
MULTI-MENSAGEIROS CÓSMICOS E SUAS MENSAGENS NA FÍSICA DE ASTROPARTÍCULAS

AS ASTROCIENTISTAS

 **Angela V. Olinto**

Department of Astronomy & Astrophysics,
KICP, EFI, The University of Chicago
IL 60637, USA

RESUMO

Este texto foi gerado¹ a partir da transcrição das principais partes do seminário da Prof. Dr. Angela Olinto na conferência *As Astrocientistas: I Encontro Brasileiro de Meninas e Mulheres da Astrofísica, Cosmologia e Gravitação*, proferida virtualmente no dia 10/02/2021. A Prof. Dr. Angela Olinto é bacharel em física pela PUC-RJ, doutora em física pelo Instituto de Tecnologia de Massachussets (MIT) e fez estágio de pós-doutorado no grupo de astrofísica estelar do Fermilab. Ela se tornou a primeira professora do Departamento de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Chicago, no qual posteriormente se tornou diretora. Nesta palestra, ela nos conta um pouco mais sobre seu trabalho.

Palavras-chave Astrofísica, multi-mensageiros, neutrinos, raios cósmicos ultra-energéticos

1 Introdução

A astronomia consiste em observar o universo numa tentativa de aprender mais sobre o lugar em que habitamos. O meio mais comum para fazermos isso é através da captação da luz que chega até nós – o fóton continua a ser a partícula favorita dos astrônomos, proporcionando uma forma mais evidente de conhecermos o Universo. Porém, há outras formas de fazermos astronomia. Por exemplo, raios cósmicos, neutrinos e ondas gravitacionais estão adicionando outros elementos que não teríamos conhecido se somente os fótons fossem analisados. Na física de astropartículas, usamos outras partículas como mensageiros do que está acontecendo no Universo no lugar de fótons. Este é o tópico que apresento aqui. Eu lidero colaborações internacionais, EUSO-SPB₁, EUSO-SPB₂ e POEMMA, compostas de muitas pessoas em vários países diferentes trabalhando para que possamos, no futuro, analisar multi-mensageiros com neutrinos e com raios cósmicos super-energéticos para desvendar alguns mistérios do Universo. O objetivo é buscar informações mais sofisticadas desses outros mensageiros (as outras partículas), para enfim podermos entender o que acontece no Universo de uma forma mais completa.

Para isto, é preciso entender, por exemplo, quais são as fontes misteriosas destas partículas mensageiras, os raios cósmicos ultra-energéticos (UHECRs), e dos neutrinos cósmicos energéticos. Estes últimos são partículas descobertas recentemente, em particular através de observações do IceCube, detector localizado no polo sul. Um dos objetivos dos projetos em que estou envolvida é entender qual seria a origem desses neutrinos, buscando por energias ainda mais altas em comparação com as observações do IceCube, acima de 10^{16} eV. Tentativas para encontrar as fontes dos UHECRs incluem obter medidas mais precisas do espectro de energia com a composição deste tipo de raios cósmicos (acima de 10^{19} eV) e também procurar anisotropias no céu na frequência desta distribuição de partículas. Para detectar as fontes dos neutrinos cósmicos energéticos, precisamos observar a coincidência deles (neutrinos de energia acima de 10^{16} eV) com outros multi-mensageiros, ou seja, raios gama e ondas gravitacionais, usando observatórios espaciais.

Uma outra pergunta que sempre me interessou, desde o início do meu doutorado e por toda minha carreira, é sobre como podemos entender a natureza usando essas partículas de energias extremas. O que aprendemos sobre modelo padrão vem de experimentos em aceleradores de partículas, como o LHC. Essa limitação pode esconder uma nova física e responder algumas questões que ainda estão em aberto, como, por exemplo, a possibilidade da matéria escura ser supermassiva, a existência de

¹Transcrito por Rodrigo von Marttens, editado por Carla Rodrigues Almeida.

dimensões extras, ou de defeitos topológicos. Essas são perguntas particulares da física de partículas que talvez o Universo como laboratório possa nos ajudar a responder.

A astronomia moderna começou observando-se a luz emitida ou refletida de astros celestes através de instrumentos óticos, desde dos tempos que Galileu Galilei apontou uma luneta para o céu. Há mais ou menos dois séculos atrás, ampliamos o espectro de energia para incluir o infravermelho e, posteriormente, as baixas freqüências de rádio. A descoberta dos raios cósmicos em 1912 por Victor Hess adicionou mais uma ferramenta para a investigação astronômica. Sua descoberta foi feita através de uma missão sub-orbital. Com o auxílio de balões, Victor Hess mostrou que a radiação aumenta em camadas mais externas da atmosfera, ou seja, a radiação está vindo de fora da Terra e não de sua superfície. Basicamente, esta é a origem do estudo da física de raios cósmicos.

Uma abordagem semelhante, com uso de balões, também será utilizada nos projetos mencionados anteriormente para o estudo de partículas com energia bem mais altas do que aquelas estudadas por Victor Hess. Ao considerarmos raios cósmicos e ondas gravitacionais, devemos triplicar o intervalo de ordem de grandeza em termos energéticos, pois ondas gravitacionais são mais longas em comprimento do que as ondas de rádio, enquanto que os raios cósmicos, raios gama e os neutrinos possuem energias bem maiores do que um átomo, ou mesmo de um núcleo atômico. É como se a quantidade de cores (energia) que podemos observar o Universo tivesse aumentado três vezes, ou seja, uma diferença total de 40 ordens de grandeza. Se torna, então, evidente que expandir o espectro de energia pode nos ajudar a descobrir coisas que não seria possível entender se fosse observada em apenas uma cor. É o que nos motiva a expandir a análise para raios cósmicos num extremo de energia, enquanto outros grupos trabalham com o extremo oposto das ondas gravitacionais. São ambas pesquisas promissoras sendo exploradas recentemente.

