

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

RONALD CINTRA SHELLARD¹

¹Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)

<shellard@cbpf.br>

DOI: 10.21439/conexoes.v13i2.1677

Resumo. Descrevemos neste artigo os avanços recentes na área das Astropartículas, realizados em experimentos construídos em países da América Latina e apontamos alguns dos projetos que estão sendo concebidos para explorar com maior detalhe as astropartículas de altíssimas energias.

Palavras-chaves: Raios-cósmicos, raios-gama, detectores, radiação de Cherenkov.

Abstract. We describe in this article recent advances in the field of Astroparticle Physics due to experiments built in Latin American countries and point some of the projects that are being conceived to better explore with finner detail the astroparticles with very high energy.

Keywords: Cosmic-rays, gamma-rays, detectors, Cherenkov radiation

1 INTRODUÇÃO

Celebramos em 2019 os 100 anos da observação do eclipse do sol, na cidade de Sobral, o que significa também, o advento do uso do território latino-americanos para fazer observações com grandes implicações para nossa visão do cosmos e para o desenvolvimento da Cosmologia e da Física dos sistema astrofísicos.

Neste artigo vamos descrever os principais observatórios que estudam o que se convencionou chamar a Física das Astropartículas.

A primeira experiência em larga escala realizada na América do Sul, na busca de astropartículas, teve como protagonista principal o físico Cesare Lattes. Este cientista brasileiro, foi formado na escola estabelecida em São Paulo pelo físico ítalo-ucaniano Gleb Wathagin. Lattes estudou com outro físico italiano, Giuseppe Occhialini, e fez parte da equipe que descobriu o píon, formada por ele, Occhialini e Cecil Powell, da Universidade de Bristol, no Reino Unido.

O píon foi previsto pelo físico Hideki Yukawa como sendo a partícula que faria o papel de adesivo para manter prótons e nêutrons juntos num núcleo atômico. Esta partícula foi descoberta em 1947 pela análise de cerca de uma dúzia de placas de emulsões fotográficas expostas no Pic du Midi (2 867 m), nos Pirineus franceses. A exposição, tomada por Occhialini, com a ajuda de Lattes, produziu evidência de apenas dois eventos. O líder do grupo, Cecil Powell veio a receber o prêmio Nobel de Física em 1950, com a citação: "... pelo desenvol-

vimento do método fotográfico de estudando processos nucleares e suas descobertas sobre mésons feitos com este método".



Figura 1: Estação metereológica de na montanha Chacaltaya (5 240 m).

Lattes, logo após a publicação da descoberta, apontou que havia uma estação meteorológica em uma montanha na Bolívia, não muito longe de La Paz, a capital daquele país. A montanha Chacaltaya fica a 5 240 m acima do nível do mar (ver Figura 1), muito adequada para expor câmaras de emulsões e aumentar a estatística de píons.

Lattes transportou uma coleção de câmaras de emul-

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

sões para a Bolívia, numa viagem que pode ser considerada épica (VIEIRA, 2012). As câmaras de emulsões foram expostas por alguns meses no laboratório em Chacaltaya e nelas foram identificadas algumas centenas de novas evidências para a existência do píon. Esta excursão de Lattes abriu Chacaltaya para colaborações internacionais explorando raios cósmicos.

O termo Física das Astropartículas de uso recente, é uma extensão do que no passado chamava-se Física dos Raios Cósmicos. A denominação de raios cósmicos, hoje, é entendida como restrita às partículas que vêm do espaço e são núcleos de átomos. No entanto, com a invenção de novos instrumentos, ao longo das últimas décadas, partículas como raios gama, neutrinos e até mesmo elétrons e pósitrons ficaram acessíveis à medida de suas características.

A distinção do que vem a ser uma astropartícula é, de certa maneira, ambígua pois são definidas como todas as partículas que vêm do espaço. No entanto, não usamos este termo para definir fótons nas regiões visível, ou infra-vermelho, ou até mesmo a radiação ultra-violeta ou raios-X. Gamas são fótons com energias acima de dezenas de MeV. O foco principal deste artigo são astropartículas com energias acima de dezenas de GeV.

2 RAIOS CÓSMICOS

A identificação de raios cósmicos foi feita por Victor Hess, em 1910, medindo a radiação ambiental em balões. Por esta descoberta Hess recebeu o prêmio Nobel de Física de 1936. Estas partículas carregadas (essencialmente prótons), são produzidos nas explosões solares, em explosões de super-novas e são aceleradas por diversos mecanismos ao longo da galáxia e também no espaço extra-galáctico. O espectro medido destes raios cósmicos cobre a região de energia que vai de poucos GeVs até energias da ordem de 10^{20} eV. Este espectro segue uma lei de potência, com índices de inclinação que variam, sinalizando novos processos físicos associados.

Raios cósmicos, em particular a componente de alta energia deles, forneceram uma maneira de estudar e inferir os eventos envolvendo as energias mais extremas que ocorrem no universo. Embora não seja ainda possível apontar a origem dos mais energéticos, os avanços na caracterização dos raios cósmicos tem sido muito significativos, usando ferramentas, como as que descreveremos na sessão 3. A principal razão para a frustração em não identificar os locais de origem, dos raios cósmicos de energias mais altas, tem a ver com a presença de campos magnéticos que permeiam o espaço entre as galáxias. Embora muito fracos, esses campos magnéticos

se estendem por vastas regiões, de modo que o resultado final é distorcer as trajetórias dos raios cósmicos, tal que no momento em que nos atingem, perderam a memória de sua direção original.

Apesar de estudados há mais de 100 anos, a origem e natureza dos raios cósmicos de energias mais altas medidas ainda são fonte de intensa investigação, fundamentalmente pela dificuldade em associar um raios cósmico à direção de sua fonte de formação.

2.1 Chuveiros atmosféricos

Raios cósmicos tem comportamento típico de partículas e quando tem muita energia formam o que se chama de chuveiro de partículas ou chuveiro atmosférico ao interagir com matéria comum. Assim, quando atingem a atmosfera terrestre interagem com os núcleos e moléculas do ar e sua energia é distribuída entre novos fragmentos, que são novas partículas. O processo vai se repetindo até que a energia em cada fragmento não é capaz de gerar novas partículas. Este conjunto de partículas se propaga pela atmosfera à velocidade muito próxima à da luz, formando um disco, ou melhor uma casca de partículas cujo raio se expande de acordo com a evolução da fragmentação da energia. A composição deste chuveiro atmosférico trás informações sobre a natureza do componente primário do chuveiro. Assim, um raios cósmico formado por um núcleo atômico irá produzir como fragmentos outros núcleos atômicos e uma profusão de píons, ou outros mésons mais pesados. Por sua vez, estes mésons em algum ponto se convertem em partículas estáveis que irão formar o chuveiro. É ilustrativo pensar nestes componentes como sendo píons carregados e neutros, pois mesmo os mésons mais pesados vão acabar por ter comportamento semelhante. Píons carregados, viajam distância consideráveis, antes de se converterem em mísions e neutrinos. Os neutrinos são extremamente difíceis de serem observados e desaparecem carregando uma fração significativa da energia do chuveiro atmosféricos, enquanto que os mísions são estáveis e podem ser observados, carregando, também, uma fração significativa da energia do chuveiro. Na verdade, os mísions não são estáveis, porém suas velocidades relativísticas, estendem suas vidas médias, no ponto de vista de um observador na Terra, de tal ordem que possam atravessar toda atmosfera sem decair, podendo ser medidos ao nível do mar. Em contraste, os píons neutros decaem imediatamente em gamas, que por sua vez interagem com cargas elétricas dos núcleos, convertendo-se em pares de elétrons e pósitrons, que por sua vez emitem novas gamas pelo processo de *bremstrahlung*, gerando a componente eletromagnética de uma chuveiro atmosférico,

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

formada por pares $e^+ e^-$ e gamas com muita energia.

