

CAPA

# O início e o fim dos RAIOS CÓSMICOS

Novos estudos ampliam o conhecimento sobre possíveis origens dessas partículas subatômicas, que são aceleradas até atingir uma velocidade muito próxima à da luz, atravessam o espaço intergaláctico e, ao chegar à Terra, se desfazem ao colidir com outras partículas | Carlos Fioravanti





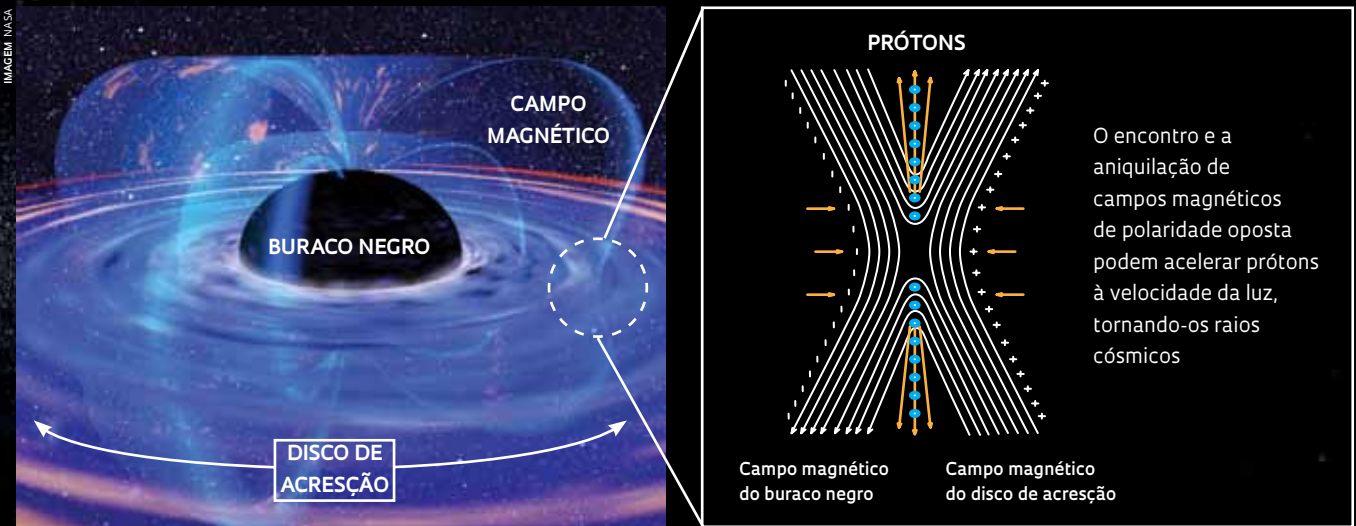
A formação e o comportamento dos raios cósmicos – partículas que chegam à Terra à velocidade muito próxima à da luz e colidem com as moléculas de nitrogênio e oxigênio da atmosfera terrestre, resultando em trilhões de novas partículas – estão sendo detalhados em dois estudos recentes. Um dos trabalhos, de pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) e dos Estados Unidos, indicou que os raios cósmicos poderiam se formar em consequência do encontro e da aniquilação de campos magnéticos de polaridades opostas em atmosferas de estrelas e de objetos cósmicos compactos como buracos negros de massas estelares ou núcleos ativos de galáxias. Para os pesquisadores responsáveis pelo estudo, esse mecanismo oferece uma alternativa ao modelo mais aceito de formação de raios cósmicos e poderia explicar as origens extragalácticas – ainda incertas – daqueles de energia mais alta.

O outro estudo – da equipe do Observatório Pierre Auger, com a participação de físicos de universidades de São Paulo, Rio de Janeiro e Bahia – analisa as colisões dos raios cósmicos de alta energia com os núcleos dos átomos da atmosfera e apresenta a área de interação dos raios cósmicos de energia de  $10^{18}$  a  $10^{18,5}$  eV (elétron-Volt) com os núcleos dos átomos da atmosfera. Nesses níveis de energia, a área de interação dessas partículas – ou seção de choque – corresponde a  $5,05 \times 10^{-29}$  metros quadrados (o número zero seguido da vírgula e por 28 zeros antes do número 505). “Nenhum outro experimento havia feito essa medida da seção de choque próton-ar ou da seção de choque próton-próton nessas energias altíssimas”, diz Carola Dobrigkeit Chinellato, pesquisadora do Instituto de Física da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp) e coordenadora da equipe paulista no Observatório Pierre Auger.

