = t_0 + \frac{R_p}{c} \tan \left( \frac{\chi_0 - \chi_i}{2} \right)$$

$$t_{SD} = \frac{ux_{SD} + vy_{SD}}{c}$$

$$u = \sin\theta \cos\phi$$

$$v = \sin\theta \sin\phi$$



Ótima resolução na posição do  
ponto de impacto do chuveiro

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Perfil longitudinal híbrido

Uma reconstrução geométrica precisa permite que o perfil longitudinal também seja obtido com boa precisão!

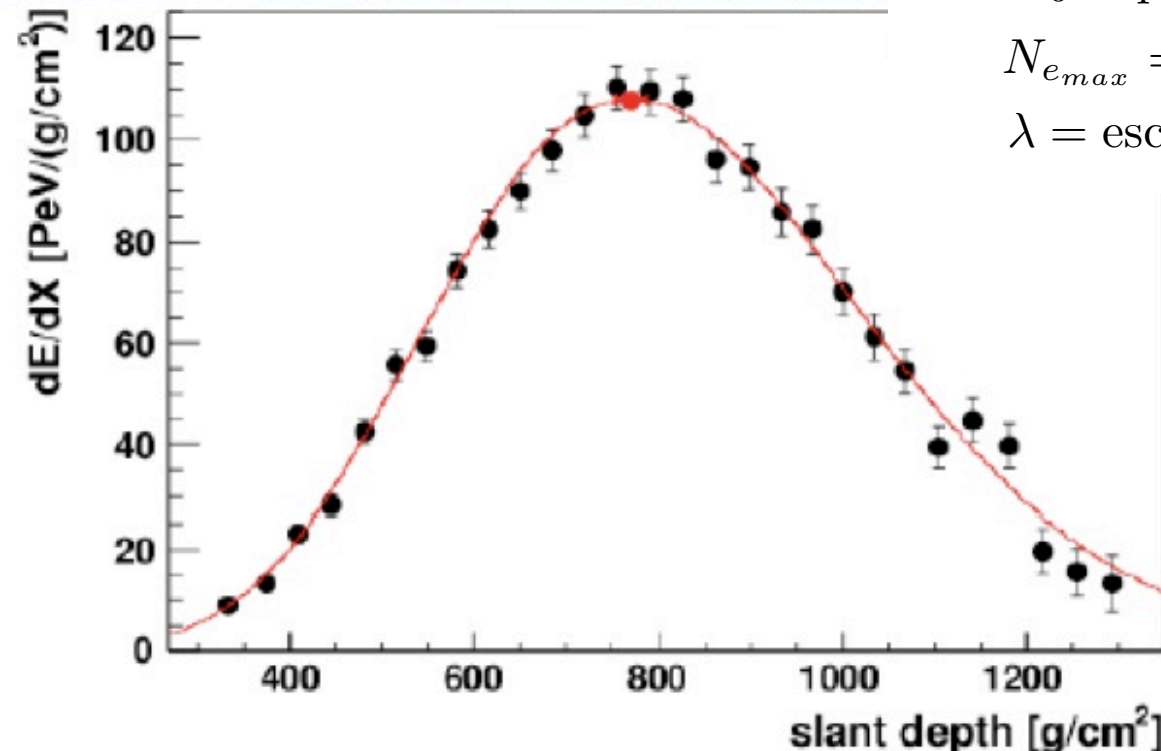
Perfil de Gaisser-Hillas

$$N_e(X) = N_{e_{max}} \left( \frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{\frac{X_{max} - X_0}{\lambda}} e^{-\frac{X_{max} - X_0}{\lambda}}$$

