

ASTRONOMIA DE



Nos últimos 100 anos, os físicos se perguntaram sobre a natureza e a origem dos raios cósmicos, alguns dos quais são as partículas mais energéticas conhecidas. Parte dessas partículas que bombardeiam a Terra a todo instante vem do Sol. Outra parte, com energia um pouco mais alta, é criada nas explosões de estrelas massivas que chegam ao final da vida.

Porém, nas últimas quatro décadas, desde que o primeiro raio cósmico de altíssima energia foi detectado, uma questão intrigou os pesquisadores da área e se tornou um dos temas mais instigantes da física deste novo século: de onde viriam os raios cósmicos ultra-energéticos?

A resposta foi dada agora, graças a resultados recentes da Colaboração Pierre Auger, que construiu nos pampas argentinos um observatório com milhares de quilômetros de área para capturar em número suficiente esses raros viajantes espaciais. A revelação desse mistério deu ainda grande impulso à possibilidade de se fazer astronomia através da detecção de raios cósmicos, abrindo assim uma nova janela para se investigar as vizinhanças de nossa galáxia.

João Torres de Mello Neto

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

jtmn@if.ufrj.br

RAIOS CÓSMICOS

Mistério revelado abre nova janela para o universo

Os raios cósmicos de altíssimas energias (RCAEs) são um dos temas mais fascinantes da astrofísica. De onde vêm essas partículas extremamente energéticas? Como são produzidas? Como se propagam essas partículas, cujas energias são cerca de um milhão de vezes maiores que aquela que o homem consegue imprimir a essas diminutas entidades com a ajuda dos mais potentes aceleradores de partículas do planeta?

Os RCAEs são partículas (provavelmente núcleos atômicos) que viajam pelo espaço a velocidades próximas à da luz (300 mil km/s), o que possibilitaria a eles dar quase oito voltas em torno da Terra em apenas um segundo. Se fosse possível se agarrar a um desses núcleos atômicos, a relatividade especial – teoria idealizada em 1905 pelo físico de origem alemã Albert Einstein (1879-1955) – nos forneceria um cenário impressionante: graças à chamada contração espacial prevista por aquela teoria, o viajante veria a distância entre a Terra e o Sol reduzida a 1,5 m. E em função de outro fenômeno embutido na relatividade especial (a dilatação do tempo), o relógio de nosso viajante incauto – se pudesse ser visto por um observador da Terra – levaria 3,5 mil anos para marcar um mero segundo.

Para medir energias, os físicos comumente empregam a unidade elétron-volt (eV). Comparado às energias com que estamos acostumados a lidar em nosso cotidiano, um elétron-volt é desprezível. Nessa escala, um fenômeno só passa a ser observado macroscopicamente a partir da casa dos 10^{19} eV (ou seja, o algarismo um seguido de 19 zeros).

Assim, à primeira vista, pode parecer que a energia de um RCAE, que começa justamente na casa dos 10^{19} eV, não é lá muito impressionante. Mas é preciso lembrar que o fragmento de matéria que a carrega – ou seja, um núcleo atômico – é trilhões de vezes menor que um grão de areia. Se a massa de um RCAE fosse de apenas um grama, o impacto dele contra a superfície terrestre seria certamente catastrófico para a humanidade.