Construído de 2000 a 2008 ao pé dos Andes, em uma planície semidesértica dos arredores de Malargüe, ao sul da cidade de Mendoza, na Argentina, o Observatório Pierre Auger é o resultado de uma colaboração internacional que reúne hoje cerca de 500 físicos de 18 países. É o maior observatório de raios cósmicos em funcionamento, com 1.660 detectores de superfície, formados por tanques cilíndricos instrumentados de 3,7 metros de diâmetro por 1,2 de altura, cada um a uma distância de 1,5 quilômetro do outro, formando uma malha triangular. Espalhados por 3,3 mil quilômetros quadrados – o dobro da área da cidade de São Paulo –, os detectores de superfície funcionam de



# Como um raio cósmico se forma...



modo integrado com os 27 telescópios de fluorescência, os chamados olhos de mosca, capazes de registrar a tênue luz emitida pelas moléculas de nitrogênio da alta atmosfera quando excitadas pelas partículas do chuva iniciado pelo raio cósmico que chegou à Terra. Os leitores desta revista acompanharam a construção do Observatório Pierre Auger, desde os bastidores das negociações, apresentados em agosto de 2000 na matéria de capa de *Pesquisa FAPESP*.

Os raios cósmicos foram descobertos há 100 anos pelo físico austríaco Victor Hess, ganhador do Prêmio Nobel de 1936. Agora, com esses dois estudos recentes, o comportamento dessas partículas torna-se menos nebuloso, embora sua composição permaneça duvidosa: há indicações de que os raios cósmicos na faixa de energia até  $10^{18,5}$  eV devem ser prótons, enquanto os de energia mais alta talvez sejam núcleos de elementos químicos pesados, como ferro.

## CAMPOS MAGNÉTICOS

Na Via Láctea, as explosões conhecidas como supernovas, que marcam o fim de estrelas massivas, liberam uma quantidade de energia suficiente para explicar a formação dos raios cósmicos de baixa e alta energia, enquanto os de energia mais alta, acreditava-se, poderiam resultar de objetos mais distantes como os núcleos ativos de galáxias, explica Elisabete de Gouveia Dal Pino, do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG) da USP. Segundo ela, os prótons que formam o gás do meio interestelar poderiam ser acelerados a velocidades próximas à da luz, ganhando o *status* de raios cósmicos, ao colidirem com as chamadas ondas de choque, que se formam nas explosões

de supernovas e causam variações abruptas de velocidade, pressão e temperatura nas regiões vizinhas, como as causadas pela passagem de um avião a jato ou pela explosão de uma bomba atômica.

