

# Medida do perfil longitudinal de chuueiros atmosféricos extesos e determinação da composição de raios cósmicos de ultra-alta energia

Projeto de Iniciação Científica para o Edital UFABC/Propes 01/2020

## Resumo

Apesar dos progressos na construção de grandes observatórios, questões-chave relativas à origem e as propriedades dos raios cósmicos de ultra-alta energia permanecem abertas para discussão na comunidade científica. Atualmente, o método mais confiável para estudar sua composição de massa é baseado na observação direta da luz fluorescente dos chuueiros que são produzidos pelos raios cósmicos na atmosfera. O perfil do desenvolvimento longitudinal dos chuueiros atmosféricos extesos carrega consigo informações relacionadas às propriedades da interação da partícula primária com núcleos atmosféricos.

Neste projeto de iniciação científica, obteremos medidas do perfil de chuueiros com  $E > 10^{18}$  eV em função da profundidade atmosférica atravessada sobre o Observatório Pierre Auger. As formas dos perfis são bem reproduzidas pela parametrização de Gaisser-Hillas dentro da faixa de energia estudada, com a qual é obtida  $X_{max}$ , a profundidade do máximo do chuueiro. Os dados serão confrontados com os resultados de uma simulação completa dos chuueiros atmosféricos extesos para diferentes previsões de acordo com as partículas primárias, energias e modelos de interação hadrônica.

**Palavras-chave:** Raios Cósmicos, Chuueiros Atmosféricos Extesos, Composição de Primários.

**Área e sub-área de conhecimento:** Física (Física de Partículas Elementares e Campos).

## I. INTRODUÇÃO

Desde a descoberta, na década de 1930 [1] [2] [3], dos chuueiros atmosféricos extesos, cascatas de partículas secundárias produzidas na atmosfera por raios cósmicos, as principais informações experimentais de que dispomos são o espectro energético, as anisotropias nas direções de chegada e a distribuição das massas dos primários. Com tais informações, procura-se determinar suas possíveis fontes e explicar seus mecanismos de produção, aceleração e propagação. Como o fluxo de raios cósmicos decresce muito rapidamente, diferentes técnicas são empregadas para a detecção das partículas com energias baixas ( $E \lesssim 10^{14}$  eV) ou com energias altas ( $E \gtrsim 10^{13}$  eV). Para as energias menores, o fluxo é grande o suficiente para que detectores pequenos, instalados em balões ou satélites, possam realizar as medidas. Entretanto, em altas energias, os raios cósmicos são tão raros que faz-se necessária a instalação de grandes arranjos experimentais, com áreas de coleção cobrindo até milhares de quilômetros quadrados, e, necessariamente, realizarem-se as medidas através dos chuueiros atmosféricos extesos.

Localizado na Argentina, na cidade de Malargüe (69,3° W, 35,3° S, 1400 m), o Observatório Pierre Auger [4] é um experimento híbrido, constituído basicamente por duas técnicas principais: o SD<sup>1</sup>, ou detector de superfície, formado por uma gigantesca rede de 1660 tanques Cherenkov cobrindo uma área maior que 3000 km<sup>2</sup> (vide figura 1-(a)), e o FD, ou detector de fluorescência, formado por um conjunto de 27 telescópios que captam a luz de fluorescência gerada pela excitação do nitrogênio na atmosfera. Há também outros detectores, como antenas de rádio, de micro-ondas ou de detectores de múons baseados em cintiladores plásticos, completando o arranjo experimental. Os tanques do SD [5] contêm 12 mil litros de água purificada, onde radiação Cherenkov é produzida quando partículas carregadas relativísticas passam através da água. A luz Cherenkov é convertida por tubos fotomultiplicadores em um sinal eletrônico que, por sua vez, é enviado à estação central de aquisição de dados (CDAS). Já o FD [6] consiste em quatro sítios (Los Leones, Coihueco, Loma Amarilla e Los Morados, vide figura 1-(a)) localizados nas periferias do FD. Os sítios (denominados *olhos*) possuem, cada um, 6 espelhos esféricos com 13 m<sup>2</sup> de área e 3,40 m de raio de curvatura. A abertura é limitada por um diafragma de 2,20 m de diâmetro e, atuando como janela da baía, há um filtro de banda larga que transmite na região do ultravioleta próximo (300 nm <  $\lambda$  < 410 nm), selecionando as principais emissões de fluorescência e reduzindo o ruído de fundo. Os raios mais afastados do eixo óptico são corrigidos por lentes [7] que mantêm as imagens resultantes menores que 0,5° na superfície focal. A luz é captada por uma câmera de 440 fotomultiplicadoras num arranjo de 20 × 22 tubos.