2.2 A Medida de astropartículas

Raios cósmicos podem ser detectados no espaço, como é o caso do observatório AMS-02, instalado na Estação Espacial Internacional (ISS) (AGUILAR et al., 2016). Porém, apesar da grande sofisticação dos detectores neste experimento, com excelente resolução angular e da energia, ele está limitado pelo tamanho e consequentemente pela sua sensibilidade. O fluxo de raios cósmicos cai tipicamente com um comportamento em potência (negativa) da energia, portanto quanto maior a aceitação em energia, maiores são as dimensões necessárias para o observatório.

Assim, grande parte dos experimentos para medir as características e raios cósmicos é formada por detectores de partículas, instaladas na superfície da Terra. Vamos descrever mais adiante (Seção 3) o Observatório Pierre Auger, que vem a ser o maior detector de raios cósmicos em operação, no presente.

Mas antes da avançar na descrição da medida de outras astropartículas, menciono um fenômeno físico que está presente em boa parte dos experimentos em astropartículas, que é a radiação de Cherenkov. A radiação de Cherenkov foi descoberta em 1934, por Pavel Cherenkov, Ilya Frank e Igor Tamm, que receberam o prêmio Nobel de Física por esta descoberta em 1958. Partículas carregadas atravessam, muitas vezes matéria, com velocidades muito próximas à velocidade da luz, no entanto, maiores do que a velocidade de propagação da fase de luz naquele meio. Isto gera um cone de radiação, com frequência dominante no ultravioleta. Este fenômeno é usado em detectores formados por tanques com água e sensores de fótons, ou ainda em telescópios que medem a radiação de Cherenkov emitida por um grande número de partículas atravessando a atmosfera.

3 O OBSERVATÓRIO PIERRE AUGER

O Observatório Pierre Auger é uma criação de Jim Cronin, Alan Watson e Murat Boratav, que em 1992 começou a discutir a possibilidade de construir um grande conjunto de detectores de partículas capazes de lidar com partículas primárias da ordem de 10^{20} eV. Nos três anos seguintes, eles convenceram cientistas de que um projeto com esse objetivo não era apenas possível, mas essencial para a compreensão da natureza e origem dos raios cósmicos de ultra alta energia. A Colaboração Pierre Auger foi formalmente estabelecida em uma reunião na sede da UNESCO, em Paris, em dezembro de 1995. Naquela reunião foi decidido que o primeiro sítio do Auger estaria no Hemisfério Sul e um local na Ar-

gentina, na província de Mendoza foi identificado como ideal para a construção do observatório. Uma equipe de cientistas havia viajado ao redor do mundo procurando por locais com características adequadas para a instalação da rede de detectores. Na reunião da UNESCO, houve uma oferta da Austrália e da África do Sul, competindo com o sítio argentino. A construção do arranjo de detectores e dos telescópios do Auger foi iniciada em 2004, após testar a operação de seus componentes em um arranjo formado por 32 protótipos dos Detectores de Superfície (SD), a ser descrito adiante. A rede de detectores completa foi concluída e inaugurada em 2008, mas a coleta de dados foi feita desde o início da construção, enquanto a rede crescia (ABRAHAM et al., 2004).

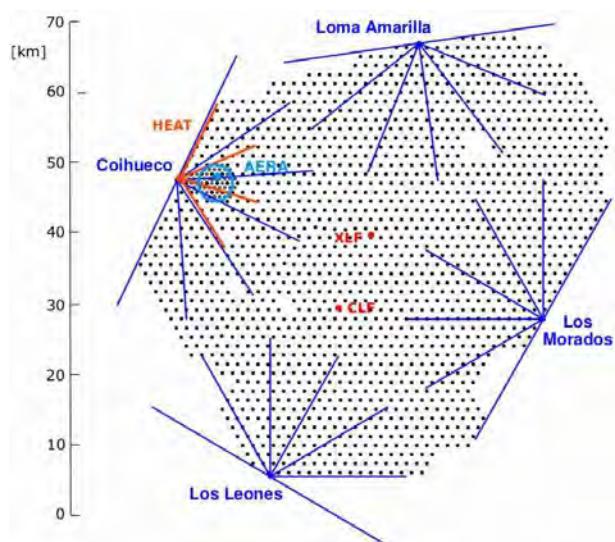


Figura 2: Diagrama do sítio do Observatório Pierre Auger, onde cada ponto representa um dos 1 600 detectores do tipo SD, dispostos numa rede triangular com aresta de 1 500 m. São mostrados, também, os quatro sítios dos telescópios FD.

O Auger é um sistema híbrido, dependendo de dois conjuntos complementares de detectores. Existem os Detectores de Superfície (SD) projetados para medir a quantidade de radiação de Cherenkov gerada pela passagem das partículas de um chuveiro em um meio denso (água). O segundo componente são os Detectores de Fluorescência (FD), telescópios projetados para detectar a fluorescência da atmosfera induzida pela passagem das partículas do chuveiro atmosférico.

O observatório Auger tem 1 660 detectores SD, dispostos numa grade triangular, com 1500 m lado separando dois detectores e, abrangendo uma área plana de cerca de 3 100 km² (veja a Figura 2) (AAB et al., 2015). A rede está localizada a nordeste da cidade de

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

Malargüe, na província de Mendoza, na Argentina (veja o mapa na Figura 2). As altitudes na extensão da região variam de 1340 a 1610 m. A região foi escolhida pelos seus céus claros, pela baixa poluição luminosa e, também, pela infra-estrutura existente, adequada para apoiar o experimento. Na verdade, a cidade tem uma rede de hotéis e restaurantes suficiente para acomodar reuniões da Colaboração Pierre Auger, que ocorrem duas vezes por ano, há mais de quinze anos.

Os telescópios FD estão alojados em quatro locais na periferia da rede SD, votados para o interior da rede (ver Figura 2). Cada local abriga seis telescópios, que cobrem um campo de visão na faixa zenithal do horizonte até 30° e 30° de amplitude na faixa azimutal.

3.1 O detector

As estações de detectores de superfície são tanques de água, consistindo de vaso de polietileno, com um forro interno selado, capaz de refletir a radiação de Cherenkov, essencialmente ultra-violeta, gerada pela passagem de partículas carregadas pela água. O tanque tem um diâmetro de 3,6 m e a linha de água tem 1,2 m de altura, e é sensível, também, a fótons de alta energia, que geraram pares de e^+e^- na água (ALLEKOTTE et al., 2008) (AAB et al., 2015).