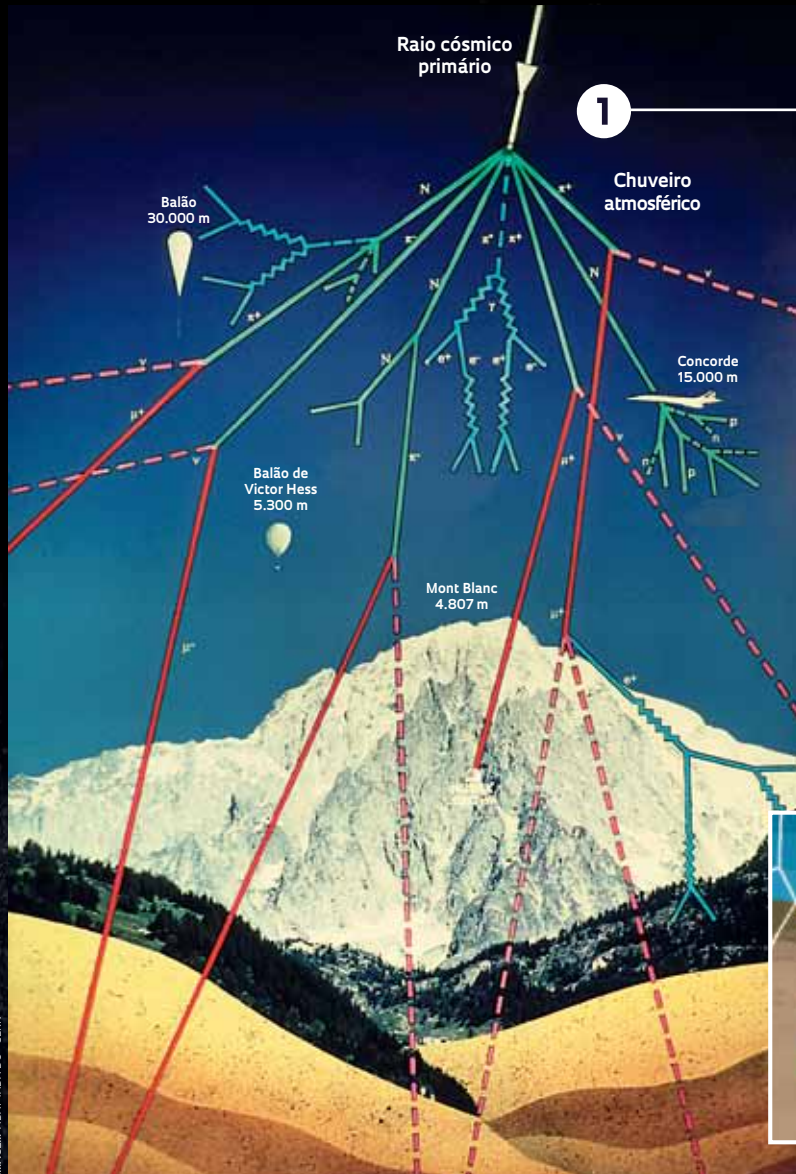
Os físicos supõem que outra fonte de raios cósmicos podem ser as ondas de choque que resultam do impacto das extremidades dos feixes de matéria, chamados jatos, emitidos pelos núcleos de galáxias ativas com o ambiente. O problema é que as extremidades dos jatos dos núcleos ativos de galáxias podem ser insuficientes para gerar as partículas com energia acima de  $10^{18}$  eV. “Os raios cósmicos têm de ser capazes de sair do confinamento gerado pelos campos magnéticos sem perder muita energia devido à interação com os fótons do meio onde foram gerados”, diz Elisabete. “Outra dificuldade, encontrada com observações mais recentes de radiação gama de núcleos ativos de galáxias, é que os raios cósmicos responsáveis por essa emissão são produzidos em regiões ultracompactas onde choques são aparentemente inexistentes.”

Elisabete e Alexander Lazarian, da Universidade de Wisconsin, Estados Unidos, procuraram outros mecanismos de formação de raios cósmicos de energia altíssima e, em 2005, apresentaram uma proposta teórica que ampliava suas possíveis fontes. Agora, por meio das chamadas simulações numéricas magneto-hidrodinâmicas, apresentadas em junho deste ano na revista *Physical Review Letters*, Grzegorz Kowal, astrofísico polonês que

**Raios cósmicos  
poderiam se  
formar também  
no gás  
interestelar  
e no meio  
intergaláctico,  
que são  
turbulentos e  
magnetizados**



# ... e se desfaz



**1** Ao chegar à Terra, o raio cósmico de altíssima energia colide com um núcleo da alta atmosfera. As partículas se chocam entre si sucessivamente, formando um chuveiro com trilhões de novas partículas

**2** As partículas do chuveiro excitam moléculas de nitrogênio do ar que emitem uma tênue luz azul que pode ser captada pelos telescópios de fluorescência

**3** As partículas são também registradas quando interagem com a água dos tanques dos detectores de superfície e produzem luz. Um computador central reúne as informações dos telescópios e dos detectores para definir a energia e a direção do raio cósmico que deu origem ao chuveiro