<sup>1</sup>Em alguns casos, adotaremos a sigla correspondente em inglês.

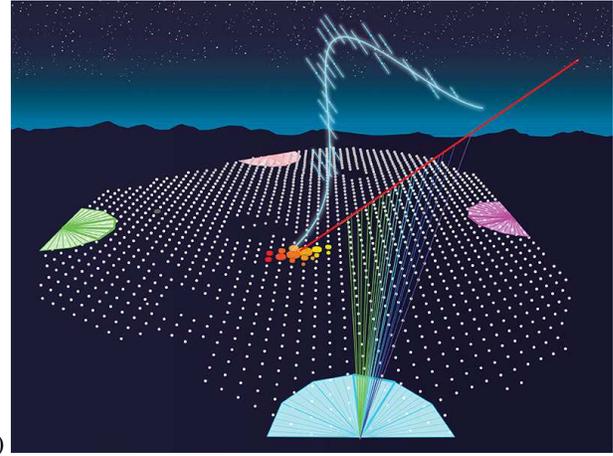
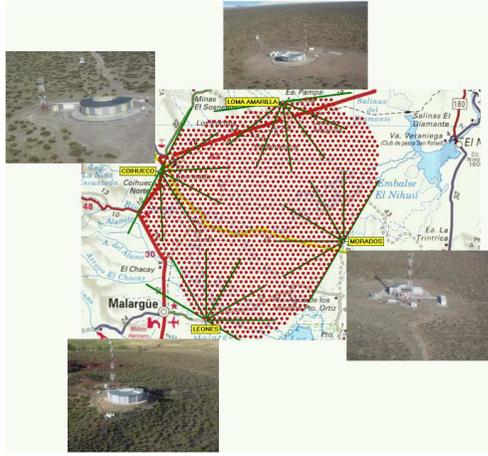


Figura 1: (a) mapa do Observatório Pierre Auger, os pontos vermelhos representam a posição de um tanque Cherenkov do SD e as linhas verdes representam os campos de visão dos telescópios do FD; (b) representação artística da detecção de um evento híbrido: a linha vermelha representa o eixo do chuveiro, os tanques do SD disparados em círculos amarelo, laranja e vermelho, os fótons chegando aos espelhos de Los Leones em traços azuis e verdes e a função de distribuição de luz de fluorescência no histograma azul claro com o ajuste de uma Gaisser-Hillas.

Eventos híbridos, isto é, aqueles obtidos por ambos os detectores (vide figura 1-(b)), são muito importantes para o confronto entre as duas técnicas e para a calibração em energia do SD (vide figura 2-(a)). A eficiência máxima do SD é atingida para  $E > 3 \times 10^{18}$  eV, mas com os eventos híbridos é possível reduzir o limiar de energia para  $10^{18}$  eV, incluindo-se a faixa de energia crucial para observar-se o *tornozelo* do espectro. Na figura 2-(b), vemos o espectro energético com duas evidentes mudanças de inclinação sendo observadas: a primeira em  $\sim 4,8$  EeV no tornozelo do espectro, podendo indicar a transição dos raios cósmicos galácticos para os extragalácticos, e a segunda em  $\sim 42$  EeV na região da supressão do fluxo, compatível com o corte GZK [8] [9].