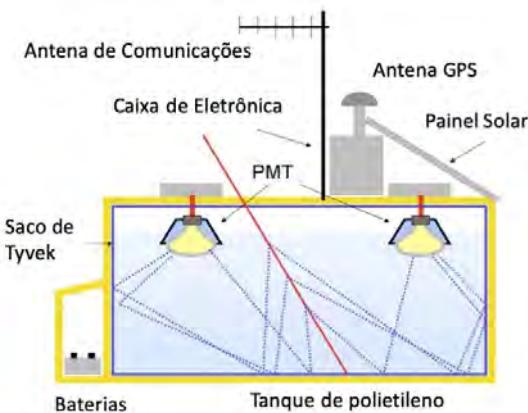


Figura 3: O esquema para um detector SD Auger e seus componentes.

A radiação Cherenkov é coletada por três tubos fotomultiplicadores (PMTs), de nove polegadas de diâmetro, distribuídos simetricamente na superfície superior da água, olhando para baixo (Figura 3). A razão para isto é que eles coletam a luz refletida nas paredes do tanque e não são influenciados pela incidência direta da radiação de Cherenkov. A estação é autônoma e sua energia é alimentada por duas baterias comerciais (fa-

bricadas pela empresa brasileira Moura), de chumbo-ácido, alimentadas por painéis solares. A caixa eletrônica contendo um processador, um receptor GPS, um transceptor de rádio e um controle de energia estão fora do tanque. Cada estação tem um sistema de comunicação e uma antena GPS, cujo sinal serve como o relógio do sistema.

Toda a rede é controlada pelo sistema de Central de Aquisição de Dados (CDAS), localizado em Malargüe. A operação da rede SD é muito estável e tipicamente mais de 98 % das estações estão operacionais a qualquer momento (ALLEKOTTE et al., 2008).



Figura 4: Foto de um detector Auger SD e uma linha de detectores separados por 1.5 km

O sistema de gatilho dos tanques depende da medição da carga média coletadas pelo PMT usando como referência a carga gerada pela passagem de um único muon vertical, denominado *Vertical Muon Equivalent* (VEM) (ABRAHAM et al., 2010b). Cada tanque coleta todos os sinais gerados na estação, em intervalos curtos (60s) e compara com uma distribuição de referência que permite uma calibração constante das PMTs. Cada estação envia um sinal para o CDAS quando o limiar do sinal de disparo é ultrapassado, que então compara com um padrão e quando pelo menos três estações vizinhas são disparados em uma janela de tempo de dezenas de μ s, um gatilho é transmitido para todos as estações para baixar seus dados.

Os dados são então coletados, classificados e pré-analizados no CDAS e disponibilizados para toda a colaboração.

A reconstrução do chuviceiro atmosférico depende da determinação do baricentro dos sinais para determinar a posição do eixo do chuviceiro, e a inclinação do chuviceiro, e o tempo de chegada da frente do chuviceiro em cada estação, determinado pelo sistema GPS, instalado em cada estação.

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

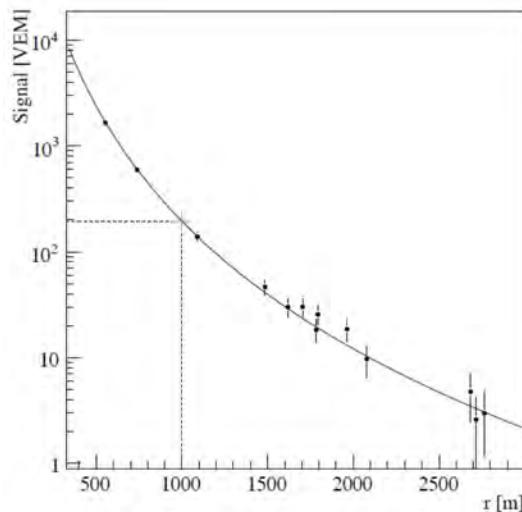


Figura 5: Distribuição de sinais como função da distância ao eixo do chuveiro e a parametrização tipo NKG.

zado. A câmera, na posição focal de metade do raio, tem 440 pixels, formados por fotomultiplicadores hexagonais. Cada ponto no céu, dentro do campo de visão de $30^\circ \times 30^\circ$, é projetado em um pequeno ponto na superfície da câmera. O sistema óptico tem um diafragma para evitar as aberrações ópticas devido ao campo de visão amplo e é auxiliado por anéis corretores feitos de lentes de vidro. Esses anéis corretores dobram a luz coletada pelo telescópio (veja a Figura 7).



A função de distribuição lateral (LDF), que descreve o tamanho do sinal em função da distância ao eixo do chuveiro de ar, pode ser parametrizado pela função Nishimura-Kamata-Greisen (NKG) modificada (KAMATA; NISHIMURA, 1958) (GREISEN, 1956):

$$S(r) = S_0 \left(\frac{r}{r_s} \right) \left(1 + \frac{r}{r_s} \right)^{-\beta} \quad (1)$$

onde

$$\beta = 3.3 - 0.9 \sec \theta.$$

O tamanho do sinal a 1 000 m do eixo do chuveiro é um *proxy* para a energia de a partícula primária do chuveiro.

O Detetor de Fluorescência (FD) mede a radiação ultravioleta emitida pela excitação das moléculas do ar (nitrogênio) à medida que o feixe de partículas carregadas evolui no atmosfera e é uma boa *proxy* para a energia depositada e está correlacionada com a energia no raio cósmico primário.

Os 24 telescópios estão alojados em quatro edifícios no limite da rede de detetores SD e são denominados de acordo com referências geográficas locais, são: a) Los Leones (Figura 6) na posição sul; b) Los Morados a leste; c) Loma Amarilla ao norte; d) Coihueco no oeste. No site da Coihueco há um telescópio extra (HEAT), que aponta para o ângulo zenital de 30° a 60° .

Cada telescópio tem um conjunto de espelhos de geometria esférica com raio de 3.4 m, com dimensões verticais e horizontais de $3.6 \text{ m} \times 3.6 \text{ m}$, segmentadas em 36 peças retangulares de espelhos de alumínio anodizado.

Figura 6: Topo: O edifício do sítio de telescópios Los Leones Telescópe [foto do autor]. Baixo: Esquema de disposição dos seis telescópios em cada um dos sítios do FD. (ABRAHAM et al., 2010a).

A distribuição do chuveiro de X_{max} , a posição de desenvolvimento máximo do chuveiro de ar está intrinsecamente ligado à seção de choque do próton inicial com os núcleos de ar. Esta posição é medida como a quantidade de matéria atravessada pelo raio cósmico e seus fragmentos (expressos em unidades de g/cm^2) e pode ser inferida diretamente usando dados do detector de fluorescência (FD) de Auger.