$X_0$  = profundidade da primeira interação

$N_{e_{max}}$  = # de  $e^-$  no máximo do chuveiro

$\lambda$  = escala típica de perda de energia na cascata



$$E = (7,1 \pm 0,2) 10^{19} \text{ eV}$$

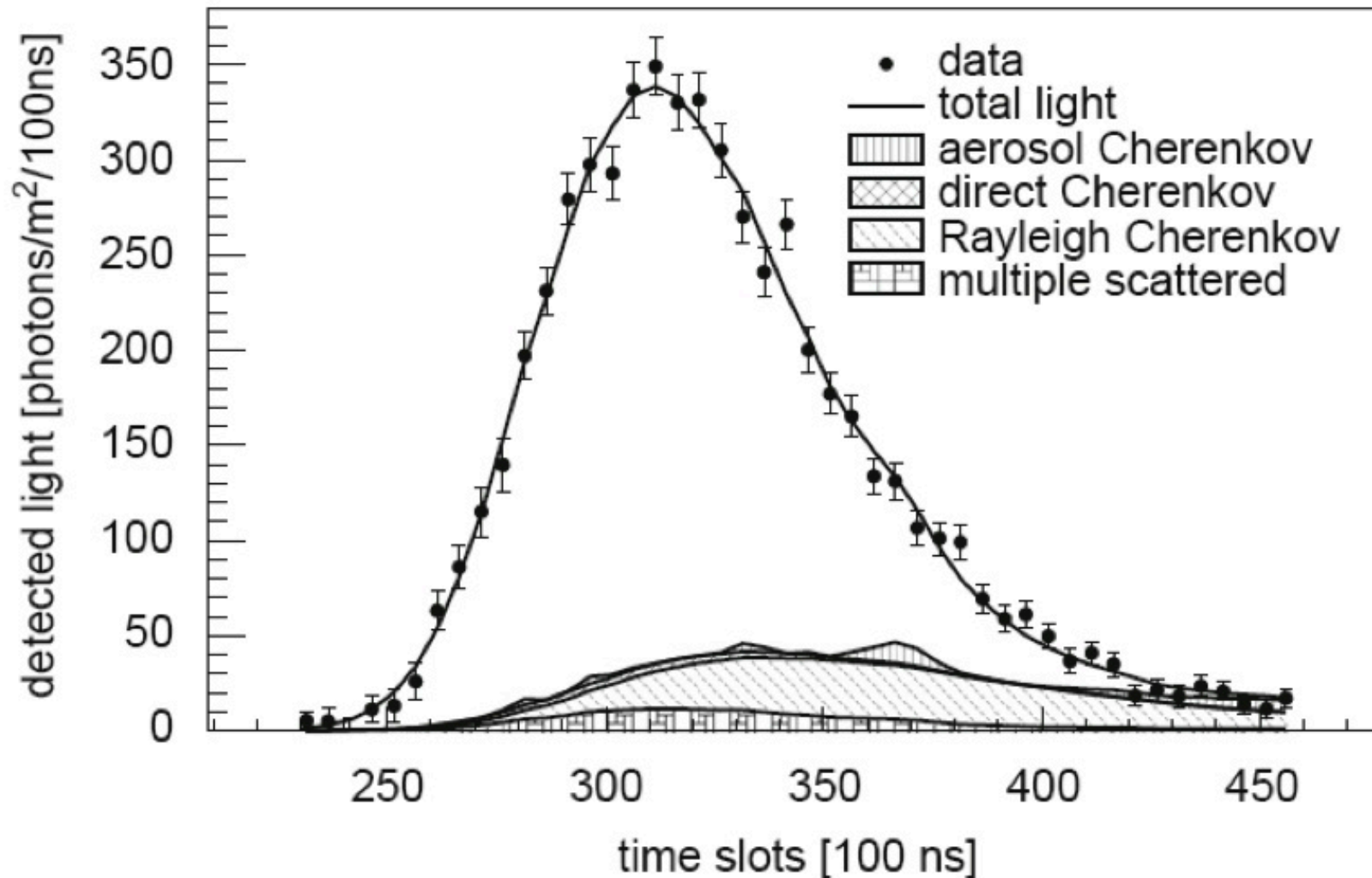
$$X_{max} = (752 \pm 7) \text{ g}/\text{cm}^2$$



# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Perfil longitudinal híbrido