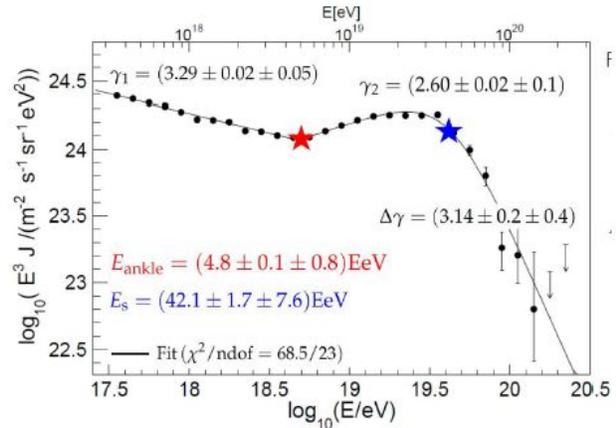
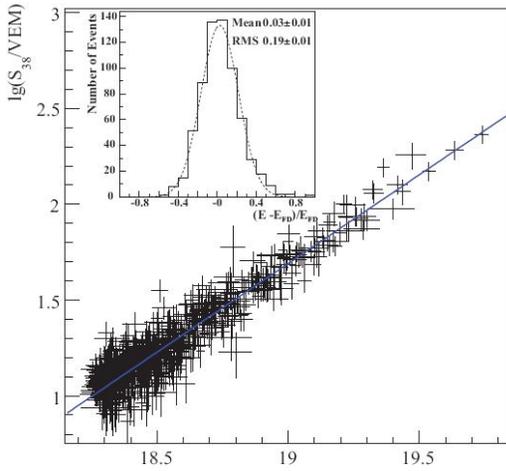


Figura 2: (a) correlação entre os estimadores de energia do SD ( $S_{38}$ ) e do FD ( $E_{FD}$ ) para eventos híbridos; (b) espectro energético de eventos do Observatório Pierre Auger (a estrela vermelha marca a posição do tornozelo e a estrela azul a da supressão) [10].

Os modelos de aceleração em fontes astrofísicas e de propagação dos raios cósmicos pelo espaço galáctico e extragaláctico são essencialmente dependentes e limitados pelas medidas de composição dos primários. Através da reconstrução do perfil longitudinal dos chuveiros pelo FD, estima-se a composição do primário, uma vez que chuveiros protônicos têm a profundidade do máximo,  $X_{max}$ , cerca de  $100 \text{ g/cm}^2$  mais profundos que os iniciados por núcleos de ferro. Analogamente, as flutuações deste parâmetro,  $\sigma(X_{max})$ , são cerca de  $40 \text{ g/cm}^2$  maiores nos chuveiros protônicos. Na figura 3, vemos os resultados para a profundidade do máximo e suas flutuações em função da energia para os eventos do Observatório Pierre Auger [10]. Os gráficos ilustram a tendência dos dados de aproximarem-se de núcleos pesados (linhas do ferro) nas energias mais altas.