2 Raios cósmicos

Raios cósmicos são formados por partículas de altas energias vindas do espaço com uma velocidade próxima a da luz. Vários experimentos e observações indicam que o espectro de energia dos raios cósmicos são bem diferentes de outros tipos de emissões (Fig. I) e que este espectro é bem modelado por uma lei de potência de exponente $-2,7$ (quadro da esquerda, Fig. I). Embora o espectro pareça uma linha suave com contornos levemente mais marcados nos extremos do intervalo considerado, um comportamento simples se comparado a qualquer espectro ótico, o espectro de raios cósmicos possui muitas estruturas e fenômenos físicos diferentes associados.

Por exemplo, em baixas energias, os raios cósmicos são fortemente influenciados pelos campos magnéticos do sistema solar. A estrutura que se observa pode nos indicar o que está acontencendo na nossa vizinhança. Em escalas de energia intermediárias, estuda-se os raios cósmicos da nossa galáxia, a dinâmica de como os campos magnéticos os afetam e os espalham pela Via Láctea. As detecções de altas energias sabemos se tratar de raios cósmicos de origem extragalática, embora o limite de energia que separa estes dos raios galáticos não seja clara. Essas escalas de energia são mostradas no quadro central da Fig. I. Em termos de observações, para energias baixas, existem experimentos espaciais que detectam diretamente os raios cósmicos, enquanto para altas energias, estas detecções são feitas de forma indireta através de experimentos em solo. Um dos nossos interesses é desenvolver experimentos espaciais para detectar raios cósmicos com energia da ordem de 10^{20} eV.

As escalas de energia ideias para experimentos espaciais e em solo são mostradas no quadro direito da Fig. I.

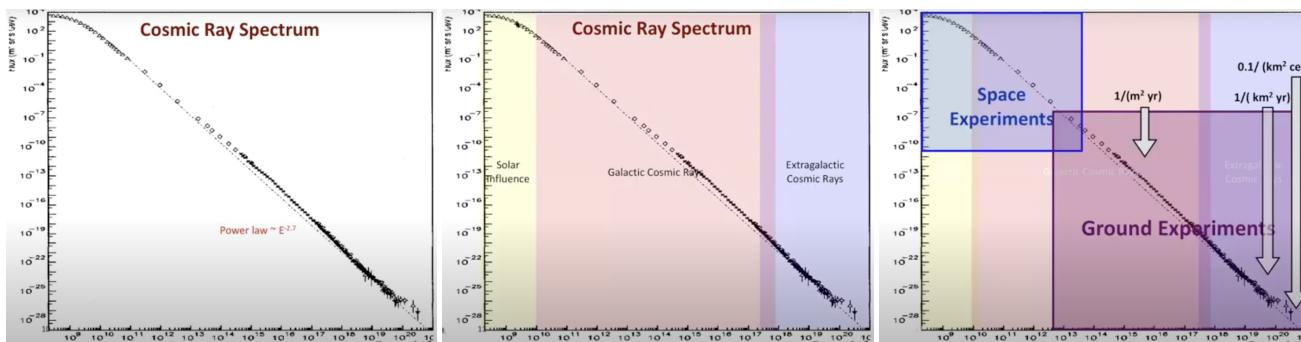


Figura 1: Espectro dos raios cósmicos. À esquerda, é possível ver que o espectro pode ser descrito por uma lei de potência. No centro, é possível ver os diferentes fenômenos físicos que estão relacionados com este espectro. O quadro direito apresenta as escalas de energias ideais para experimentos espaciais e em solo.

3 Chuveiros de ar extensivos

Por causa da lei de potência indicada na Fig. 1, se torna muito difícil detectar partículas se o fluxo é de 0,1 partículas por quilômetro quadrado por século, que é o caso dos raios cósmicos de altas energias. Por isso, essas detecções são feitas através de um fenômeno chamado de chuveiros de ar extensivos, uma cascata quilométrica de partículas ionizadas e radiação eletromagnética produzida durante a entrada de um raio cósmico na atmosfera. Um dos pioneiros no estudo destes chuveiros de ar foi Pierre Auger, um dos líderes na criação do CERN.

Um chuveiro de ar é iniciado por uma partícula cuja energia é tão alta que a interação dela com a atmosfera terrestre gera inúmeras outras partículas em seu caminho até o solo.² No caso de partículas energéticas que incidem na nossa atmosfera, é possível observar um efeito de fluorescência causado pelas partículas eletromagnéticas do chuveiro que excitam o nitrogênio, que por sua vez emite uma radiação no ultravioleta. Este efeito possui um pico a uma certa altitude, onde o número de partículas geradas é máximo. No solo, podemos detectar diretamente esses chuveiros através de grandes detectores. O número de partículas é máximo no centro do chuveiro, e vai decaindo com a distância. Para partículas a 10^{14} eV, a escala é aproximadamente um quilômetro. Quando esta chega a 10^{20} eV, a escala é 10km. Por isso, é realmente necessário utilizar vários detectores, tanto para captar uma dessas partículas quanto para medir vários pedaços do próprio chuveiro.

A Fig. 2 mostra de forma gráfica o esquema de um chuveiro de ar extensivo. Nela, podemos ver a emissão isotrópica de radiação ultra-violeta através da excitação do nitrogênio. Há ainda um outro tipo de emissão que também é detectada – usando raios gamma, por exemplo – que é a emissão de Cherenkov. Esta consiste numa emissão bem focada na região central no sentido do raio cósmico. Como esta possui um fluxo baixo, a tarefa de captar esta emissão é muito mais árdua, já que é necessário que o detector esteja exatamente embaixo do chuveiro. A emissão de Cherenkov é particularmente interessante para os projetos EUSO-SPB₂ e POEMMA. No entanto, nesses projetos, a emissão de Cherenkov é observada de outra perspectiva: ao invés de observarmos embaixo do chuveiro, observamos os chuveiros que se desenvolvem para cima, o que só ocorre com neutrinos. Os raios cósmicos ultra-energéticos estão sempre descendo em direção ao solo, enquanto os neutrinos podem atravessar a Terra e sair do outro lado. Então, se um chuveiro é observado subindo, ele deve ser gerado por um neutrino. Os projetos EUSO-SPB₂ e POEMMA pretendem observar tanto a fluorescência quanto a emissão de Cherenkov.