O sinal, em função da profundidade atmosférica, registrado pelo detetor de fluorescência, é bem parametrizado pela função de Gaisser-Hillas (HILLAS, 1972):

$$N(X) = N_{max} \cdot \left(\frac{X - X_0}{X_{max} - X_0} \right)^{(X-X_0)/\lambda} \times e^{(X_{max}-X)/\lambda}, \quad (2)$$

que descreve o número de partículas carregadas no chu-

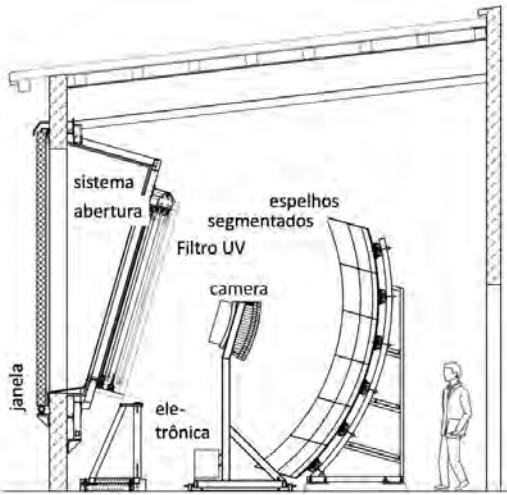
 ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL


Figura 7: Corte esquemático de um telescópio de fluorescência.

veiro – essencialmente a componente eletromagnética – onde N_{max} é o número máximo de partículas carregadas na profundidade atmosférica X_{max} , enquanto X_0 e λ são parâmetros associados à composição primária dos raios cósmicos e à sua energia (veja a Figura 8).

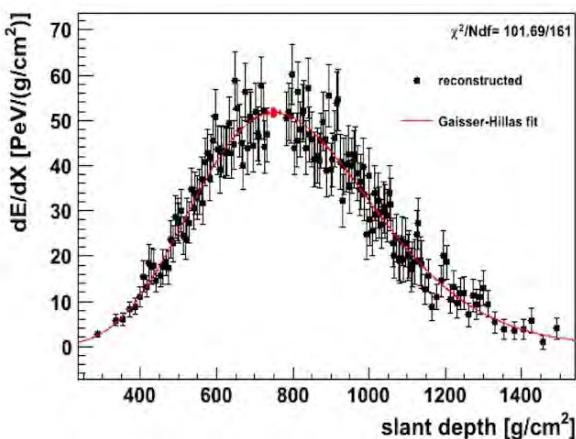


Figura 8: Desenvolvimento de um chuveiro em função da profundidade atmosférica e o ajuste pela função de Gaisser-Hillas (ver eq. 2) (ABRAHAM et al., 2010a)

3.2 Resultados físicos

A medida mais importante para o Auger é a do fluxo de raios cósmicos com energias extremas (acima de 10^{18} eV ou 1 EeV) e o resultado está mostrado na Figura 9. O espectro (FENU, 2017) mostra um comporta-

mento de acordo com uma lei de potência. No entanto, há características marcantes no espectro, como a mudança espectral à energia $E = 5.08$ EeV, indicando, possivelmente mudança da origem dos raios cósmicos de galácticos a extra-galácticos. Por outro lado, a supressão de raios cósmicos em energias muito altas, devido, muito provavelmente, ao processo GZK – pelo qual os raios cósmicos com energias muito elevadas, dissipam sua energia em interação com a radiação de fundo do universo.

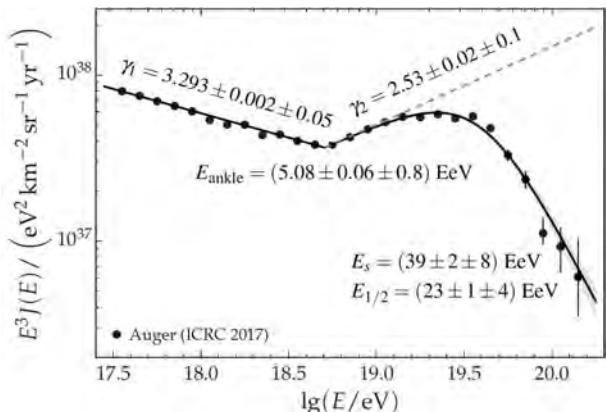


Figura 9: O espectro em energia obtido pela combinação dos chuveiros verticais medidos pelo SD, mais chuveiros inclinados, híbridos e realizados pela parte mais densa da rede. A incerteza sistemática na escala de energia é de 14 %. (FENU, 2017)

A partir dos dados do Auger é possível inferir a seção de choque próton-próton (ABREU et al., 2012). A cauda do X_{max} é sensível à seção de choque do próton com os núcleos dos átomos do ar. A estratégia para selecionar eventos onde o raio cósmico de alta energia tem a *aparência* de um próton, foi restringir as energias das primárias para o intervalo de energia de 10^{18} a $10^{18.5}$ eV.

Para determinar a seção de choque próton-ar a partir colisões de raios cósmicos de alta energia é necessário apoiar-se em simulações, tendo como consequência uma dependência em modelos.

O observatório Auger tem entre seus resultados mais relevantes a observação de uma anisotropia dipolar de grande escala para raios cósmicos com energias acima de 8×10^{18} eV (AAB et al., 2017).

No momento o Observatório Pierre Auger está instalando novos componentes, cuja principal função é melhorar a identificação dos mûons e, consequentemente, melhorar a identificação da componente primária do chuveiro. Em cima dos detetores (dos tanques) estão sendo instalados cintiladores plásticos. O observatório está planejado em operar até 2025 (AAB et al.,