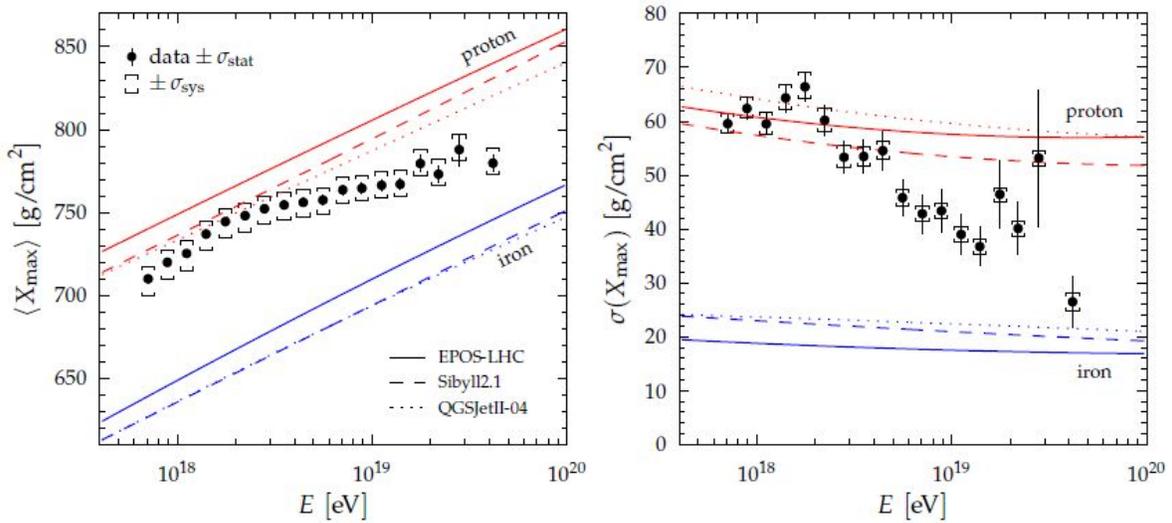


Figura 3: Taxa de alongação: (a) profundidades do máximo,  $X_{max}$ , em função da energia e (b) suas flutuações,  $\sigma(X_{max})$ , em função da energia com dados do Observatório Pierre Auger (pontos pretos) e em comparação com o esperado por simulações, para chuvers iniciados por prótons (linhas vermelhas) ou por núcleos de ferro (linhas azuis) [10].

## II. METODOLOGIA

Os chuvers são observados no FD pela sequência de *pixels* disparados na câmera de fotomultiplicadoras (figura 4-(a)). O primeiro passo da análise é encontrar o plano chuva-detector (SDP) que está representado geometricamente na figura 4-(b). Este é o plano que contém o telescópio e o eixo do chuva, podendo ser encontrado da maior parte dos *pixels* disparados na câmera (vide a linha ajustada na figura 4-(a)). A seguir, a informação contida nos tempos de disparo dos *pixels* (código de cores da figura 4-(a)) é usada para determinar a distância do eixo do chuva no SDP, onde são determinados os seguintes parâmetros:  $R_p$  (o parâmetro de impacto, isto é, a distância de maior aproximação do eixo do chuva ao detector) e  $\chi_0$  (o ângulo que o eixo do chuva faz com a horizontal).

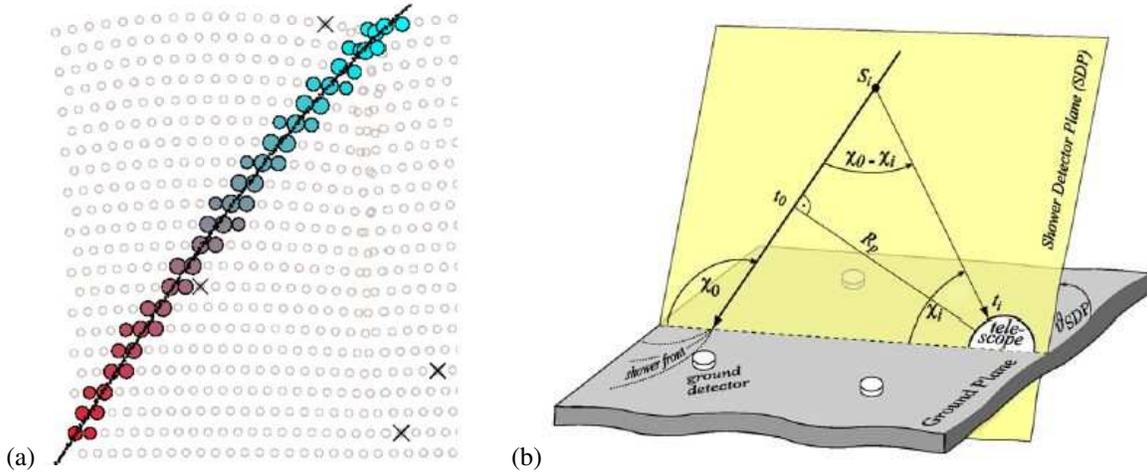


Figura 4: À esquerda: sequência de *pixels* disparados por um evento no FD; à direita: representação da geometria do SDP.