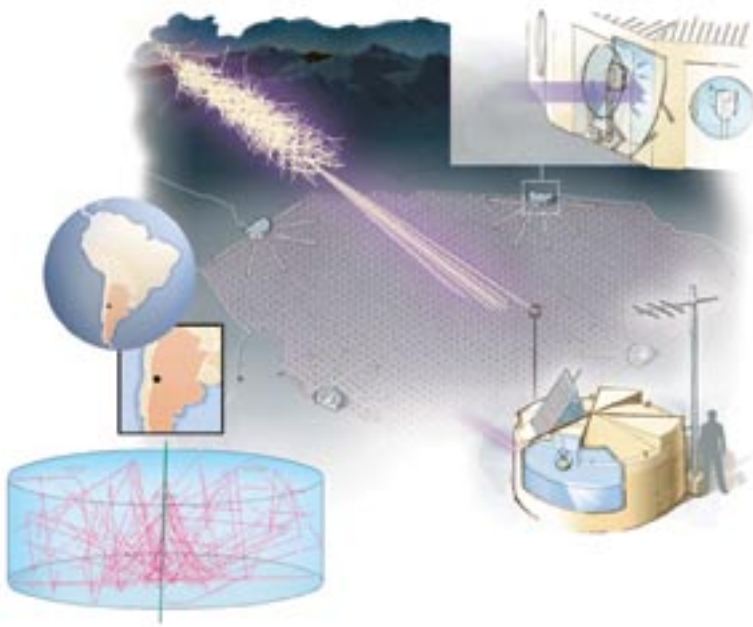
Sabe-se que os raios cósmicos de ‘baixa’ energia (até 10^9 eV) que chegam à Terra são criados no Sol. Já os de energia ‘média’ (até 10^{17} eV) são gerados por explosões de estrelas que chegam ao final da vida (fenômeno denominado supernova).

Mas qual a origem dos ultra-energéticos? E o que são eles? Núcleos leves, núcleos pesados, prótons ou algo desconhecido? Não sabemos ainda!

MENSAGEIROS DO UNIVERSO

A energia carregada pelos RCAEs indica que eles são provavelmente criados em um evento catastrófico, com intensa concentração de energia. Cenários possíveis: a vizinhança de buracos negros, as explosões de raios gama, entre outros fenômenos extremos do universo. Eles seriam, portanto, mensageiros de eventos que – felizmente! – não podem ser reproduzidos em laboratórios terrestres, mas que são muito interessantes para os astrofísicos. ▶

FOTO: ESO
Centaurus A, galáxia com um núcleo ativo mais próxima da Terra e uma das prováveis fontes de raios cósmicos de altíssimas energias, como indicam resultados recentes do Observatório Pierre Auger



A poucas dezenas de quilômetros do solo, os raios cósmicos, chocam-se com um átomo da atmosfera, criando uma cascata (ou chuva) de partículas secundárias que se propaga até o chão. Um RCAE, por exemplo, pode produzir bilhões de outras partículas, em uma ilustração dramática da conversão de energia em massa, resumida na fórmula $E = mc^2$ da relatividade especial (onde E é a energia, m a massa e c^2 a velocidade da luz ao quadrado).

Como estudar essas partículas e desvendar suas propriedades?

No meio dos pampas argentinos, ao pé da cordilheira dos Andes, o Observatório Pierre Auger vem nos últimos anos coletando dados sobre raios cósmicos de alta energia para responder a essa questão. Sabe-se que, em média, um RCAE cai em um quilômetro quadrado por século. Para que seja possível a acumulação de um número razoável dessas partículas em um período de poucos anos, é preciso utilizar detectores que se estendam por áreas enormes. No caso do Observatório Auger, esses números são os seguintes: 1,6 mil tanques de água, separados uns dos outros por 1,5 km, cobrindo 3 mil km^2 da região oeste argentina, área equivalente a três vezes a do município do Rio de Janeiro. Cada tanque contém 12 toneladas de água ultrapura, para evitar o crescimento de bactérias e para assegurar a maior transparência possível para a passagem da luz (figura 1).

Quando as partículas formadas no chuva cruzam a água, emitem

uma luz azulada, devido a um fenômeno óptico (efeito Cherenkov) semelhante ao das ondas que uma lancha rápida deixa na água (destaque inferior na figura 1). Essa luz é capturada por um conjunto de três sensores (fotomultiplicadoras). Os sinais luminosos são codificados eletronicamente e enviados ao prédio central por sinais de microondas.

Além disso, há 24 telescópios, situados em quatro prédios que ocupam os morros nas bordas da área coberta pelos tanques. Denominados detectores de fluorescência, eles procuram sinais de luz ultravioleta no céu, rastros dos chuviscos cujas partículas carregadas excitam moléculas de nitrogênio da atmosfera. Estas, em resposta, emitem a chamada luz de fluorescência (destaque superior na figura 1).