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

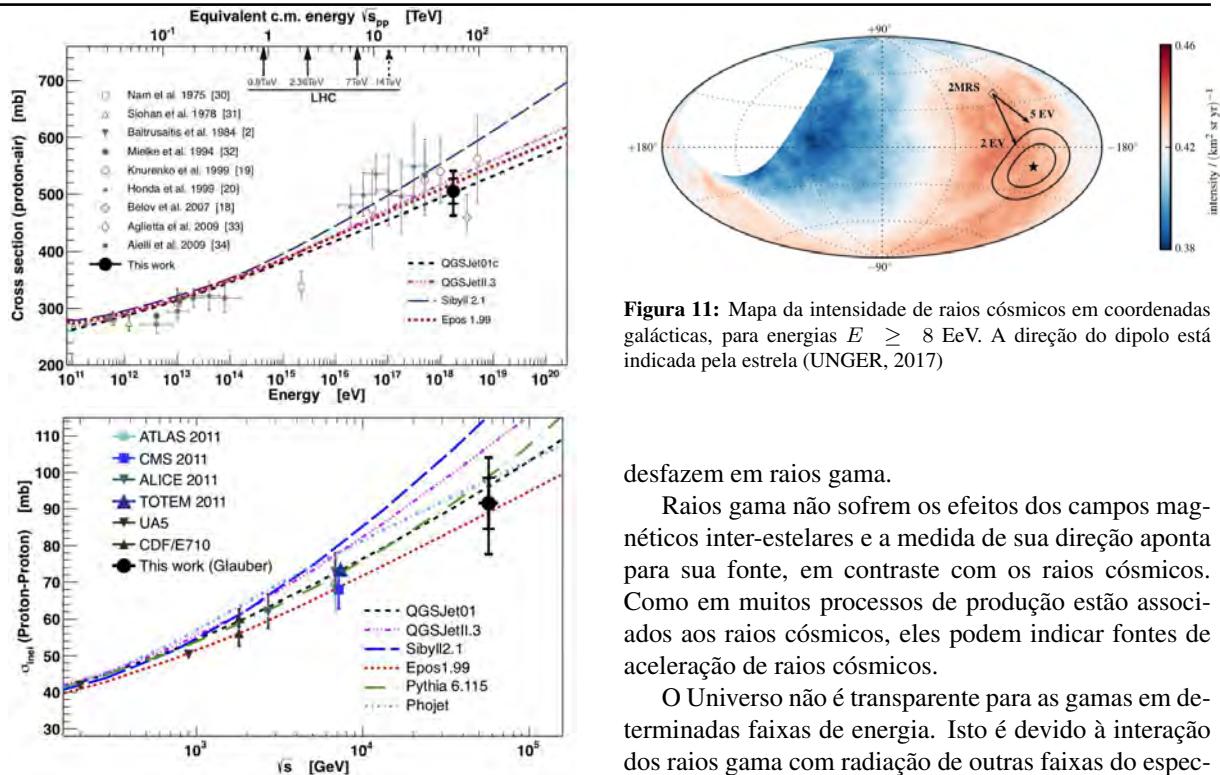


Figura 10: Top: The σ_{p-air}^{prod} compared to other measurements (ABREU et al., 2012). Bottom: Transformation into σ_{p-p}^{prod} and comparison with measurements at the LHC.

2016).

4 RAIOS GAMA

Os campos magnéticos extra-terrestres são um problema para a identificação da origem dos raios cósmicos, no entanto, eles não afetam partículas gama. Se os processos de formação e aceleração dos raios cósmicos forem hadrônicos, irão emitir raios gama também. O que torna estudar os raios gama uma prioridade.

A tecnologia necessária para medir raios gama foi desenvolvida sómente na segunda metade do século XX e está associada ao desenvolvimento de programas militares para identificar explosões nucleares. Hoje há uma ampla gama de observatórios com foco na detecção dos raios cósmicos. Raios gama são produzidos essencialmente na aniquilação de elétrons e pósitrons, ou então pela emissão no processo de aceleração a velocidades relativísticas de partículas com cargas elétricas ou, ainda, na colisão de núcleos atômicos resultando na emissão de píons. Os píons neutros imediatamente se

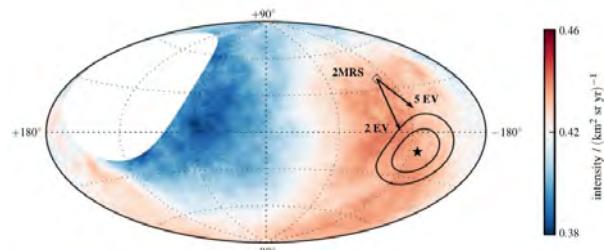


Figura 11: Mapa da intensidade de raios cósmicos em coordenadas galácticas, para energias $E \geq 8$ EeV. A direção do dipolo está indicada pela estrela (UNGER, 2017)

desfazem em raios gama.

Raios gama não sofrem os efeitos dos campos magnéticos inter-estelares e a medida de sua direção aponta para sua fonte, em contraste com os raios cósmicos. Como em muitos processos de produção estão associados aos raios cósmicos, eles podem indicar fontes de aceleração de raios cósmicos.

O Universo não é transparente para as gamas em determinadas faixas de energia. Isto é devido à interação dos raios gama com radiação de outras faixas do espectro, devido ao processo $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ (DE ANGELIS; Galanti; Roncadelli, 2013). É possível observar no gráfico da Figura 12 que há regiões do espectro para as quais o universo é bastante opaco, limitando o horizonte de fontes a regiões próximas à Terra.

4.1 Detecção de raios gama

Raios gama são outra forma de astropartículas, cuja observação passou por grande avanço em tempos recentes, graças ao desenvolvimento de novas tecnologias para observá-las

Eles podem ser detectados por pelo menos três métodos distintos:

Satélites – Pelo uso de detectores de partículas instalados em satélites, fora da atmosfera terrestre (THOMPSON, 2015). Os instrumentos mais avançados, ainda em órbita, são o satélite italiano AGILE (*Astro-Rivelatore Gamma a Immagini Leggero*) (TAVANI et al., 2009), lançado em 2007 e o Fermi *Gamma-ray Space Telescope* (ATWOOD et al., 2009), lançado em 2008. Ambos estão em órbitas geocéntricas a uma altitude ligeiramente acima de 500 km. Eles podem varrer uma parte substancial do céu em um único dia, entretanto os detectores são limitados em tamanho, limitados na faixa de energia a que são sensíveis, além disso, eles são muito caros de preparar e lançar e, uma vez em órbita, não podem ser reparados em caso de mal-funcionamento.

 ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

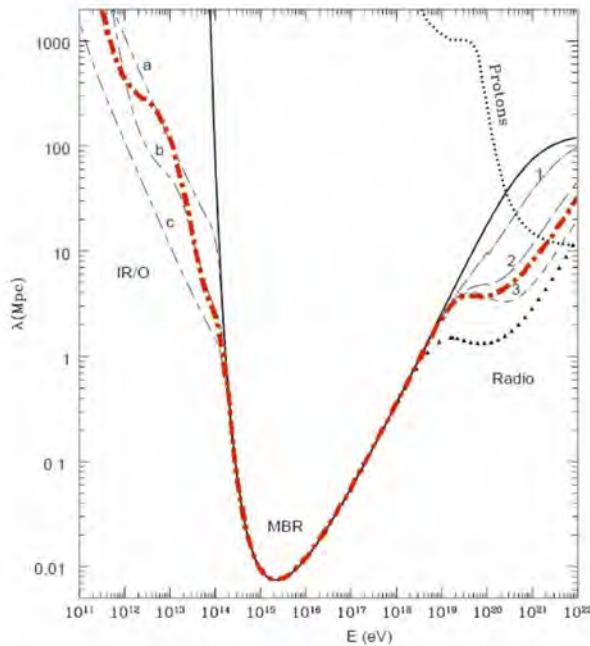


Figura 12: O Universo é opaco para as mesmas faixas de energia, basicamente por causa do processo $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ (DE ANGELIS; Galanti; Roncadelli, 2013)

IACT – A radiação de Cherenkov emitida pelas partículas induzidas por um raio gama de alta energia pode ser detectado pelos telescópios tipo IACT – Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes.

O raio gama converte-se em um par energético pósitron-elétron, e cada um deles emite fôtons de bremsstrahlung, que geram mais pares e^+e^- . A cascata de partículas carregadas eletromagnéticas ultra-relativísticas viaja mais rápido que a velocidade da luz no ar, emitindo assim uma radiação Cherenkov irradiada para a frente. O chuveiro atingirá o máximo, pois as partículas liberam energia por ionização e excitação atômica e desaparecem rapidamente quando as partículas atingem energia crítica, tipicamente da ordem de 83 MeV no ar (FUNK, 2015) (DE NAUROIS; MAZIN, 2015).