Observe que cada *pixel* capta os fótons do traço com um ângulo de elevação  $\chi_i$ . Definindo-se  $t_0$  como o instante da passagem do chuva pelo ponto de maior aproximação  $R_p$ , então a luz que chega ao  $i$ -ésimo *pixel* irá disparar o fototubo no instante de tempo  $t_i$ , dado por:

$$t_i = t_0 + \frac{R_p}{c} \operatorname{tg} \left( \frac{\chi_0 - \chi_i}{2} \right), \quad (1)$$

onde  $c$  é a velocidade da luz.

Uma vez que a geometria é determinada, a luz que é coletada na abertura do telescópio deve ser convertida em energia depositada no eixo do chuvaeiro em função da profundidade (em  $\text{g}/\text{cm}^2$ ). Para este propósito, a contribuição devida a todas as radiações presentes deve ser contabilizada: luz de fluorescência e luz Cherenkov, diretas ou espalhadas. Na figura 5-(a), temos um exemplo da luz medida na abertura do telescópio para as diferentes componentes de radiação e, na figura 5-(b), o perfil calculado para a energia depositada na atmosfera.

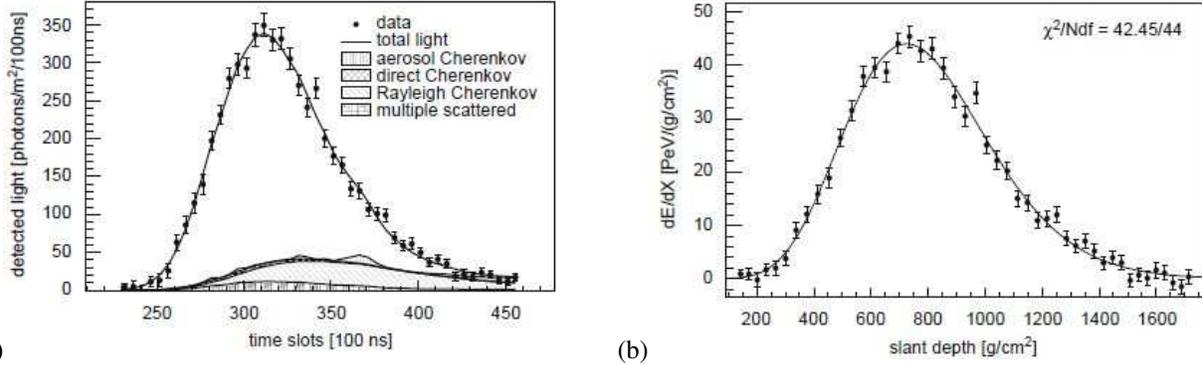


Figura 5: (a) exemplo de luz na abertura do FD devido às diferentes componentes de radiação incidentes; (b) perfil de energia depositada com a curva de Gaisser-Hillas [11] ajustada aos dados.

A luz de fluorescência é emitida isotropicamente com intensidade proporcional ao número de partículas carregadas no desenvolvimento chuvaeiro, assim o número de fótons de fluorescência pode ser calculada por:

$$N_\gamma = \int_0^l FY(\lambda, P, T) \cdot N_e dl, \quad (2)$$

onde  $FY$  é a emissão de fluorescência dada em unidades de fótons/(elétron-m),  $N_e$  é o número de elétrons e  $l$  é a distância no eixo do chuvaeiro coberta pela abertura do fototubo.  $FY(\lambda, P, T)$  é um parâmetro fundamental, obtido experimentalmente, que depende do comprimento de onda  $\lambda$  dos fótons emitidos e das condições de pressão e temperatura do ar na altitude de emissão. Entretanto, estes são os fótons de fluorescência no ponto de emissão, no eixo do chuvaeiro. Para calcular-se os número de fotoelétrons em cada tubo fotomultiplicador, devemos considerar que:

$$N_{pe} = \left[ \frac{\varepsilon \xi(R) A}{4\pi R^2} \right] N_\gamma, \quad (3)$$

onde  $\varepsilon$  a eficiência quântica do fototubo,  $\xi(R)$  um parâmetro que caracteriza a atenuação longitudinal dos fótons no ar,  $A$  é a área efetiva do espelho, e  $4\pi R^2$  é o fator geométrico devido à distribuição isotrópica dos fótons de fluorescência.