Toda a informação coletada por esses dois tipos de detectores é enviada ao prédio central, onde fica o sistema de aquisição e análise de dados. Em seguida, a energia, a direção no céu e outras quantidades físicas são reconstruídas nos computadores. A direção do evento é bem determinada pelos detectores de superfície, mas a energia é mais bem medida pelos detectores de fluorescência. A operação conjunta deles é considerada a melhor maneira de estudar os RCAEs.

A junção dessas duas técnicas distintas permite calibrar um detector pelo outro e diminui o risco de erros nas medidas. A figura 2 ilustra como um evento real é visto esquematicamente nas telas dos computadores no centro de coleta e análise de dados do Observatório Auger (no caso, o evento foi capturado por vários detectores de superfície e pelos quatro detectores de fluorescência).

Quando colocado em um gráfico, o fluxo de raios cósmicos observado em nosso planeta é impressionante, pois apresenta um fenômeno da natureza que se estende por 12 ordens de grandeza em energia (eixo hori-

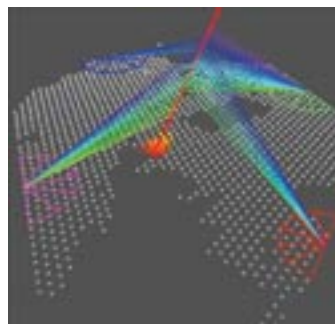


Figure 2. Representação esquemática de um raio cósmico (linha vertical vermelha) captado simultaneamente pelos quatro detectores de fluorescência (semicírculos com seis subdivisões) e por vários detectores de superfície (pontos em laranja e amarelo) em 20 de maio do ano passado, com energia de aproximadamente 10^{19} eV

QUEDA NO FLUXO

Quando colocado em um gráfico, o fluxo de raios cósmicos observado em nosso planeta é impressionante, pois apresenta um fenômeno da natureza que se estende por 12 ordens de grandeza em energia (eixo hori-

zontal) e por 32 ordens de grandeza no eixo vertical (o fluxo para cada uma das energias), como mostra a figura 3. A região desse gráfico que nos interessa é a mais energética, quando os dados começam a ficar escassos e onde se situam os RCAEs (final do eixo horizontal, à direita). Se fosse possível armazenar a energia equivalente a um grama de partículas dessa região, teríamos energia para alimentar todo o planeta por cerca de mil anos.

Por se moverem com velocidades muito próximas à da luz, os RCAEs se chocam violentamente com os fótons (partículas de luz) que permeiam o espaço intergaláctico (esses fótons são ‘resquíços’ do *Big Bang*). Nessas colisões, os RCAEs rapidamente vão perdendo energia. Portanto, se um deles chega à Terra, sabemos que necessariamente deve ter vindo de ‘perto’ (cosmologicamente falando). Os cálculos prevêem que não é possível para um RCAE vir de além de algo como 100 megaparsecs (cada megaparsec equivale a cerca de 3,3 milhões de anos-luz; por sua vez, um ano-luz vale 9,5 trilhões de km). Isso porque, para além dessa distância, eles perderiam uma parte considerável de sua energia nas sucessivas colisões com os fótons e, portanto, não seriam observados na Terra com as altas energias com que são capturados.

Isso implica que devemos observar uma queda acentuada no fluxo dos raios cósmicos caso esteja correta essa previsão (que depende basicamente de a teoria da relatividade especial funcionar para partículas com essas energias, o que até agora parece ser verdade). Em outras palavras: quanto mais energético um raio cósmico, mais raro ele é. Essa queda no fluxo é conhecida como corte de GZK, devido aos físicos que primeiramente estudaram esse fenômeno: Kenneth Greisen (Estados Unidos), bem como Georgiy Zatsepin e Vadim Kuzmin (ex-União Soviética), em 1966. Outro modo de entender o corte GZK é o seguinte: um raio cósmico que chega à Terra com energia acima de certo valor (5×10^{19} eV) deve necessariamente vir de ‘perto’.

Experimentos anteriores apresentavam dados conflitantes. Segundo o Agasa, um experimento no Japão, o fluxo dos raios cósmicos continuava para altas energias, enquanto o experimento HiRes, em Utah (Estados Unidos), mediu a queda nesse fluxo e parecia confirmar a existência do corte de GZK.