Há pelo menos três sistemas em operação no mundo hoje:

a) VERITAS, instalado no estado do Arizona, EUA, formado por 4 telescópios, cada um com diâmetro de 12 m, uma câmara com 499 pixéis e um campo de visão de 3.4° (HOLDER, 2015);

b) o MAGIC, instalado no pico *Roque de los Muchachos*, em La Palma, em uma das ilhas Canárias, na Espanha, formado por dois telescópios de 17 m de diâmetro, uma câmara com 1039 pixéis e campo de visão

de 3.5° (CARMONA et al., 2011);

c) o HESS, instalado na Namíbia, formado por um telescópio com diâmetro de 28 m, com câmara com 2048 pixéis, campo de visão de 3.2° e mais quatro telescópios com 12 m de diâmetro, 960 pixéis e campo de visão de 5.0° (AHARONIAN et al., 2006).

Detectores terrestres – A outra alternativa para medir raios cósmicos é medindo diretamente as partículas que formam o chuveiro atmosférico. Para medir-se raios gama este observatórios estão sempre construídos em grandes altitudes para poder registrar a parte eletromagnética dos chuveiros. Via de regra registram também chuveiros provenientes de raios cósmicos. O grande desafio desta classe de detectores é separar chuveiros gerados por raios gama, daqueles por raios cósmicos, muito mais numerosos.

Durante muitos anos, o detector ARGO-YBJ, tomou dados. Foi construído por uma colaboração ítalochinesa, no Tibete, China, a 4 300 m de altitude. Este detector cobriu uma área de 6 700 m² com detectores do tipo RPC (*Resistive Plate Chamber*). Este detector tinha sensibilidade para chuveiros com energias de poucas centenas de GeV.

No presente está em construção, já em estágio avançado, o observatório LHAASO (DI SCIASCIO, 2016), a 4 410 m de altitude em Daocheng, na província de Sichuan, na China. Um dos componentes centrais deste detector é um tanque Cherenkov com área de 78 000 m² e profundidade de 4.4 m.

Outro detector de raios gama, o HAWC (*High Altitude Water Cherenkov*) foi construído por um consórcio americano-mexicano e está operando num platô a 4 100 m de altitude, vizinho ao pico Orizaba, localizado a cerca de 100 km a leste da cidade de Puebla, no México (MOSTAFÁ, 2014). O HAWC tem 300 tanques de Cherenkov, cada um com um diâmetro de 7.3 m e uma coluna de água de 4 m de altura (Figura 13).

4.2 CTA

Já foi mencionado neste texto o avanço na compreensão dos raios gama de altas energias – energias em excesso de 20 GeV – em tempos recentes, graças aos avanços tecnológicos, tanto nos experimentos estabelecidos em satélites, quantos os na superfície da Terra. Estes avanços resultaram numa enorme quantidade de descobertas de fontes de raios gama de energia muito altas, tanto na Via Láctea, na descoberta de novos objetos do tipo remanescentes de super-novas, pulsares, o buraco negro no centro da Galáxia, quanto de fontes extra-galácticas, como objetos da classe BL Lac.

O projeto mais avançado para a exploração de raios gama é o *Cherenkov Telescope Array* (CTA) que tem

 ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL



Figura 13: Sítio do HAWC (4 100 m) tendo ao fundo o Pico Orizaba (5 636 m), também conhecido como Citlaltépetl. Foto do autor.

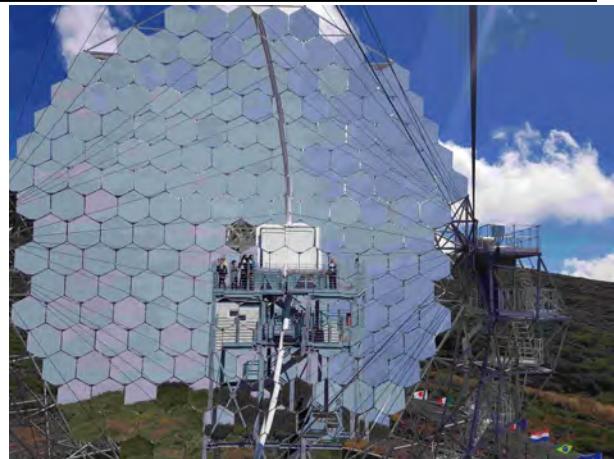


Figura 14: Primeiro telescópio do tipo LST instalado nas ilhas Canárias. Os suportes dos espelhos foram projetados no CBPF e construídos por empresas brasileiras. O autor é a figura à direita da câmera, no centro do espelho.

como objetivo instalar dezenas de telescópios tipo IACT no Chile, numa região próxima dos grandes telescópios ópticos europeus e nas ilha de La Palma, no conjunto das ilhas Canárias.

Os telescópios da CTA são divididos em três categorias, com o nome associado ao tamanho. São eles:

LST – O telescópio de grande porte (LST – do inglês *Large Size Telescope*) possui um espelho, com 23 metros de diâmetro. A superfície do espelho é composta por 198 segmentos hexagonais, medindo 1510 mm entre as bordas paralelas, com superfícies esféricas. Toda a estrutura é suportada por uma construção de fibra de carbono e aço, com um peso de 103 toneladas, que é capaz de movê-lo e apontar o telescópio para qualquer direção no céu em menos de 20 segundos.

A câmera do LST tem 1855 canais, cada um com alta eficiência quântica ($\sim 40\%$). O campo de visão total da câmera é de 4,5 graus e estima-se que a resolução angular seja da ordem de 0,05 graus no eixo. A sensibilidade destes telescópios visam cobrir a região de cerca de 20 GeV a 150 GeV. A previsão é construir 4 telescópios desta classe em cada Hemisfério.

MST – O telescópio de tamanho médio (MST – *Medium Size Telescope*) tem 12 metros de diâmetro, com um desenho do tipo Davies-Cotton (DAVIES; COTTON, 1957), usado originalmente para concentradores solares. O espelho é segmentado em pedaços de espelhos esféricos com comprimento focal de 16 m, campo de visão de $7 - 8^\circ$ e pixel

de 0.18° . O telescópio tem um foco pontual para raios que vêm paralelos ao eixo óptico, no entanto, a resolução degrada quando a direção vai se afastando do eixo. O domínio em energia desta classe de telescópios vai de 150 GeV até cerca de 5 TeV. A previsão atual é construir 15 telescópios destes no Hemisfério Norte e 25 no Sul.

SST – O telescópio de tamanho pequeno (SST – *Small Size Telescope*) é desenhado para medir os raios gama de energia mais alta, menos frequentes, consequentemente cobrindo uma área muito maior do sítio. Em princípio serão instalados sómente no sítio Sul, no Chile em grande número. A concepção atual preve cerca de 70 destes telescópios, extendendo sua sensibilidade em energia de 5 TeV até cerca de 300 TeVs. A versão final desta classe de telescópios ainda está na fase final de decisão, com três alternativas em consideração.

O programa científico do CTA cobre uma gama ampla de temas, que podem ser agrupadas em três grandes áreas:

Estudo da origem e natureza das partículas cósmicas reletivísticas – Como já foi visto na sessão 3.2 existem raios cósmicos que excedem energias da ordem de 100 EeV. No entanto, onde são acelerados, que mecanismo está associado à sua produção, são questões ainda em aberto, apesar do longo período que se segue à sua descoberta. Raios gama apontam para sua origem, de modo que a entrada em operação do CTA será uma ferramenta importante para desvendar este mistério.