Todas as contribuições

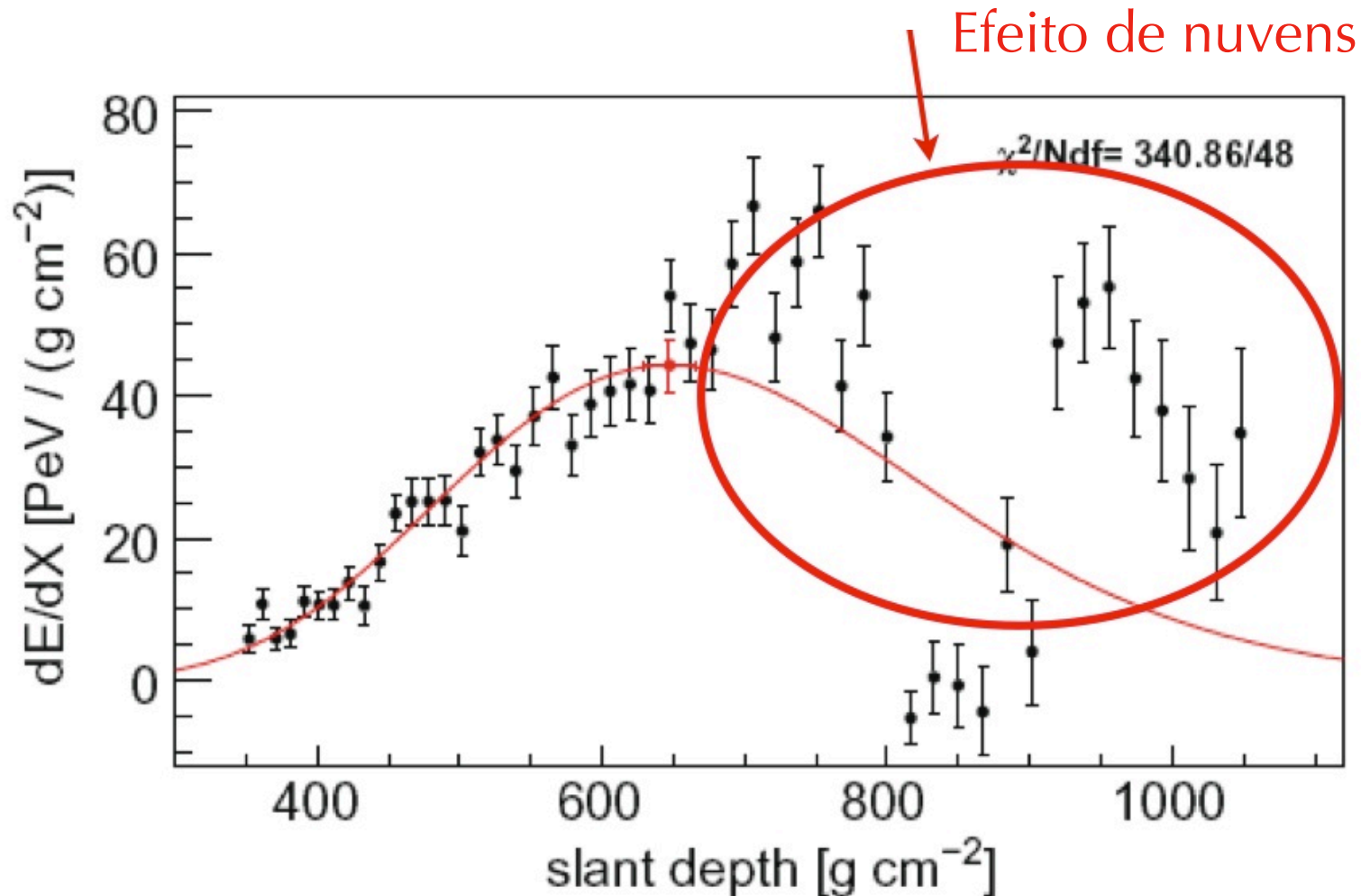


# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## Perfil longitudinal híbrido

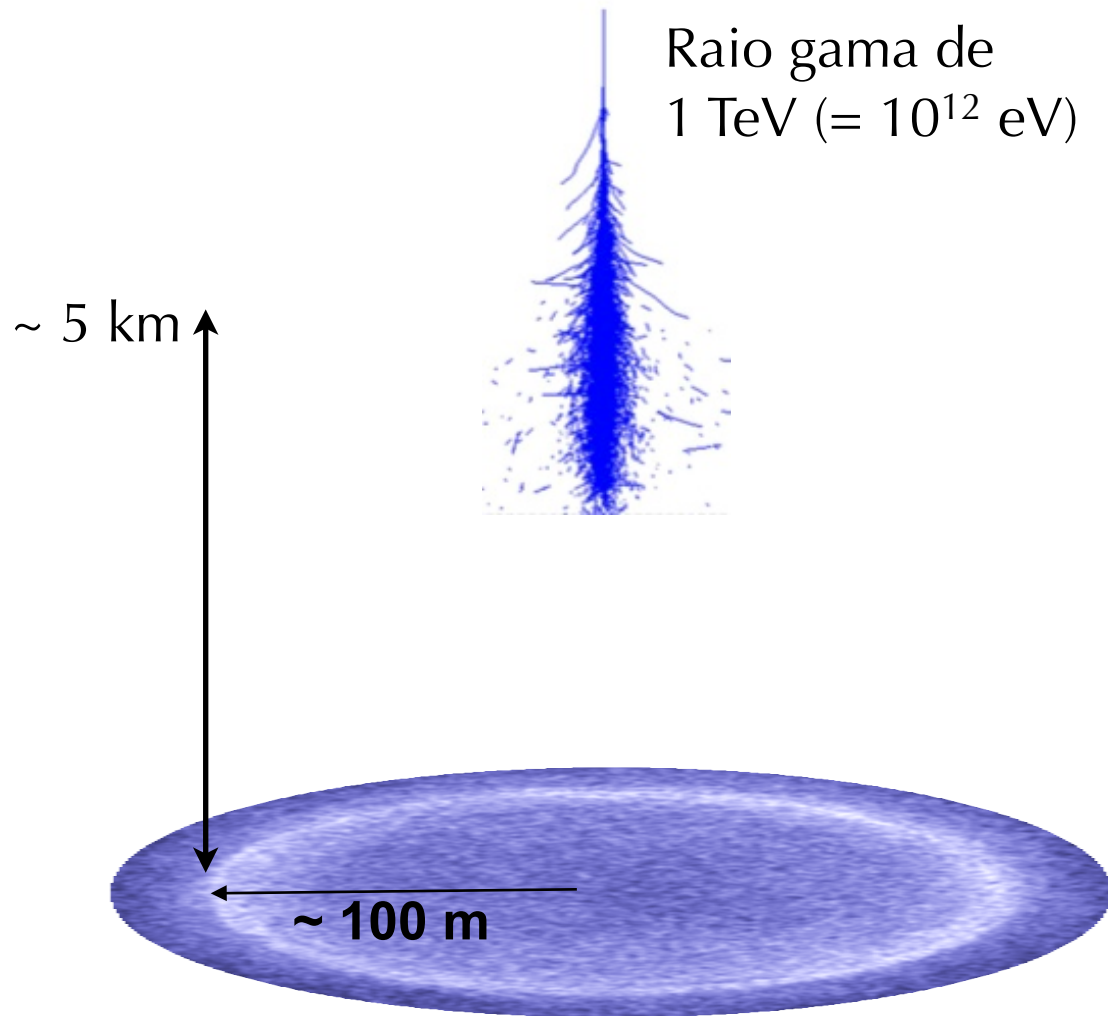
Mas a vida não é tão fácil assim ...