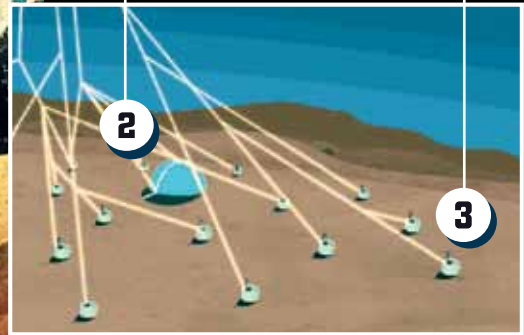


IMAGEM ADAPTADA DO CERN

INFOGRAFICO BRUN

trabalha no IAG desde 2009, Elisabete e Lazarian confirmaram as hipóteses do artigo de 2005 e mostraram que os raios cósmicos poderiam se formar nas atmosferas magnetizadas, também chamadas de coroas, que circundam buracos negros e seus discos de acreção.

“A ideia é simples”, assegura Elisabete. “Como resultado do encontro rápido entre linhas de campo magnético de polaridades opostas, a energia magnética liberada é capaz de acelerar partículas inicialmente de baixa energia a velocidades relativísticas. O processo é muito parecido com o que ocorre com partículas térmicas em ondas de choque. Quando aprisionadas entre duas linhas de campo magnético de polaridades opostas, elas colidem várias vezes com flutuações magnéticas, ganhando progressivamente

energia a partir dessas colisões até adquirirem velocidades próximas à da luz e finalmente escaparem dessa região de aceleração promovidas a raios cósmicos.”

Essa proposta, diz ela, foi inspirada na intensa atividade magnética do Sol. Frequentemente, tubos curvos de linhas de campo magnético, os *loops*, com uma extensão aproximada de 10 mil quilômetros, emergem na superfície do Sol, a chamada coroa solar. Os *loops* podem ter polaridade positiva ou negativa, como as linhas magnéticas da Terra. Quando colidem, os *loops* de polaridade oposta liberam energia, produzem calor e aceleram os prótons que estiverem por lá, convertendo-os em raios cósmicos. Segundo Elisabete, esse processo pode originar boa parte dos raios cósmicos de baixa energia, até  $10^{10}$  eV, que chegam à Terra.

Elisabete, Lazarian e Kowal concluíram que os campos magnéticos de polaridades opostas, quando envoltos por movimentos descontínuos chamados de turbulência, podem se encontrar e se aniquilar rapidamente, acelerando os prótons próximos de baixa energia e transformando-os em raios cósmicos, também nas coroas de gás magnetizado próximas a buracos negros ou estrelas – ou, de modo geral, “em regiões compactas altamente magnetizadas”, diz ela. Nessas regiões, que podem ter centenas de milhares de quilômetros de extensão, os prótons podem ampliar sua energia em 10 milhões de vezes em cerca de mil horas (ou 41 dias), à medida que colidem com os campos magnéticos, de acordo com esse estudo.

Os pesquisadores encontraram outra possibilidade, que amplia ainda mais os possíveis berçários de raios cósmicos. De acordo com esse estudo, embora com um ganho menor de energia, os raios cósmicos poderiam se formar também no gás interestelar ou no meio intergaláctico, que são turbulentos e magnetizados. Segundo Elisabete, sob o efeito da turbulência, as regiões magnetizadas do gás poderiam se encontrar e se aniquilar, transferindo a energia para as partículas próximas. A etapa seguinte do trabalho é combinar esses resultados com mecanismos físicos de perdas energéticas dos raios cósmicos e examinar observações de telescópios que possam confirmar ou corrigir essas hipóteses.

“Precisamos ver qual é o mecanismo dominante de formação de raios cósmicos de energia ultra-alta”, diz ela. Até agora as fontes das partículas mais energéticas limitavam-se a ondas de choques nos jatos de galáxias ativas. Enquanto as ondas de choques de explosões de supernovas parecem ser o principal mecanismo de produção dos raios cósmicos na nossa galáxia com energias até  $10^{16}$ - $10^{17}$  eV e o Sol aparece como uma das principais fontes de energia mais baixa ( $10^9$ - $10^{10}$  eV), diz ela, “as fontes dos raios cósmicos de mais alta energia permanecem um mistério e o mecanismo de reconexão magnética aparece como uma nova possibilidade atraente”.