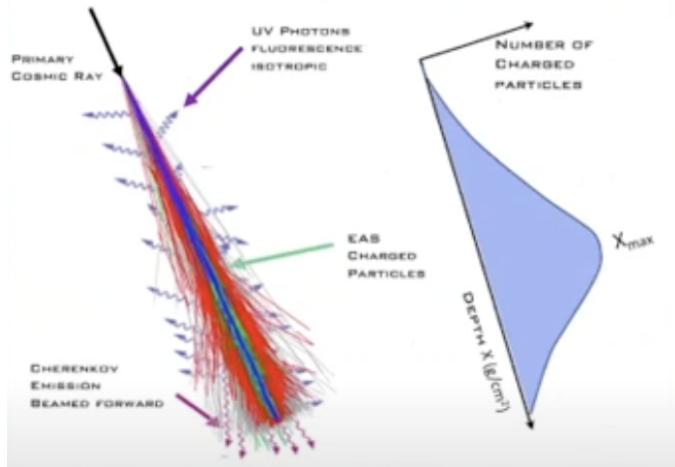


Figura 2: Esquema gráfico de um chuveiro de ar extensivo.

Os dois maiores observatórios de raios cósmicos ultra-energéticos são o Observatório Pierre Auger, localizado em Mendoza, Argentina, e o Telescópio Array, que está localizado em Utah, nos Estados Unidos. No Observatório Auger, há quatro telescópios de fluorescência que observam chuveiros na própria atmosfera e 3.000 km² de uma rede detectores que observa as partículas quando elas chegam ao solo.³ As medições feitas pelos 1.660 detectores nas Pampas Amarillas, em Mendoza está em vermelho na Fig. 3. O benefício de termos tantos detectores lá se mostra nas baixas barras de erros e na detecção de muitas estruturas no final do espectro de raios cósmicos, em energia por volta de 10^{18} eV, 10^{19} eV e 10^{20} eV. O Observatório Pierre Auger consegue, na verdade, detectar partículas de até quase 10^{17} eV. A dificuldade para obter medidas em escala maior de energia decorre do baixíssimo fluxo destas partículas, evidenciando o grande esforço de colaboração internacional para obtermos este tipo de detecção.

²Uma vídeo-simulação deste fenômeno para a entrada de um próton de 10^{14} eV na atmosfera pode ser encontrada aos 12min15s da gravação da palestra da Prof.ª Angela Olinto, disponível no Youtube no canal CosmoUFES.

³Um vídeo ilustrando o funcionamento do Observatório Pierre Auger pode ser encontrado aos 17min01s da gravação da palestra da Prof.ª Angela Olinto, disponível no Youtube no canal CosmoUFES.

Na mesma figura são apresentadas em cinza as medidas obtidas pelo Telescópio Array – um telescópio menor. Podemos ver que as medidas obtidas com os dois telescópios não necessariamente concordam entre si, pois é possível que o hemisfério norte tenha um fluxo diferente do hemisfério sul. Uma possibilidade é que esta diferença possa ser uma indicação da distribuição das fontes, que são desconhecidas (embora haja algumas dicas).

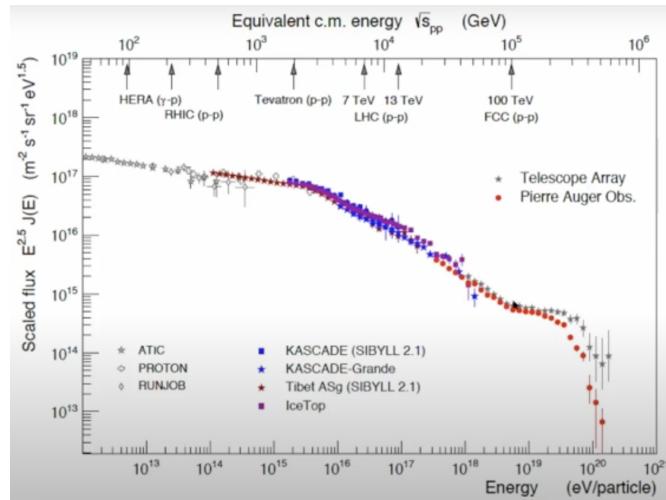


Figura 3: Espectro de raios cósmicos com dados observacionais.

Uma outra informação obtida das medições do Observatório Pierre Auger é que o espectro a partir de 10^{19} eV é necessariamente extragalático. É possível que energias menores que esta também sejam de origem extragalática e há cada vez mais evidências indicando ser o caso, mas não se sabe exatamente qual o limite de energia entre raios cósmicos provindos de dentro da galáxia ou fora dela. Essa incerteza ocorre por causa da distribuição de raios cósmicos no céu. Podemos ver na segunda imagem da Fig. 4 que a distribuição de raios cósmicos mostra um dipolo que não tem correlação com a distribuição da galáxia, apontando para longe do centro desta. Por outro lado, a mesma distribuição possui correlação com a distribuição extragalática.