(EMS)



# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## A técnica de imagem atmosférica Cherenkov



1º Interação:

$$X_0 \sim 40 \text{ g/cm}^2$$

$$\lambda_{\text{par}} \sim 50 \text{ g/cm}^2$$

Cascata:

Para  $E = 1 \text{ TeV}$  ( $E_C \sim 80 \text{ MeV}$ )

$$X_{\text{max}} \sim X_0 \ln (E/E_C) / \ln 2$$

$$h_{\text{max}} = h_0 \ln(X_A/X_{\text{max}}) \sim 5 \text{ km}$$

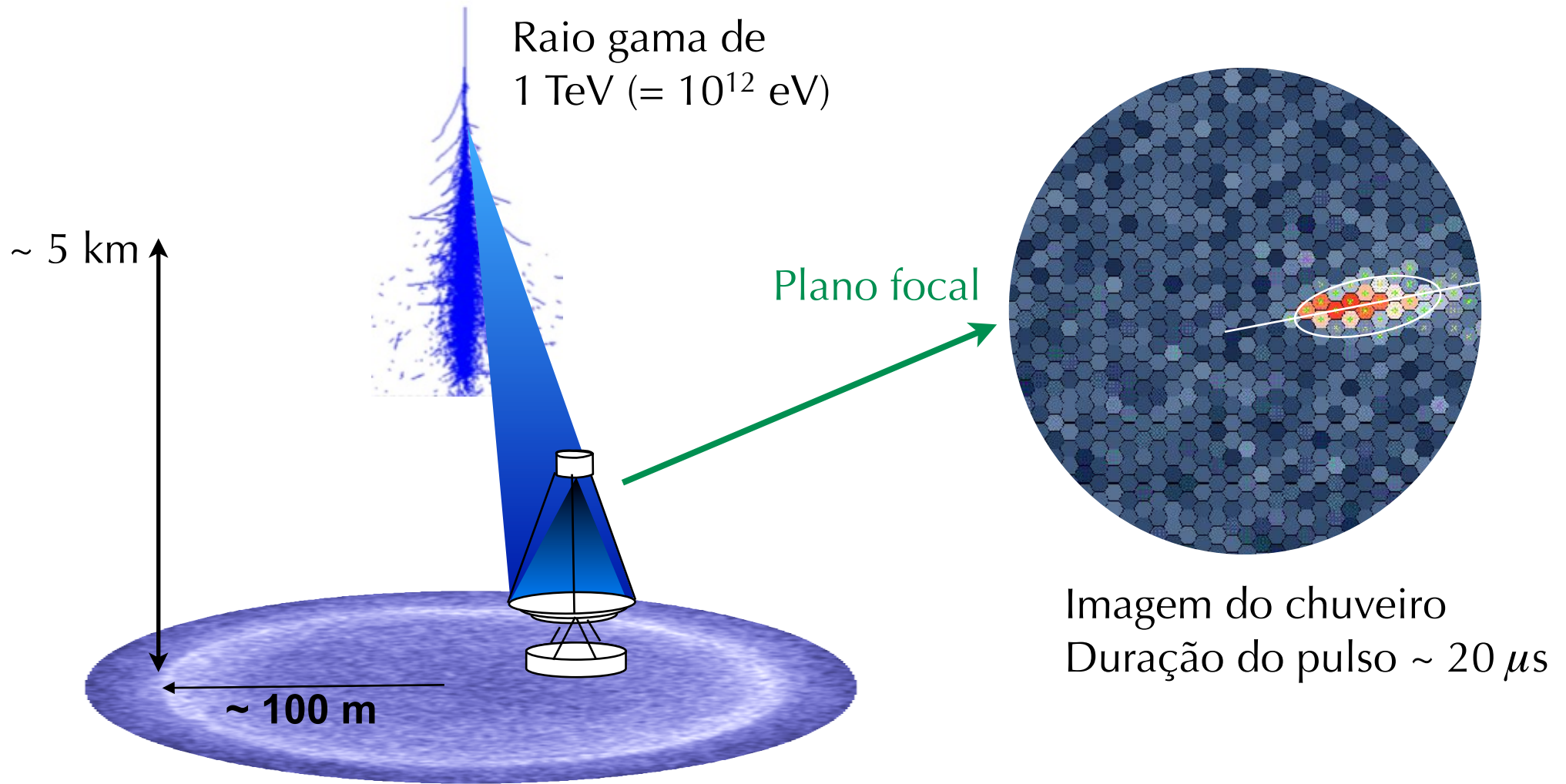
Cherenkov light:

$$\theta_C(\text{max}) = \arccos (1/n) \sim 1.4^\circ$$

$$r_l \sim \theta_C(\text{max}) h_{\text{max}} \sim 100 \text{ m}$$

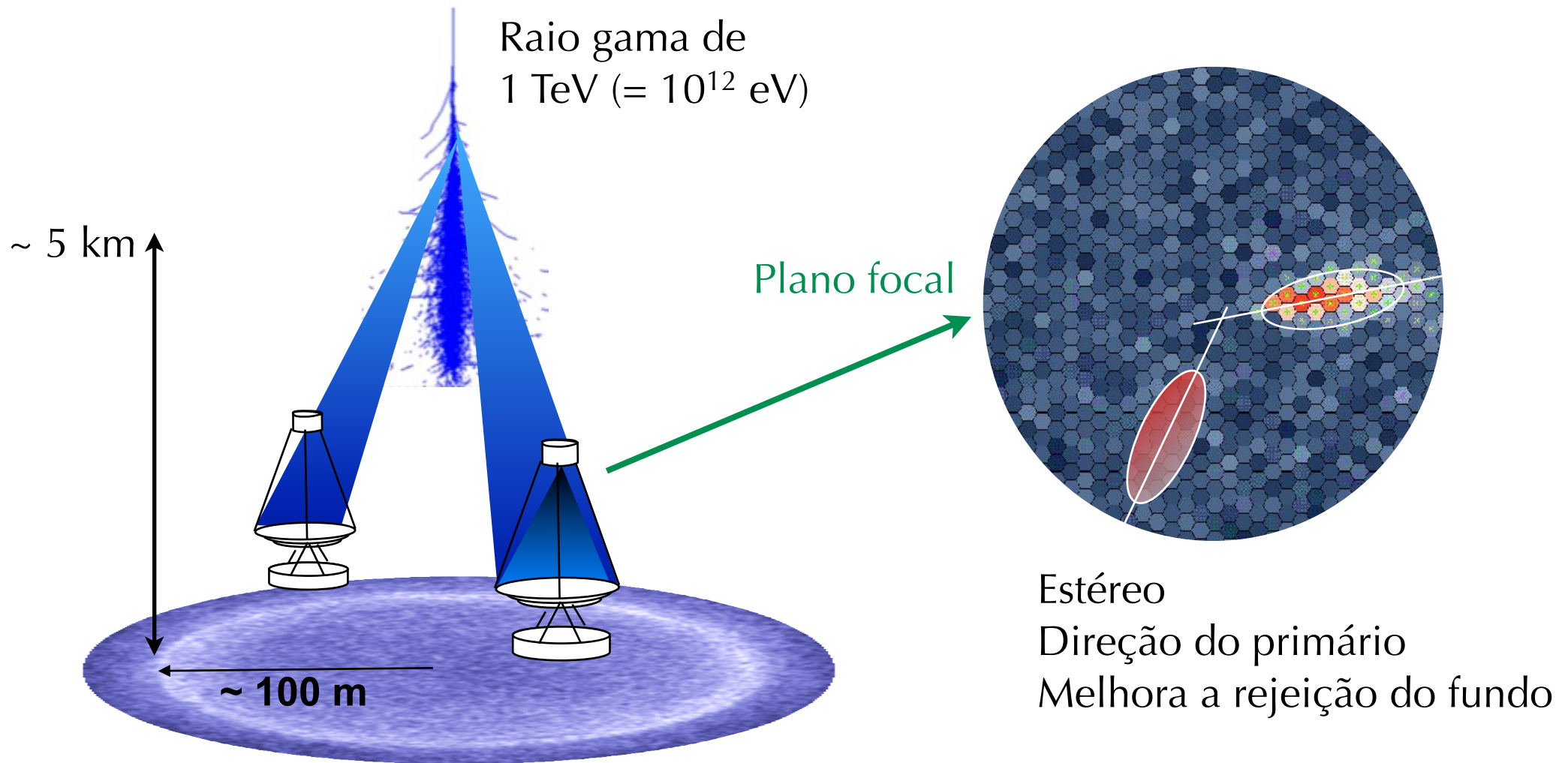
# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## A técnica de imagem atmosférica Cherenkov



# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## A técnica de imagem atmosférica Cherenkov