As medidas recentes do Observatório Auger confirmaram que há uma queda brusca no fluxo. Mas isso ainda deixava uma questão em aberto: essa queda poderia ser ocasionada pelo fato de as fontes geradoras dos RCAEs não terem potência suficiente para acelerar esses núcleos além do limite de energia previsto pelo corte GZK. Como resolver, então, essa questão? Uma forma seria estabelecer uma ‘associação’ (os físicos preferem dizer correlação) entre as direções dos raios cósmicos e a localização de objetos vizinhos, pois, se

CONTRIBUIÇÃO BRASILEIRA

Entre as contribuições brasileiras para o projeto, destacam-se a fabricação dos tanques de plástico para os detectores de superfície; o fornecimento das baterias especiais para os painéis solares, que, por sua vez, alimentam os componentes eletrônicos desses detectores; o projeto de mecânica fina para os telescópios de fluorescência; a fabricação das lentes especiais (baseadas na óptica de Schmidt) que permitem a focalização precisa da imagem dos telescópios.

São, ao todo, 18 pesquisadores brasileiros, além de estudantes de doutorado e engenheiros.

a hipótese GZK for correta, os RCAEs só podem vir de objetos celestes próximos (como vimos, caso viessem de longe, perderiam sua energia ao longo do caminho). Assim, se essa correlação fosse provada, estaria também comprovada a validade do corte GZK.

FORTE ASSOCIAÇÃO

Os resultados do Observatório Pierre Auger primeiramente indicam que os RCAEs são anisotrópicos, isto é, não vêm com igual probabilidade de todas as regiões do céu. Ou seja, após quase meio século de busca, pela primeira vez dados indicam em que regiões do céu os RCAEs são produzidos.

Para se chegar a essa conclusão, foi necessário que o Observatório Auger coletasse dados sobre quase um milhão de raios cósmicos desde o início de 2004. Desse total, 27 têm energia acima do corte GZK ▶

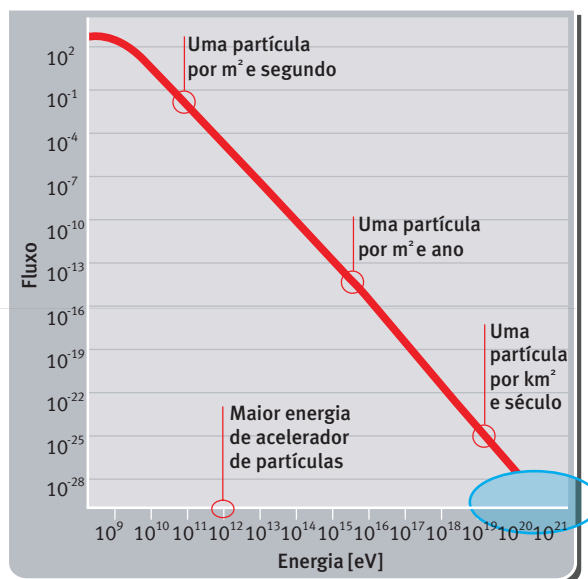


Figura 3. Fluxo dos raios cósmicos. À medida que a energia cresce, o fluxo de partículas em uma dada área diminui apreciavelmente. A região marcada em azul é a de altíssima energia

O MAPA CELESTE DOS RCAEs

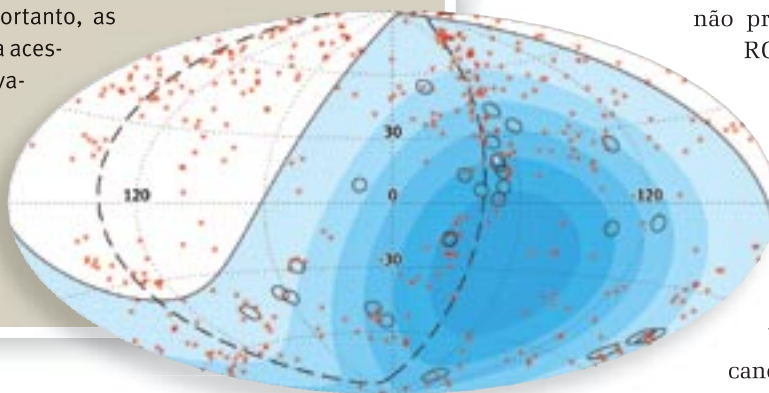
No mapa celeste dos 27 eventos mais energéticos detectados pelo Observatório Pierre Auger até outubro do ano passado (figura), os raios cósmicos estão representados por círculos, e os asteriscos vermelhos são as posições dos 472 núcleos ativos de galáxias que se encontram em uma esfera de 75 Mpc de raio, centrada em nossa galáxia.