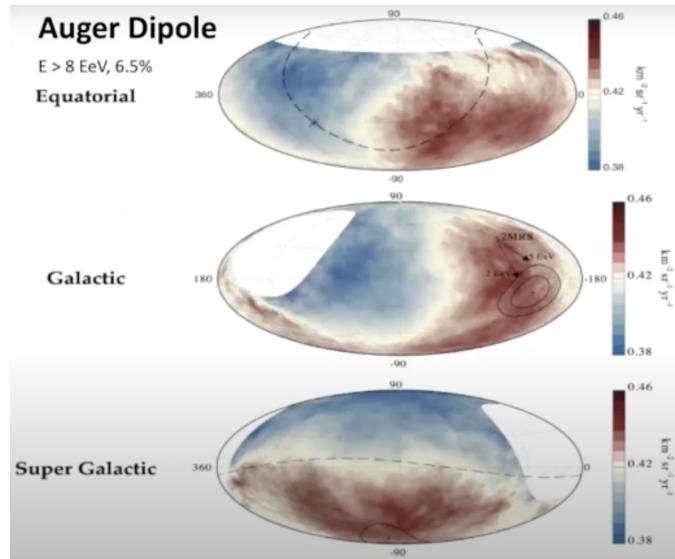


Figura 4: Distribuição angular de raios cósmicos ultra-energéticos.

A física da propagação dos raios cósmicos, meu objeto de estudo por muito tempo, é bastante interessante. Quando consideramos energias mais altas, os raios cósmicos se desviam menos por causa dos campos magnéticos. Ou seja, dado um campo magnético na galáxia ou no espaço extragalático, partículas mais energéticas seguem trajetórias mais retilíneas, assumindo-se que ela seja a mesma partícula. O problema é que, também para altas energias, os pótions originais do raio cósmico vão ficando mais pesados, modificando o tipo de partícula que observamos. Isso significa que a estrutura nessa região de energia é muito dinâmica,

com várias componentes e mudanças, tanto na parte da energia e rigidez das partículas, como também do tipo de partícula que é observada. É um assunto muito interessante, que não terei tempo de comentar aqui. Gostaria de apresentar um pouco dos projetos em que trabalho hoje.

A Fig 5 mostra uma distribuição em energias maiores, $E > 32\text{EeV}$. Com estas, podemos, a princípio, encontrar anisotropias no céu que indiquem as fontes das partículas. Um dos problemas que enfrentamos é que nestas energias o fluxo é muito baixo, o que gera barras de erros maiores. É difícil fazermos estatísticas nessa região. Por isso, queremos lançar uma missão espacial para fazermos medições em regiões de energia da ordem de 10^{20}eV , aumentando o número de observações em altíssimas energias para captar mais dados e tornar este tipo de mapa da Fig 5 mais nítido.

Com as informações que temos hoje, especulamos que estas fontes estejam relacionadas com galáxias StarBurst (SBG) ou com galáxias ativas (AGN), com dados obtidos em 2019 dando uma vantagem aparente para as SBG. Ambos os tipos de galáxia têm muita atividade, sendo que nas AGNs a atividade é dominada pelo buraco negro central, enquanto que nas SBG a atividade é dominada por formação estelar, que faz com que elas tenham uma bolha de emissão mais forte do que galáxias que não têm StarBurst. Esta é uma discussão atual, mas, como mencionado antes, o problema é que a estatística fica muito limitada. Para tentar solucionar este impasse, precisamos de mais detectores em solo numa região ainda maior do que no Observatório Auger, que já é gigantesco, ou podemos lançar uma missão espacial para olhar para nossa atmosfera.

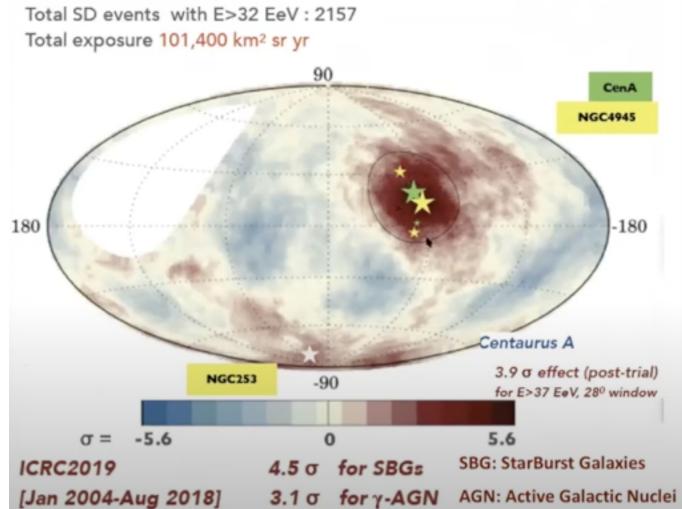


Figura 5: Anisotropias na distribuição de raios cósmicos com energias maiores que 32 EeV.

Outra discussão interessante diz respeito a essa curva no espectro em altas energias. Seria esta a energia máxima das fontes, um efeito de propagação, ou os dois? O efeito de propagação é denominado efeito Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK), que foi descrito pelo americano Kenneth Greisen e, independentemente, pelos soviéticos Georgiy Zatsepin e Vadim Kuzmin, durante a década de sessenta, após a descoberta do fundo de micro-ondas. Segundo o efeito GZK, o limite máximo de 10^{20}eV para os raios cósmicos é devido a interação destes com a radiação cósmica de fundo, o que os fazem perder energia de forma radical. Então, para medições no espectro de energia entre 10^{19}eV e 10^{21}eV , não apenas temos uma mudança no tipo de partículas, mas elas apontam cada vez para as suas fontes, ou seja, melhora-se a possibilidade de fazer astronomia com o estudo das partículas. Mas, ao mesmo tempo, a quantidade de fontes diminuem em número.

Este fato pode ser observado na Fig 6. A linha azul representa o tamanho do Universo e as linhas pretas representam a perda de energia da interação dos prótons com o fundo de micro-ondas. Um efeito similar acontece com o Hélio, Oxigênio e o Ferro, que são outras partículas utilizadas para a análise dos raios cósmicos. Quando a energia chega na ordem de 10^{18}eV , pode-se observar fontes que estão bem próximas a nós e por todo Universo visível. Porém, quando aumentamos a energia, a perda de energia por produção de pares e píons faz com que as linhas pretas caiam de forma mais íngreme, de modo que só temos acesso às fontes bem próximas. Por um lado, este é um fator negativo porque diminui nossa capacidade de fazer astronomia, mas, ao mesmo tempo, é positivo porque há poucas fontes contribuindo, o que torna o espectro do hemisfério norte um pouco diferente do espectro do hemisfério sul.