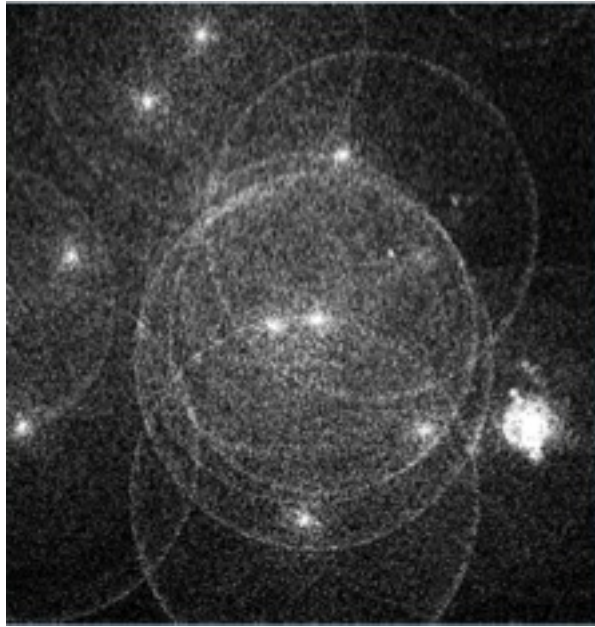


# Chuveiros Atmosféricos Extensos

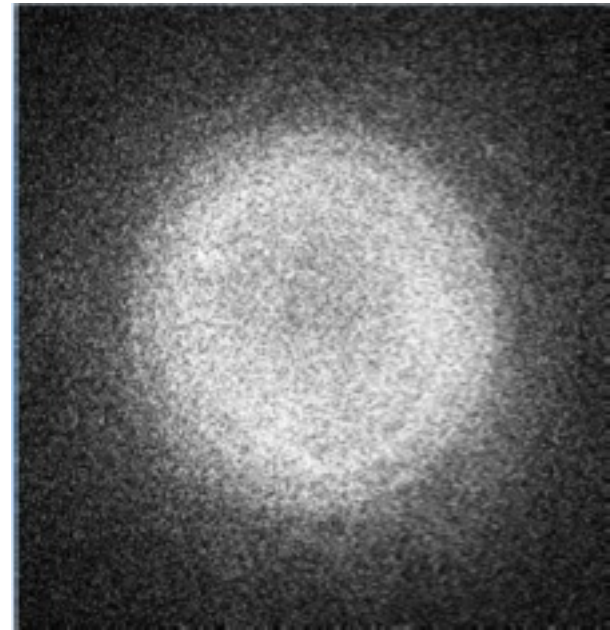
## A técnica de imagem atmosférica Cherenkov

Distribuição de fótons no chão

Raio cósmico (hadrônico)



Raio gama



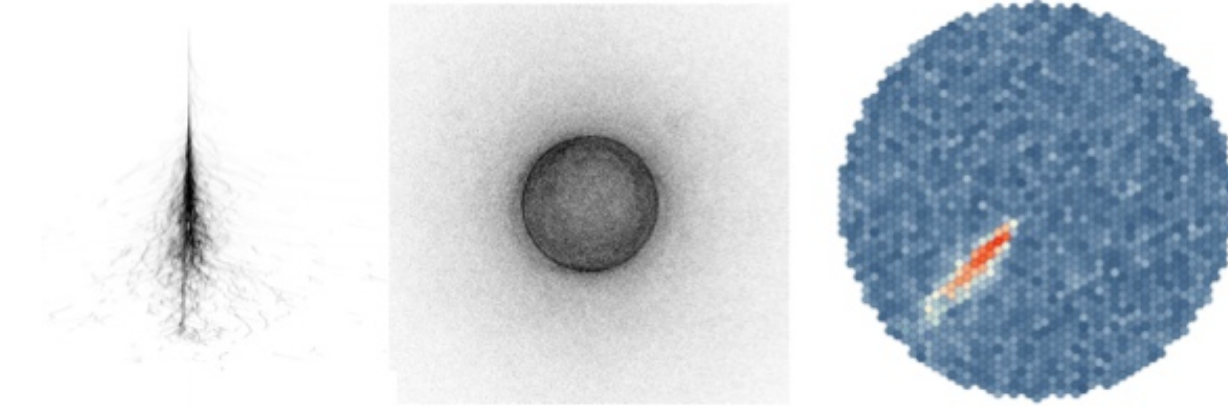
400 m

# Chuveiros Atmosféricos Extensos

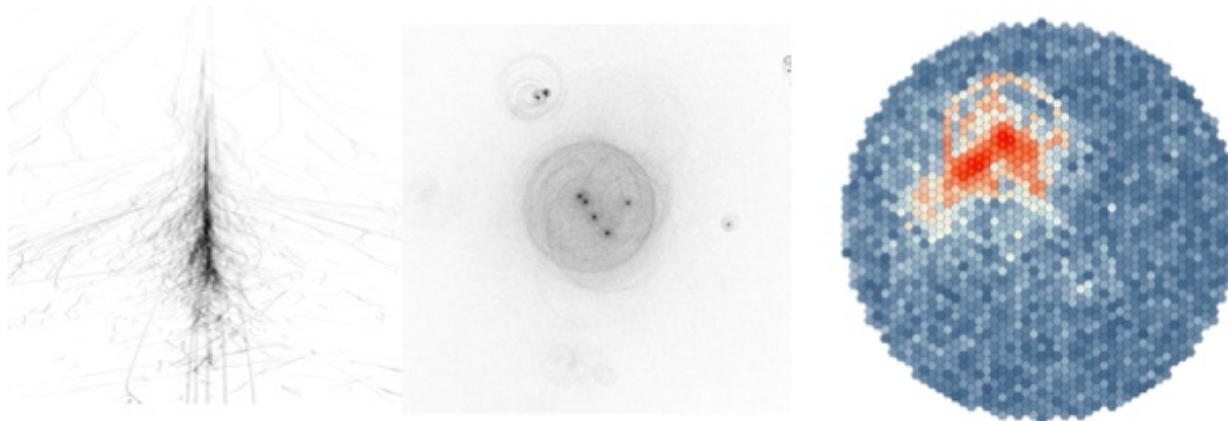
## A técnica de imagem atmosférica Cherenkov