Desta, forma, invertendo-se as equações 2 e 3 pode-se calcular o número de elétrons em cada pedaço do eixo do chuvaeiro,  $N_e(X)$ , no campo de visão de um fototubo. A integral do número de elétrons ao longo de todo o eixo do chuvaeiro é diretamente proporcional à energia da componente eletromagnética do chuvaeiro, assim a energia do chuvaeiro estimada pelo FD é dada por:

$$E_{FD} = \frac{E_c}{0,9L_{rad}} \int N_e(X) dX, \quad (4)$$

onde  $E_c$  é a energia crítica para os elétrons,  $L_{rad}$  é o comprimento de radiação (no ar:  $E_c/L_{rad} \approx 2,23 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ ) e 0,9 um fator que leva em conta a energia perdida, pois cerca de 10% da energia do chuvaeiro vai ser dissipada na forma de partículas neutras ou múons.

A medida da energia do chuvaeiro feita pelo FD é dita *calorimétrica*, pois, apesar de envolver muitos parâmetros experimentais, é feita diretamente, sem a necessidade da previsão modelos de interações hadrônicas a altas energias, somente com resultados da teoria eletromagnética. Por isso, os valores de  $E_{FD}$  são usados na calibração do estimador de energia do SD,  $S_{38}$ , conforme vimos na figura 2-(a).

Por outro lado, tendo-se obtido a estimativa do número de elétrons em cada nível de profundidade  $N_e(X)$ , pode-se fazer o ajuste de uma função que modela o desenvolvimento longitudinal:

$$N_e(X) = N_{max} \left( \frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{(X_{max} - X_0)/\Lambda} \exp \left( \frac{X_{max} - X_0}{\Lambda} \right), \quad (5)$$

onde  $N_{max}$  é o número de elétrons no máximo,  $X_0$  é a profundidade da primeira interação,  $\Lambda$  é um parâmetro não-físico que controla as velocidades da potência e da exponencial e  $X_{max}$  é a profundidade do máximo de desenvolvimento do chuveiro — o parâmetro que mais nos interessa, pois é o que mais está ligado à composição do primário. Esta é a função de Gaisser-Hillas [12], que aparece sendo ajustada aos dados na figura 5.

### III. OBJETIVOS E METAS

Como atividade principal o aluno aprenderá a utilizar uma das principais simulações para a geração de chuveiros atmosféricos de raios cósmicos, o CORSIKA [13]. Através do CORSIKA é possível simular-se chuveiros de diferentes energias, composições, etc., para obter-se as quantidades, energias e tempos de chegada das partículas secundárias ao nível da superfície ou ao longo do desenvolvimento longitudinal. Serão gerados, com a simulação, os dados para estudar as funções dos perfis longitudinais dos chuveiros e suas correlações com a composição do primário. Paralelamente, o aluno desenvolverá uma simulação fenomenológica própria.

É importante ressaltar que o aluno já concluiu com excelência um projeto de PDPD e um de PIBIC sob minha orientação, analisando dados do Observatório Pierre Auger. Dando continuidade em suas pesquisas, os seguintes passos far-se-ão necessários dentro do atual projeto de IC:

1. Instalar e utilizar o pacote de simulação CORSIKA;
2. Simular conjuntos de chuveiros com diferentes energias  $10^{14} \leq E \leq 10^{20}$  eV e composições primárias: próton, He, N e Fe.
3. Desenvolver as rotinas de leitura e análise dos dados;
4. Estudar física de interações hadrônicas em altas energias;
5. Aprofundar-se nos estudos do Observatório Pierre Auger.