Porém, essa perda de energia dos raios cósmicos durante a interação com a radiação cósmica de fundo gera neutrinos e raios gama:

$$\pi + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow p + \pi^0 \rightarrow \gamma\gamma, \quad (1)$$

$$\pi + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow n + \pi^+ \rightarrow \gamma\gamma, \quad (2)$$

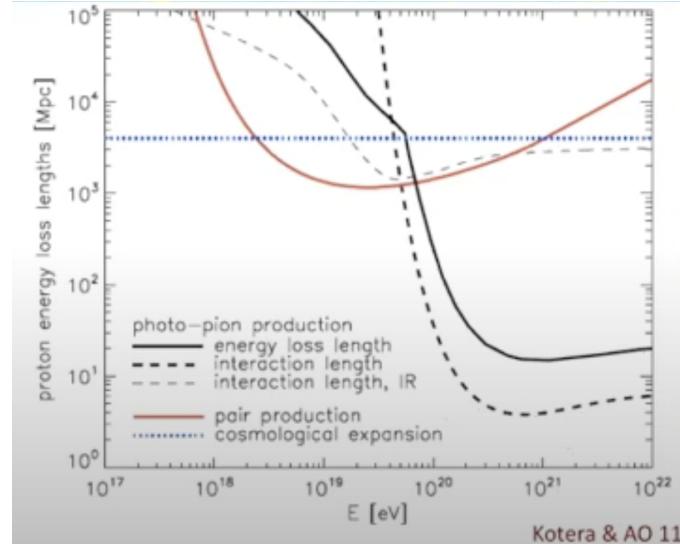


Figura 6: Escala de perda de energia do próton em função da energia dos raios cósmicos.

$$n \rightarrow p + e^- + \nu_e, \quad (3)$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad (4)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \nu_\mu. \quad (5)$$

Portanto, podemos no futuro observar mais neutrinos e mais raios gama dessa propagação dos raios cósmicos. A ideia de usar multi-mensageiros se torna mais forte por causa desse tipo de interação.

4 Neutrinos

Neste contexto aparecem os neutrinos, partículas do modelo padrão com grande valor para os atrofísicos. São partículas que carregam evidências de reações muito energéticas no Universo e que se propagam mais livremente que os fótons, pois elas quase não interagem. Um fator positivo de considerar neutrinos como multi-mensageiros, então, é que eles podem nos dar indicações sobre todo o Universo. O problema se torna detectá-los. Como dissemos, o fato deles não interagirem torna difícil captá-los quando eles chegam ao solo.

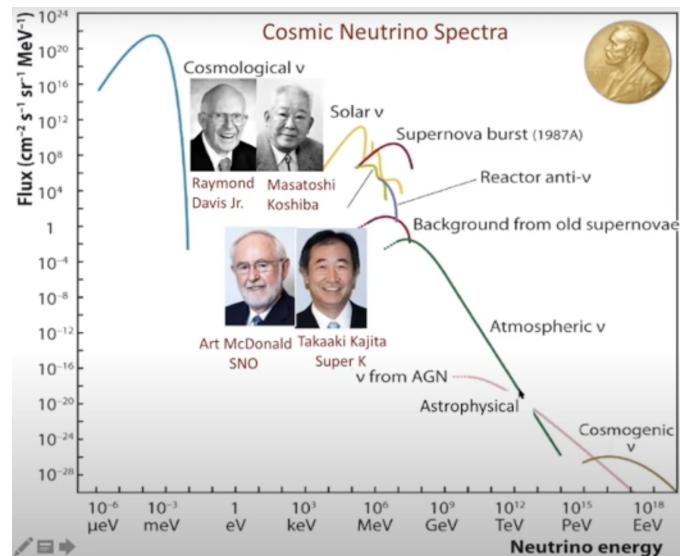


Figura 7: Escala de fluxo para diferentes tipos de neutrinos.

A Fig 7 mostra um esquema com observações relacionadas com neutrinos. O espectro de neutrinos cosmológicos seria tipo um fundo de neutrinos, tal qual o fundo de microondas da radiação cósmica de fundo. É composto de neutrinos solares – cuja detecção rendeu o prêmio Nobel de Física para Raymond Davis Jr. e Masatoshi Koshiba em 2002, os neutrinos da Supernova 1987A, que foi uma emissão temporária muito forte –, os neutrinos astrosféricos, que estão sendo detectados pelo IceCube, e os neutrinos cosmogênicos, resultantes da interação com o fundo de micro-ondas. Os neutrinos astrosféricos são importantes pois, além de seu fluxo representar uma nova medida no Universo, dominando sobre os neutrinos atmosféricos, eles também podem ser estudados como partículas multi-mensageiras. Por exemplo, no caso TXS0506+056 há a coincidência de raios gamma e neutrinos em emissão de blazares, um dos fenômenos mais importantes em astronomia extragalática. Portanto, eles estão sendo detectados tanto em raios gama quanto em neutrinos, numa investigação física feita a partir de multi-mensageiros.

Será muito difícil detectar neutrinos cosmogênicos, pois a composição dos raios cósmicos ultra-energéticos mostra que eles não são provenientes apenas de prótons. Na Fig 8 os pontos azuis indicam dados de raios gama (fótons) enquanto a região azul é o fundo cosmogênico de fótons; a região amarela mostra o fluxo cosmogênico de neutrinos, que é mais baixo do que os primeiros cálculos que guiaram observações do IceCube, e os pontos amarelos são os dados de neutrinos astrosféricos detectados pelo IceCube; finalmente, os pontos pretos são observações dos raios cósmicos. A ideia é que todos são conectados: os raios cósmicos produzem os neutrinos cosmogênicos e os fótons cosmogênicos, o que conecta esses mensageiros. Isto é, se pudermos observar uma fonte de raios cósmicos, esta terá efeitos tanto nos neutrinos quanto nos fótons cosmogênicos. Uma outra meta é tentar entender qual a fonte dos neutrinos astrosféricos (pontos amarelos) detectados pelo IceCube e dos fótons (pontos azuis).