Identificando o ruído de fundo

Gama



Próton





# Chuveiros Atmosféricos Extensos

## A técnica de imagem atmosférica Cherenkov

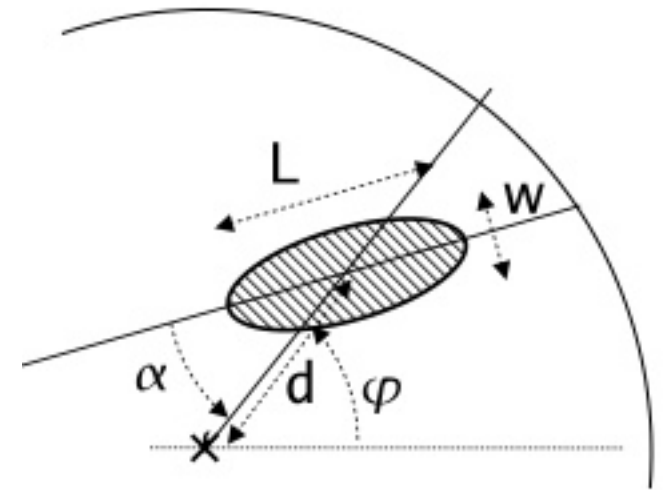
### Reconstrução

#### Caminho tradicional

- Parâmetros de Hillas
- Interseção dos eixos das imagens

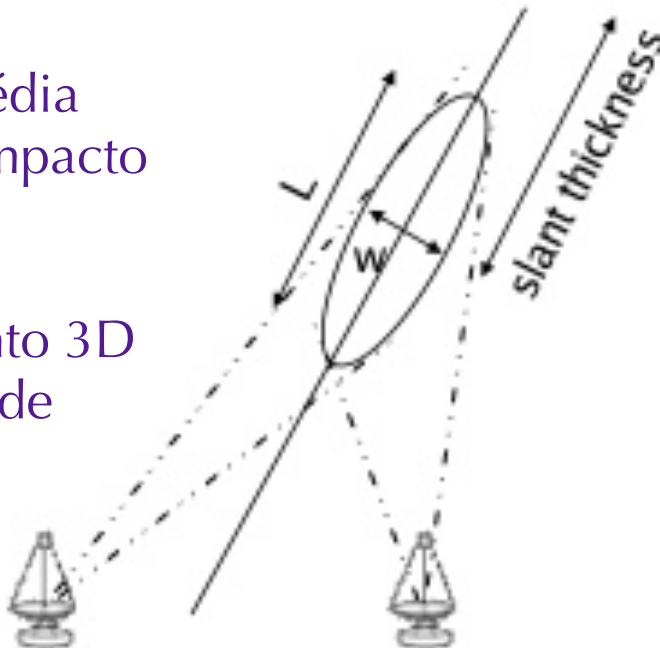
#### Caminho padrão moderno

- Modelos e máxima verossimilhança



### Modelo 3D

- Altitude média
- ponto de impacto
- direção
- largura e comprimento 3D
- luminosidade