Além das atividades de pesquisa citadas, o aluno participará de reuniões periódicas do Grupo de Raios Cósmicos (GRC) com o orientador em que serão discutidos aspectos técnicos (teóricos ou experimentais) das pesquisas na área. Temos também como metas suas apresentações no Simpósio de Iniciação Científica da UFABC, bem como em encontros de física nacionais e/ou internacionais.

### IV. CRONOGRAMA

O cronograma de atividades a serem realizadas no presente projeto de iniciação científica resume-se às seguintes etapas:

Mês	Atividades	
1	Instalação do CORSIKA	
2	Rotinas de leitura Análise de dados	Simulações
3		
4		
5		
6	Elaboração do relatório parcial	
7	Estudos teóricos	Simulações
8		
9		
10		
11		
12	Elaboração do relatório final	

Tabela 1  
Cronograma de atividades da iniciação científica.

## V. CONCLUSÃO

A determinação da composição de raios cósmicos de ultra-alta energia é um problema importante e ainda em aberto na Física de Astropartículas. Vários modelos astrofísicos para a produção, a aceleração e a propagação dos raios cósmicos são impactados pelo conhecimento preciso da massa dessas partículas. As medidas do espectro energético e os estudos de anisotropia também são fortemente dependentes dos tipos de partículas primárias que chegam à Terra. Atualmente, o estudo do perfil longitudinal de chuviros atmosféricos extensos provê um método confiável para a medida da massa dos primários cósmicos.

No presente projeto, foram propostas atividades de pesquisa que tratam destes problemas, na vanguarda da Física de Astropartículas. Seus estudos fornecerão a base adequada para o estudante interessado em prosseguir suas pesquisas na área. Aproveitando dos vários anos de experiência profissional do orientador nesta área de pesquisa, bem como de sua participação em importantes colaborações científicas, como a do Observatório Pierre Auger, temos plena capacidade de realizar com êxito a orientação proposta no âmbito do programa de Iniciação Científica da UFABC.

## VI. REFERÊNCIAS

- [1] B. Rossi, *Supplemento a la Ricerca Scientifica*, **1** (1934) 579.
- [2] P. Auger, R. Maze, A.F. Robley, *Comptes Rendus*, **208** (1938) 1641.
- [3] P. Auger *et al.*, *Rev. of Modern Phys.*, **Vol. 11** (1939) 288.
- [4] A. Aab *et al.* [The Pierre Auger Collaboration], *The Pierre Auger Cosmic Ray Observatory*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: A* **798** (2015) 172-213.
- [5] J. Abraham *et al.*, *Trigger and Aperture of the Surface Detector Array of the Pierre Auger Observatory*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A613** (2010), 29-39.
- [6] J. Abraham *et al.* [The Pierre Auger Collaboration], *The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A620** (2010) 227 ( arXiv:0907.4282v1 [astro-ph.IM]).
- [7] M. A. L. de Oliveira, H. C. Reis, R. Sato and V. de Souza, *Manufacturing the Schmidt corrector lens for the Pierre Auger Observatory*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research: A* **522** (2004) 360-370.
- [8] K. Greisen, *Phys. Rev. Letters*, **16** (1966) 748.
- [9] G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min, *JETP Lett.*, **4** (1966) 78.
- [10] A. Aab *et al.* [Pierre Auger Collaboration], *The Pierre Auger Observatory: Contributions to the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC 2015)*, in: Proc. 34th ICRC, The Hague, The Netherlands (2015) (arXiv:1509.03732v1).
- [11] J. Abraham *et al.* [The Pierre Auger Collaboration], *The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* **A620** (2010) 227 ( arXiv:0907.4282v1 [astro-ph.IM]).
- [12] T. K. Gaisser and A. M. Hillas, *Proc. of 15th Int. Cosmic Ray Conf.*, **8** (1977) 353.
- [13] D. Heck, J. Knapp, J. N. Capdevielle, G. Schatz, and T. Thouw, Report **FZKA 6019** (1998), Forschungszentrum Karlsruhe; <http://www-ik.fzk.de/heck/publications/fzka6019.pdf>
- [14] ROOT Data Analysis Framework, <https://root.cern.ch/>