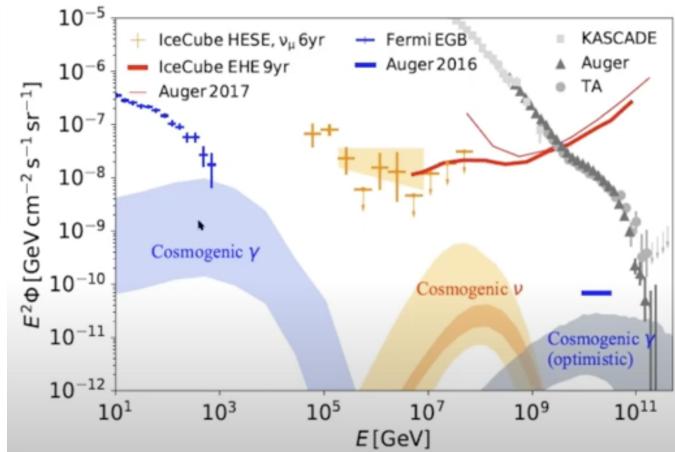


Figura 8: Fluxo de partículas em termos da energia. Os pontos representam dados observacionais e as regiões sombreadas representam as previsões para partículas cosmogênicas.

5 Projetos e Colaborações

Voltando à pergunta inicial, qual o objetivo dos projetos em que trabalho? Queremos medir o espectro, a composição e as anisotropias acima de 10^{19} eV. Queremos também observar coincidências com multi-mensageiros para energias acima de 10^{16} eV. Com isto em mente, vou apresentar um pouco mais sobre o projeto POEMMA e sobre o Programa JEM-EUSO, dos quais eu faço parte.

5.1 POEMMA

POEMMA é um acrônimo para o título em inglês *Probe Of Extreme Multi-Messenger Astrophysics*, que significa “Sonda de multimensageiros astrosféricos extremos”, um projeto que está atualmente sendo elaborado para o lançamento de uma sonda para monitoramento da nossa atmosfera. A similaridade da sigla POEMMA com a palavra ‘poema’ em português não é coincidência, eu vi a oportunidade e sugeri desta forma. A equipe que contribuiu com o projeto é composta de mais de 70 cientistas, 32 instituições 13 países e pessoas dos grupos: OWL, JEM-EUSO, Auger, Telescope Array, Veritas, CTA, Fermi e teoria. A ideia é simples, utilizar instrumentos que já temos no Auger, como o telescópio de fluorescência, e mandar para o céu para olharmos a atmosfera de cima para baixo, ao invés de olharmos do solo. Desta forma, aumentamos o volume da atmosfera que podemos monitorar, usando dois telescópios no estudo de raios cósmicos ultra-energéticos, um em solo e outro no céu, para fazermos a detecção do mesmo chuviceiro, mas de pontos de vista diferentes. Além disso, teríamos a possibilidade de observar os chuviceiros que se formam de baixo para cima pelos neutrinos que atravessam a Terra.

Um observatório no solo precisaria cobrir uma área circular de raio entre 200km e 400km, que compreenderia aproximadamente as cidades de Belo Horizonte, São Paulo e Rio de Janeiro, para obter um resultado similar ao que o POEMMA poderia alcançar. Além da dificuldade financeira, há a dificuldade de logística em dispor de uma área tão grande para instalar detectores. Além disso, com o POEMMA poderíamos apontar o telescópio para ângulos diferentes, olhando, por exemplo para o horizonte para detectarmos neutrinos de energias mais baixas que aparecem nessa região. Dessa maneira, poderíamos observar neutrinos em diferentes intervalos de energias e de ângulos.

A nossa equipe recebeu financiamento para trabalharmos duas semanas na NASA para desenvolvermos o projeto do telescópio e decidir qual seria o foguete da missão. A nossa proposta inicial era para utilizarmos dois foguetes, que seriam ligados uma ao outro por um dispositivo que se parece com um acordeon e, quando chegassem no espaço, se estenderia. Fizemos uma análise minuciosa do tamanho, orçamento, propriedades térmicas, início e término dos esforços. A maior parte da equipe que foi para esta reunião na NASA é formada por engenheiros, com alguns físicos e outros cientistas que se juntaram. Nós, físicos, expomos a nossa visão para o projeto e os engenheiros ajustam os detalhes de forma a tornar a proposta mais realista, também nos dando uma estimativa de tempo e custo.

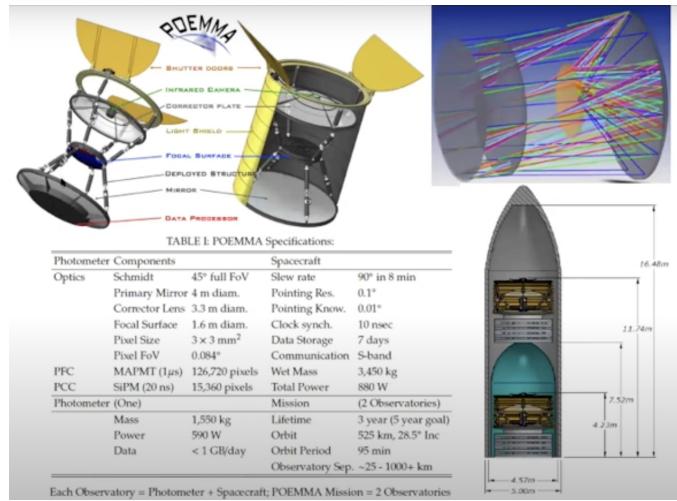


Figura 9: Desenho final do projeto POEMMA.