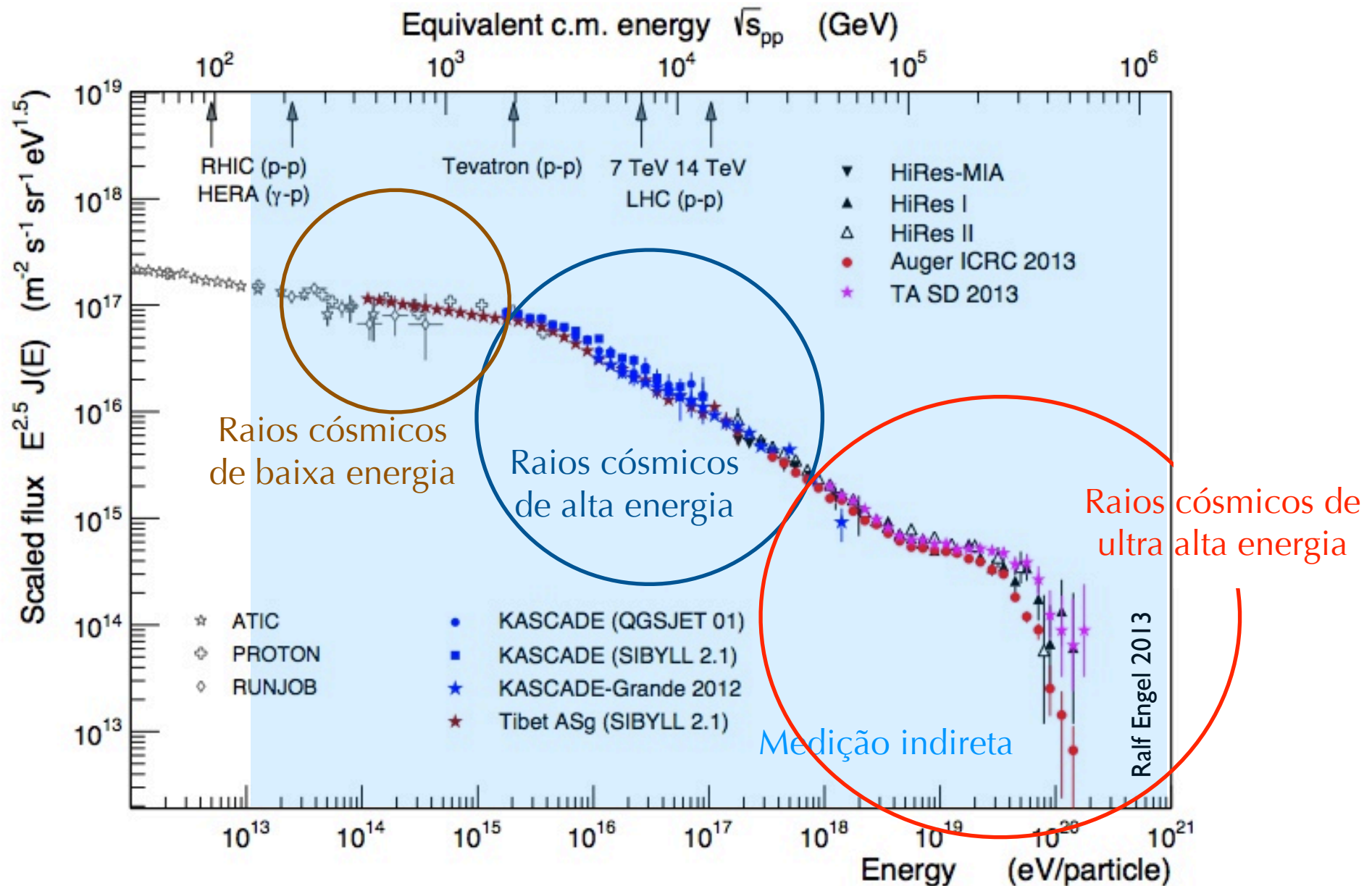


### Parâmetros de Hillas

- comprimento  $L$  e largura  $w$  da elipse
- Tamanho: amplitude total da imagem
- $d$  = distância angular entre o centro da câmera e o centro de gravidade da imagem
- $\phi$  = ângulo azimutal do eixo principal da imagem
- ângulo de orientação  $\alpha$

# Espectro de raios cósmicos

## Detecção de chuveis atmosféricos extensos



# Detecção de chuveis atmosféricos extensos

## Detectores de superfície (recentes e atuais)

AGASA [Akeno Giant Air Shower Array]

ARGO-YBJ: in Tibet

BAKSAN (Mt. Caucasus, Russia)

Buckland Park Extensive Air Shower Array (Australia) (operational 1971-1998)

CASA [Chicago Air Shower Array] (operational 1990-1998)

EAS-TOP (Italy, above the Gran Sasso laboratory, 1990-2000)

Haverah Park (Leeds University, operational until 1993)

GRAND [Gamma Ray Astrophysics at Notre Dame] (an array of tracking detectors)

GRAPES, India

HEGRA (operational 1988-2002)

ICETOP (South Pole, over ICECUBE)

KASCADE [KARlsruhe Shower Core and Array DEtector]

KASCADE-GRANDE

MILAGRO (Water Cherenkov experiment near Los Alamos)

Mt. Norikura Observatory in Japan

Pierre Auger Observatory

SPASE 2 [South Pole Air Shower Array]

SUGAR [Sydney University Giant Air shower Recorder] (operational from 1968 to 1979)

Telescope Array

Tian-Shan Mountain Cosmic Ray Station

Tibet AS-gamma experiment: scintillation counter array

Yakutsk (Russia)

[clique nos nomes para acessar a página web](#)

# Detecção de chuveis atmosféricos extensos

## Detectores de radiação (recentes e atuais)

AIROBICC (non-imaging counters in the HEGRA array)

ASHRA [All-sky Survey High Resolution Air-shower detector]

BLANCA [Broad Lateral Non-imaging C(h)erenkov Array] (at CASA))

H.E.S.S. [High Energy Stereoscopic System]

HiRes The High Resolution - Fly's Eye Cosmic Ray Detector

MACE [Major Atmospheric Cerenkov Telescope Experiment] (India)

MAGIC (a 17 m telescope on La Palma, Canary Islands, operational since 2003)

Narrabri, Australia: Mark 6 telescopes of the University of Durham (operational until March 2000)

PACT [Pachmarhi Array of C(h)erenkov telescopes] at the High Energy Gamma Ray Observatory at Pachmarhi, India.

Pierre Auger Observatory

Telescope Array

TUNKA (array of non-imaging counters near Lake Baikal)

VERITAS [Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System] (operational since 2007)

Whipple Gamma-Ray Telescope on Mt. Hopkins, Arizona (operational 1968-2008)