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

Investigação dos ambientes extremos – Os raios gama podem ser ferramentas para testar os ambientes de grande densidade como o entorno de buracos negros ou estrelas de nêutrons e explorar os jatos relativísticos ou ventos associados ou mesmo as explosões, que emitem nesta região. Por outro lado, são ferramentas que permitem explorar os grandes vazios cósmicos inter-galácticos, testando os campos de radiação ou os magnéticos nestas regiões.

Exploração das fronteiras da Física – Raios gama podem também permitir o estudo de questões fundamentais da Física de hoje, como a natureza da matéria escura, examinar sua distribuição em associação com as estruturas do universo. O efeito dos campos gravitacionais na propagação dos gamas, medindo as consequências de explosões em galáxias distantes ao atravessar regiões de intenso campo gravitacional são, também parte dos temas que poderão ser examinados pelo CTA.

4.3 LATTES

O CTA representa a nova geração de observatórios de raios gama, porém sofrem de uma restrição na sua operação, pois só podem operar à noite. Por outro lado, apesar de ter um número significativo de telescópios em sua configuração, seu campo de visão também é limitado. No entanto, já foram medidos em raios gama de altas energias, transientes que tem curta duração, da ordem de minutos, ou apenas algumas horas. Os dois observatórios com esta capacidade, o HAWC e, futuramente o LHASSO, estão no Hemisfério Norte. A construção, no Hemisfério Sul, de um detector de raios gama sensível às altas energias, capaz de operar em tempo integral e com um amplo campo de visão tem um apelo óbvio, complementando o CTA. Ao longo dos últimos poucos anos duas propostas começaram a ser desenvolvidas, usando concepções técnicas distintas, a saber, fazer uma versão equivalente ao detector HAWC instalado no México e a segunda, desenvolvida por uma cooperação de grupos brasileiros, portugueses e italianos, a proposta LATTES, que descreveremos a seguir.

LATTES – acrônimo do *Large Array Telescope for Tracking Energetic Sources* – visa instalar um detector de partícula em altitudes da ordem 5 200 m acima do nível do mar, com sensibilidade a energias a partir de 100 GeV, de modo a conectar com as observações feitas por satélites. A proposta original (ASSIS et al., 2018), visava construir uma rede densa de detetores cobrindo uma área da ordem de 20 000 m², com um conjunto modular de detectores híbridos.

A unidade básica de LATTES tem um detector do tipo WCD (*Water Cherenkov Detector*), ou seja um recipiente com água para medir a radiação de Cheren-

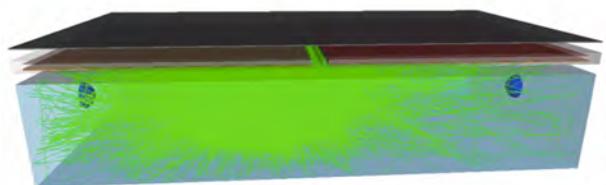


Figura 15: A unidade básica de LATTES (veja o texto).

kov, com a dimensão de $3 \times 1.5 \text{ m}^2$ tendo por cima dois detetores de baixo custo do tipo RPC (*Resistive Plate Chamber*), cobrindo uma área de $1.5 \times 1.5 \text{ m}^2$. Cada RPC está configurada com 16 regiões independentes para coleta de sinal. Para aumentar a eficiência em coletar partículas, as RPCs são cobertas com uma placa de chumbo, com espessura de 5.6 mm, para converter gamas secundários em pares elétron-pósitrons.

As RPCs têm excelente resolução temporal e sua segmentação espacial são elementos essenciais na reconstrução da direção de origem do chuveiro (ver Figura 16), enquanto que os elementos WCD fazem o papel de calorímetros para a reconstrução da energia do chuveiro.

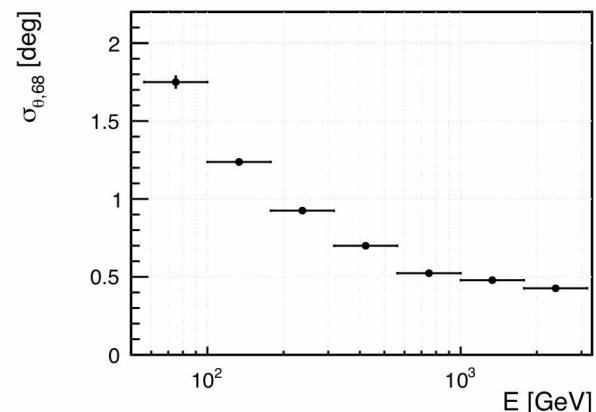


Figura 16: Resolução angular para raios gama primários com ângulo zenital de 10°, como função da energia.

O principal desafio na identificação de um chuveiro provocado por um raios gama é separá-lo de raios cósmicos mais comuns. A principal diferença está nos mísions, presentes nos raios cósmicos e só muito raramente nos raios gama. Uma das características de raios cósmicos é que uma substancial parte de sua energia desaparece, carregada por neutrinos ou então por mísions que carregam muita energia, mas do ponto de vista do detector de partículas aparece como um sinal simples. Porém, como o chuveiro de um raio cósmico tem ener-

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

gia muito maior, também tem uma área de impacto no solo mais extensa. Por outro lado, raios gama que vêm de uma fonte transiente (que dura pouco tempo) irão se acumular numa dada direção, em contraste com raios cósmicos cuja direção é desfeita pelos campos magnéticos galácticos e intra-galácticos.

Os principais focos de atenção de um observatório do tipo LATTEs é monitorar fontes transientes, como a PKS 2155-304 observada pelo experimento HESS, que emite raios gamas com energias excedendo 200 GeV, por períodos de pouco mais de uma hora (ver figura 17).

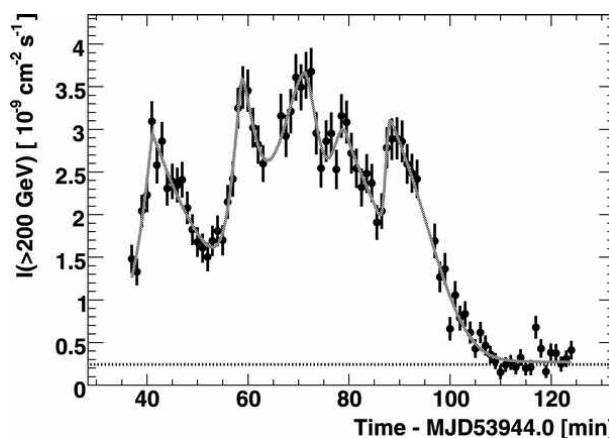


Figura 17: Transiente observado pelo H.E.S.S., mostrando o fluxo acima de 200 GeV em função do tempo. (AHARONIAN; AKHPERJANIAN et al., 2007)

Outras motivações são monitorar o centro da nossa galáxia, para eventos que emitam raios gama acima de 100 GeV e, monitorar a presença de explosões de raios gama (GRB – *Gamma Ray Bursts*) com energias altíssimas.

Há uma outra iniciativa para construir uma laboratório desta natureza, associada aos colaboradores do HAWC. Recentemente, houve um acordo entre os dois grupos em unificar esforços e desenvolver um programa de pesquisas e desenvolvimento, para escolher a melhor tecnologia para um observatório de tal natureza.