O desenho final do projeto pode ser visto na Fig. 9. O espelho detecta fôtons no espectro ultravioleta (fluorescência) e ótico (Chrenkov). Ele possui quatro metros de diâmetro, mas, em termos de sofisticação ótica, é mais fraco do que um HST, já que não é necessário uma imagem tão nítida dos raios. Também há uma câmera cuja lente evita a dispersão de fôtons, mantendo-os em foco. A Fig. 10 mostra a câmera do telescópio. A parte azul indica a câmera que vai observar a fluorescência; uma versão compactada dos que são usados no Auger – mesmo princípio, multiplicadores de fôtons, porém em pixels menores. Esse tipo de câmera já foi fabricada e lançada em dois balões e há um desses detectores em operação na estação espacial internacional. A parte em vermelho mostra uma câmera que utiliza uma técnica diferente com o objetivo de detectar os fôtons que vêm diretamente do chão dentro do chuveiro. Ela não vê missão isotrópica, mas direcionada. Isso é feito com um detector de SiPM que ainda não foi utilizado e será testado em um balão em 2023. Esses detectores de SiPM irão colher amostras de 20 nanossegundos, que, do ponto de vista tecnológico, é bastante desafiador – bem mais rápido do que a detecção da fluorescência, que ocorre em microssegundos. Então, há várias questões tecnológicas que estão sendo desenvolvidas para fazer esse tipo de missão.

Também projetamos uma evolução temporal para as observações de raio cósmicos ultra-energéticos dependendo da quantidade de exposição, ilustrada na Fig. 11. A linha vermelha inferior mostra a exposição caso o POEMMA observe apenas para baixo, maior do que a exposição atual do Auger. Porém, considerando que a missão está planejada para começar apenas em 2030, a previsão é de que o Auger, o Telescópio Array e o Ground ultrapassem esta exposição. A situação muda se incluirmos observações na direção do horizonte. A linha vermelha superior mostra a evolução da exposição caso o POEMMA observe na direção do horizonte, atingindo outra ordem de grandeza em termos de fluxo.

Se aumentarmos o número de observações de raios cósmicos ultra-energéticos, conseguiremos fazer um mapa mais preciso das fontes em energias entre 10^{20} eV e 10^{21} eV. Além disso, temos a possibilidade de observar a emissão Cherenkov dos neutrinos. Ela aconteceria da seguinte forma: um neutrino $\nu_{\tau\mu}$ que atinge a Terra com certo ângulo, não completamente na vertical, atravessa o planeta e sai perto do horizonte, gerando um chuveiro que pode ser detectado com a câmera de 20 nanossegundos. O tipo de eventos que queremos observar são neutrinos que teriam sido emitidos por algum outro evento transiente em astrofísica, como, por exemplo, a fusão de estrelas de nêutrons. Um ponto positivo de observar neutrinos em missões espaciais é que é possível observar toda a Terra. A Fig. 12 mostra uma comparação entre a cobertura do IceCube, atualmente o melhor detector de

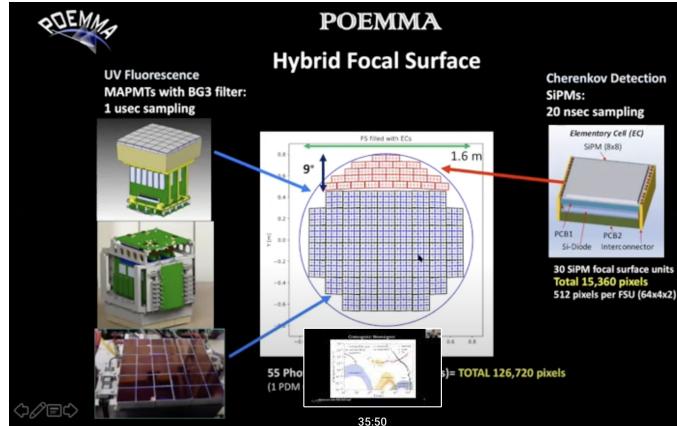


Figura 10: Esquema da câmera do projeto POEMMA.

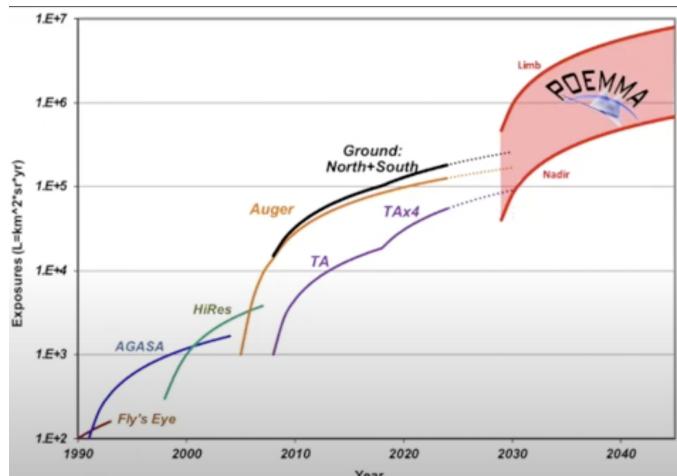


Figura 11: Evolução temporal de quantidade de exposição de diferentes telescópios de observação de raios cósmicos ultra-energéticos.

neutrinos astrofísicos de altas energias.⁴ e a projeção de cobertura do POEMMA. O IceCube está localizado no polo sul e, devido ao ângulo de inclinação da Terra, sua área de cobertura é limitada. Já o POEMMA, por se tratar de missão espacial, orbitará a Terra, podendo observar em todas as direções.⁵

Concluindo, apresentamos a proposta do projeto bem planejado e orçado para a NASA, para consideração nos planos para a próxima década. A parte científica consiste em observar os transientes astrofísicos através dos neutrinos com energias acima de 20 PeV e detectar os raios cósmicos acima de 20 EeV, ou seja, em escalas de energia extrema. Com a possibilidade de aumentar as ordens de grandeza em termos de sensibilidade e de varrer todo o céu na busca por neutrinos.