## OUTROS ENCONTROS

O outro estudo também trata de colisões de raios cósmicos a altíssimas energias, examinadas por meio do Observatório Pierre Auger na Argentina. Quando um raio cósmico de altíssima energia entra na atmosfera e colide com suas partículas, novas partículas são produzidas. As novas partículas, por sua vez, continuarão se propagando na atmosfera e também poderão sofrer novas colisões e gerar novas partículas.

A cascata prossegue enquanto as partículas do chuveiro têm energia suficiente para produzir outras. “Quando as partículas não mais tiverem energia suficiente, o número de partículas do



Cassiopeia, remanescente de supernova: agora, a aceleração de prótons é provavelmente o resultado da onda de choque formada pelos movimentos da camada externa de gás

chuveiro terá atingido o seu máximo e, a partir daí, poderá apenas diminuir”, diz Carola Chinnellato, da Unicamp. Segundo ela, a energia do raio cósmico original será repartida entre esse enorme número de partículas produzidas; portanto, se ao final 1 trilhão de partículas tiverem sido produzidas, a energia de cada uma delas será aproximadamente 1 trilionésimo da energia do raio cósmico original.

Medidas recentes do Observatório Pierre Auger permitiram, pela primeira vez, detalhar as interações entre partículas em uma energia ainda não alcançada nos aceleradores de partículas. Em um trabalho publicado em agosto na revista *Physical Review Letters*, a equipe do observatório examinou colisões de 11.628 raios cósmicos com energia entre  $10^{18}$  e  $10^{18,5}$  eV com os núcleos de nitrogênio ou oxigênio da atmosfera, registradas de dezembro de 2004 a setembro de 2010. Segundo Carola, resultados anteriores do Observatório Pierre Auger já haviam indicado que, nesse intervalo de energia, as partículas cósmicas que chegam à Terra devem mesmo ser prótons.

Analisando as altitudes em que os chuveiros mais penetrantes na atmosfera apresentam o maior número de partículas, os pesquisadores determinam a seção de choque inelástica – uma grandeza física fundamental que mede a probabilidade de interação de uma partícula com outra – em colisões de prótons com núcleos do ar. No caso de um próton colidindo com os núcleos de ar, essa área de interação é de  $5,05 \times 10^{29}$  metros quadrados. “Quanto maior a seção de choque, maior a probabilidade de uma colisão ocorrer”, diz ela. Na verdade, as coisas não são tão simples



## À medida que a energia aumenta, os prótons se tornam maiores e mais opacos, e a área de interação entre eles também aumenta

no mundo das partículas. “Para interagir, as partículas não precisam se tocar.”

“Não existe contato entre as partículas”, alerta Marcio Menon, também pesquisador da Unicamp. Provavelmente, acreditam os físicos, são componentes dos prótons chamados glúons que saltam para outras partículas, passando informações sobre velocidade e modificando o comportamento delas. Menon utilizou os valores obtidos pela equipe do Observatório Pierre Auger para comparar com valores medidos por outros experimentos e propor ajustes nas fórmulas matemáticas que regem a variação da seção de choque entre partículas elementares.

A medida da seção de choque das colisões entre prótons e os núcleos da atmosfera obtida pelos telescópios do Observatório Pierre Auger está também contribuindo para estimar o comportamento dos encontros entre prótons induzidos nos túneis do Grande Colisor de Hádrons (LHC), sediado em Genebra. O observatório na Argentina e o LHC foram construídos para, cada um a seu modo, ampliar o conhecimento sobre as propriedades das partículas elementares. A equipe do Observatório Pierre Auger trabalha com colisões naturais de partículas com energias 1 milhão de vezes maiores que as maiores energias alcançadas hoje no LHC, mas os raios cósmicos colidem com outras, as do ar, praticamente paradas, enquanto nos túneis do LHC são dois feixes de prótons bastante acelerados que se encontram em colisões frontais. Segundo Carola, nessa faixa de energia, a energia total da colisão de um próton dos raios cósmicos com um núcleo do ar é apenas cerca de oito vezes maior do que a de uma colisão entre dois prótons no LHC.