O esforço conjunto irá também estudar e escolher o melhor sítio, com altitude por volta de 5 000 m, com uma área razoavelmente plana da ordem de 100 000 m² para este experimento. Potenciais sítios estão localizados na Argentina, Chile e Peru.

5 CONCLUSÕES

O estudo da Física das Astropartículas tem na América do Sul uma pléthora de laboratórios, em operação ou em planejamento, que faz deste continente um lugar particularmente atraente para os cientistas que trabalham

nesta área. O Observatório Pierre Auger já está em tomado dados há mais de quinze anos, apresentando resultados muito interessantes sobre os raios cósmicos com energias acima de 10^{18} eV, tendo clarificado a origem extra-galáctica dos raios de energia mais alta. Por outro lado, extrapola os dados de colisões hadrônicas a energias fora do alcance dos aceleradores. Míriades de outros resultados, não apresentados neste trabalho, tem iluminado a física dos raios cósmicos de altíssimas energias. No momento este observatório está instalando novos detetores para melhorar sua capacidade de discriminar a composição química dos componentes primários dos raios cósmicos. O observatório está programado para coletar dados pelo menos até o ano de 2025.

Para o futuro, entre os vários projetos projetados para coletar dados na América do Sul, discutimos dois, o *Cherenkov Telescope Array* (CTA) e o *Large Array Telescope for Tracking Energetic Sources* (LATTEs), ambos focalizados no estudo de raios gama. São projetos complementares, pois enquanto o CTA é formado por uma coleção de telescópios de alta precisão, tanto na determinação da energia e direção da fonte dos raios gama, mas tem limitações intrínsecas no seu modo de operação (só pode operar em períodos noturnos), o LATTEs é um observatório que opera dia e noite, porém com limitações na resolução em energia e em direção.

Este é um ótimo período para cientistas, engenheiros e técnicos brasileiros atuarem nestes temas, pois tem a chance de terem grande protagonismo na execução destes projetos.

REFERÊNCIAS

- AAB, A. et al. The Pierre Auger cosmic ray Observatory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A798, p. 172–213, 2015.
- _____. The Pierre Auger Observatory Upgrade - Preliminary Design Report. 2016.
- _____. Observation of a large-scale anisotropy in the arrival directions of cosmic rays above 8×10^{18} ev. *Science*, v. 357, n. 6537, p. 1266–1270, 2017.
- ABRAHAM, J. et al. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A523, p. 50–95, 2004.
- _____. The Fluorescence Detector of the Pierre Auger Observatory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A620, p. 227–251, 2010.

ASTROPARTÍCULAS NA AMÉRICA DO SUL

-
- _____. Trigger and aperture of the Surface Detector array of the Pierre Auger Observatory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A613, p. 29–39, 2010.
- ABREU, P. et al. Measurement of the proton-air cross-section at $\sqrt{s} = 57$ TeV with the Pierre Auger Observatory. *Phys. Rev. Lett.*, v. 109, p. 062002, 2012.
- AGUILAR, M. et al. Antiproton Flux, Antiproton-to-Proton Flux Ratio, and Properties of Elementary Particle Fluxes in Primary Cosmic Rays Measured with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station. *Phys. Rev. Lett.*, v. 117, n. 9, p. 091103, 2016.
- AHARONIAN, F.; AKHPERJANIAN, A. G. et al. An Exceptional Very High Energy Gamma-Ray Flare of PKS 2155-304. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 664, n. 2, p. L71–L74, jul 2007. Disponível em: <<https://doi.org/10.1086%2F520635>>.
- AHARONIAN, F. et al. Observations of the Crab Nebula with H.E.S.S. *Astron. Astrophys.*, v. 457, p. 899–915, 2006.
- ALLEKOTTE, I. et al. The Surface Detector System of the Pierre Auger Observatory. *Nucl. Instrum. Meth.*, A586, p. 409–420, 2008.
- ASSIS, P. et al. Design and expected performance of a novel hybrid detector for very-high-energy gamma-ray astrophysics. *Astropart. Phys.*, v. 99, p. 34–42, 2018.
- ATWOOD, W. B. et al. The Large Area Telescope on the Fermi Gamma-Ray Space Telescope Mission. *Astrophys. J.*, v. 697, p. 1071–1102, jun. 2009.
- CARMONA, E. et al. Performance of the MAGIC Stereo System. *ArXiv e-prints*, out. 2011.
- DAVIES, J. M.; COTTON, E. S. Design of the quartermaster solar furnace. *Solar Energy*, v. 1, n. 2, p. 16 – 22, 1957. ISSN 0038-092X. The Proceedings of the Solar Furnace Symposium. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X57901160>>.
- DE ANGELIS, A.; Galanti, G.; Roncadelli, M. Transparency of the Universe to gamma rays. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, v. 432, p. 3245–3249, 2013.
- DE NAUROIS, M.; MAZIN, D. Ground-based detectors in very-high-energy gamma-ray Astronomy. *Comptes Rendus Physique*, v. 16, p. 610–627, 2015.
- DI SCIASCIO, G. The LHAASO experiment: from Gamma-Ray Astronomy to Cosmic Rays. *Nucl. Part. Phys. Proc.*, v. 279-281, p. 166–173, 2016.
- FENU, F. The cosmic ray energy spectrum measured using the Pierre Auger Observatory. *Proc. of Science (ICRC2017)*, ICRC2017, p. 486, 2017.
- FUNK, S. Ground and Space Based Gamma-Ray Astronomy. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, v. 65, p. 245–277, 2015.
- GREISEN, K. The extensive air shower showers. *Prog. Cosmic Ray Physics*, v. 3, p. 1, 1956.
- HILLAS, A. M. *Cosmic Rays*. [S.I.]: Pergamon Press, 1972. ISBN 0-08-016724-1.
- HOLDER, J. VERITAS: HAWC's neighbour to the North. In: . [s.n.], 2015. Disponível em: <<https://inspirehep.net/record/1386833/files/arXiv:1508.01401.pdf>>.
- KAMATA, K.; NISHIMURA, J. The lateral and the angular structure functions of electron showers. *Prog. Theor. Phys. Supp.*, v. 6, p. 93–155, 1958.
- MOSTAFÁ, M. A. The High Altitude Water Cherenkov Observatory. *Braz. J. Phys.*, v. 44, p. 571–580, 2014.
- TAVANI, M. et al. The AGILE Mission. *Astron. Astrophys.*, v. 502, p. 995–1013, 2009.
- THOMPSON, D. J. Space detectors for gamma rays (100 MeV – 100 GeV): From egret to fermi lat. *Comptes Rendus Physique*, v. 16, p. 600–609, 2015.
- UNGER, F. Highlights from the Pierre Auger Observatory. *Proc. of Science (ICRC2017)*, ICRC2017, p. 1102, 2017.
- VIEIRA, C. *Um mundo inteiramente novo se revelou: uma história da técnica das emulsões nucleares*. Livraria da Física, 2012. (Coleção tópicos em física). ISBN 9788578611415. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=GXP0jwEACAAJ>>.