5.2 Programa JEM-EUSO

Eu também faço parte da liderança da colaboração *Joint Experiment Missions - Extreme Universe Space Observatory*, ou "Missão Conjunta de Experimentos - Observatório Espacial do Universo Extremo" em português. Este grupo é formado por inúmeros países e possui vários projetos planejados, o POEMMA é o mais futuro da série. A sigla JEM foi mantida por uma questão histórica. A princípio, este era um programa liderado por pesquisadores japoneses e se chamava *Japonese Experiment Module*, ou Módulo de Experimento Japonês em português. Quando a agência espacial japonesa extinguiu vôos de equipamentos muito grandes, como era o caso, foi necessário adaptar o programa para um novo cenário, que envolve uma colaboração global. Por isso, trocamos o nome, mas mantivemos a sigla.

⁴O único em atividade, embora haja outros projetos em andamento.

⁵Um vídeo detalhando o funcionamento do POEMMA pode ser encontrado aos 50min02s da gravação da palestra da Prof^a Angela Olinto, disponível do Youtube no canal CosmoUFES.

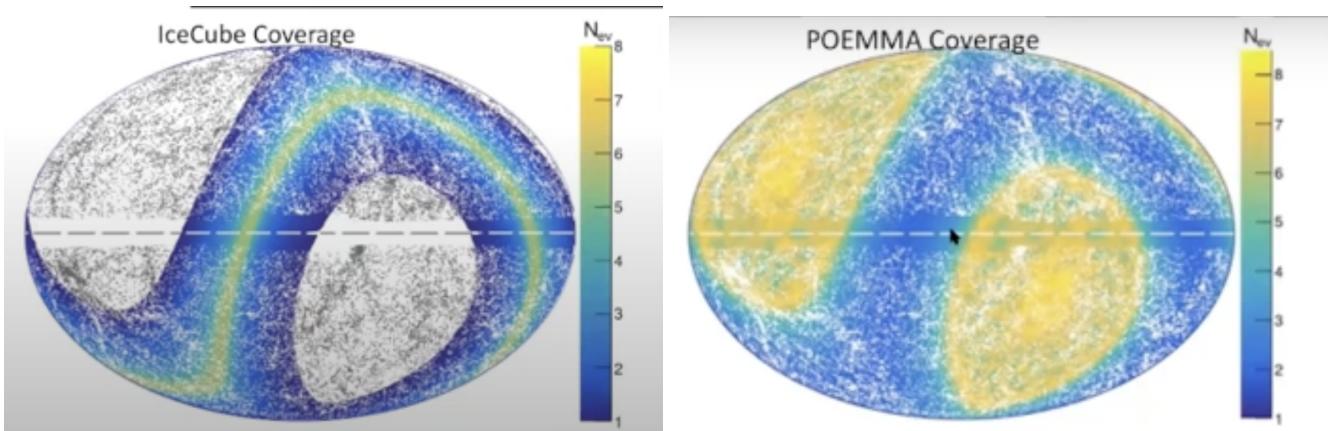


Figura 12: No quadro esquerdo é possível ver a área de exposição do Ice Cube, que é baseado em terra. No quadro direito é possível ver a área de exposição do POEMMA, que é uma missão espacial.

Neste momento, os projetos futuros do programa são o K-EUDSO, que é liderado pela Rússia, e o POEMMA, que estamos liderando nos EUA. Além disso, vários outros projetos estão em andamento, ou já foram concluídos. Por exemplo, o EUSO-TA (2013-) é um pequeno telescópio em colaboração com o Telescópio Array, em Utah. Em 2014, lançamos o EUSO-Baloom, um balão que fez observações em apenas uma noite. Neste experimento, testamos a capacidade de detecção através de um raio cósmico ultra-energético artificial, onde usamos um laser disparado a partir de um helicóptero para replicar um raio cósmico.⁶ O teste foi um sucesso, mostrando que tudo estava funcionando bem.

O projeto no qual fiquei trabalhando mais tempo, o EUSO-SPB1 (2017), foi abortado antes do tempo por causa de um problema com o balão da NASA. O objetivo era que o balão ficasse cem dias em observação, mas houve problemas com a estabilidade dele. Estes balões se chamam Balões de Super Pressão, *Super Pressure Balloon*, e quando inflados atingem o tamanho do Maracanã. O seu telescópio possui duas lentes e uma câmera, como a do POEMMA. Estes balões são lançados da Nova Zelândia e seu lançamento exige condições ideais, ou seja, pouquíssimo vento no solo e muito vento na altitude para que ele saia da maneira mais rápida possível. Quando o balão funciona direito, que não foi o nosso caso, em quatro dias ele já está no Chile ou Argentina, pois os ventos são bastante estáveis e muito fortes na altitude de 30km. Ele ficaria dando voltas na Antártica por vários dias. No caso do EUSO-SPB1, o balão começou a cair em pouco tempo e isso determinou o fim da missão. Dois anos depois, lançamos o Mini-EUSO, uma versão menor da mesma câmera de fluorescência. Ele é muito pequeno para observar raios cósmicos, mas através dele podemos conhecer melhor a nossa atmosfera e os tipos de eventos que podem se parecer com um raio cósmico ultra-energético. Esta análise está sendo feita dentro da estação espacial.

Também temos um telescópio sendo construído neste momento para voar em 2023. O EUSO-SPB2 terá dois telescópios, um para a fluorescência e outro para o Cherenkov, para detectar os neutrinos ν_{tau} subindo e também raios cósmicos acima do horizonte. O futuro é promissor para a astrofísica de partículas feita através de multi-mensageiros cósmicos.

⁶Um vídeo apresentando uma análise do sinal do laser utilizado no experimento pode ser encontrado aos 54min36s da gravação da palestra da Prof^a Angela Olinto, disponível do Youtube no canal CosmoUFES.