### COLISÕES ENTRE PRÓTONS

A partir do resultado da medida da seção de choque inelástica próton-ar, os pesquisadores do Observatório Pierre Auger calcularam a seção de choque total em colisões próton-próton e concluíram que a área de interação entre partículas continua aumentando com a energia. Segundo Carola, esse aumento já havia sido observado em energias muito mais baixas há 40 anos, também no Centro Europeu de Energia Nuclear (Cern), e de maneira mais indireta em experimentos envolvendo raios cósmicos. “Surpreendentemente”, diz ela, “o resultado observado indicava que o próton ficava maior e mais opaco à medida que a sua energia aumentava”.

Atualmente o LHC, em operação no Cern, representa uma nova oportunidade para seguir estudando o comportamento da seção de choque próton-próton em experimentos realizados com

aceleradores, agora em energias mais altas, da ordem de  $7 \times 10^{12}$  eV, quase 100 vezes acima da energia alcançadas há 40 anos. Os primeiros resultados obtidos em 2011 no experimento Totem, no Cern, que envolvem também colisões próton-próton, confirmaram que o próton continua se tornando maior com o aumento da energia, e, conseqüentemente, que a seção de choque total continua crescendo. Segundo Carola, os pesquisadores do experimento Totem mediram a seção de choque em colisões elásticas próton-próton e, a partir dela, estimaram a seção de choque total próton-próton, aplicando um modelo teórico. O valor publicado é de  $9,83 \times 10^{-30}$  metros quadrados para a energia total da colisão de  $7 \times 10^{12}$  eV, que ela compara com o valor da seção de choque total na colisão próton-próton obtida pelos pesquisadores do Observatório Pierre Auger, de  $1,33 \times 10^{-29}$  metros quadrados, a energias ainda mais altas, correspondentes a  $5,7 \times 10^{13}$  eV. “O próton continua ficando maior e mais opaco a essas energias”, comenta Carola.

“Em essência”, diz ela, “o que estamos estudando no LHC e no Auger é algo muito similar ao que Rutherford estudava no início do século passado”. Em 1911, na Inglaterra, o físico Ernest Rutherford fez uma série de experimentos, atirando partículas alfa, de carga positiva, contra uma folha de ouro, concluindo que o átomo era formado por um núcleo minúsculo cercado por uma região muito mais extensa em que circulam os elétrons. “A diferença é que a escala de energia é muito mais alta e os experimentos são muito mais interessantes e mais complicados. É fantástico que o Observatório Pierre Auger consiga medir uma grandeza tão fundamental partindo da observação de chuviros atmosféricos.” ■

### Projetos

1. Investigação de fenômenos de altas energias e plasmas astrofísicos: teoria, observação e simulações numéricas – n° 06/50654-3; 2. Reconexão magnética e aceleração de partículas em fontes astrofísicas e meios difusos – n° 09/50053-8; 3. Estudo dos raios cósmicos de mais altas energias com o Observatório Pierre Auger – n° 10/07359-6. **Modalidades:** 1. e 3. Projeto Temático; 2. Bolsa de pós-doutorado. **Coordenadoras:** 1. Elisabete Maria de Gouveia Dal Pino – IAG/USP; 3. Carola Dobrigkeit Chinellato – IFGW/Unicamp. **Bolsista:** 2. Grzegorz Kowal – IAG/USP. **Investimentos:** 1. R\$ 366.429,60 (FAPESP); 2. R\$ 241.582,45 (FAPESP); 3. R\$ 3.182.417,76 (FAPESP).

### Artigos científicos

DE GOUVEIA DAL PINO, E.M. e LAZARIAN, A. Production of the large scale superluminal ejections of the microquasar GRS 1915+105 by violent magnetic reconnection. *Astronomy & Astrophysics*. v. 441, p. 845-53. 2005.

KOWAL, G. *et al.* Particle acceleration in turbulence and weakly stochastic reconnection.

*Physical Review Letters*. v. 108, n. 24, p. 241.102. 2012.

ABREU, P. *et al.* Measurement of the Proton-Air Cross Section at  $\sqrt{s} = 57$  TeV with the Pierre Auger Observatory. *Physical Review Letters*. v. 109, n. 6, p. 062002. 2012.