A linha preta contínua representa até onde podemos detectar eventos no céu (o observatório é localizado no hemisfério Sul e, portanto, não pode detectar nada na direção do pólo Norte e adjacências). A intensidade das faixas azuis corresponde à proporção de tempo que o observatório aponta na dada direção do céu devido ao movimento da Terra.

A linha pontilhada é o plano supergaláctico (a maior estrutura no universo local, formado pelos aglomerados de galáxias próximos, como o aglomerado de Virgo, o Grande Atrator e o superaglomerado de Peixes, que se localizam aproximadamente em um mesmo plano). O ponto branco (centro, à direita) marca a posição de Centauro A, o núcleo ativo de galáxia mais próximo da Terra e provável fonte de RCAEs.

Para esse mapa, foram considerados apenas chuueiros de raios cósmicos que chegaram ao solo não muito inclinados (ângulo menor do que 60°) em relação à horizontal.

Com um observatório no hemisfério Norte, a cobertura do céu será completa, e o futuro mapa celeste não vai conter as áreas brancas. O observatório sul contempla o centro da galáxia. Portanto, as distribuições de matéria acessíveis aos dois observatórios são muito distintas. A união dos dois vai tornar a astronomia de raios cósmicos ainda mais interessante.



(5×10^{19} eV), ou seja, são RCAEs. Se o mapa celeste desses eventos ultra-energéticos for representado em uma projeção plana (semelhante a um mapa-múndi), surge uma excelente correlação com um catálogo de núcleo ativos de galáxias (como o nome indica, são galáxias cujo centro é cenário de fenômenos extremos). Ou seja, os RCAEs parecem estar sendo produzidos no interior desses objetos cósmicos, que estão em nossa vizinhança cosmológica (figura 4).

Dados adicionais confirmaram a associação entre RCAEs e núcleos ativos de galáxias de forma estatisticamente convincente (ver 'O mapa celeste dos

RCAEs'). Tudo indica que esse resultado resolve um dos maiores mistérios da natureza, a origem dos RCAEs, uma questão que aflorou com a detecção do primeiro deles no início da década de 1960, em um experimento nos Estados Unidos.

Como bônus desses resultados, o corte de GZK foi finalmente confirmado: os RCAEs vêm de 'perto', da vizinhança da Via Láctea. E a relatividade especial, na qual o corte está teoricamente baseado, passou em mais um teste!

SUTILEZAS DOS RESULTADOS

Esse resultado também indica que o campo magnético intergaláctico é relativamente pequeno, e as partículas observadas devem ser prótons, pois, caso tivessem carga elétrica maior, elas seriam muito desviadas de suas posições iniciais (e, provavelmente, não se observaria a associação entre RCAEs e os núcleos ativos de galáxias). Como as previsões para o campo magnético variam muito na literatura, estamos, na realidade, usando a trajetória dessas partículas para impor limites ao valor desse campo.

Aqui chegamos a uma sutileza que precisa ser explicitada: os resultados experimentais não provam que as fontes dos RCAEs sejam os núcleos ativos de galáxias! Lidos com o cuidado que a investigação científica requer, eles mostram apenas que há uma forte relação entre os RCAEs e os núcleos ativos de galáxias, embora esses núcleos sejam candidatos fortíssimos a fontes. Porém, qualquer fenômeno físico

que se distribua no céu como os núcleos ativos e que seja capaz de produzir partículas com essas energias continua um candidato igualmente plausível (ver 'Hipóteses sobre a produção'). Além do mais, o catálogo de núcleos ativos de galáxias que usamos é sabidamente incompleto (principalmente na direção do que os astrônomos denominam equador galáctico e para distâncias superiores a 300 Mpc).

As questões colocadas no parágrafo anterior foram estudadas exaustivamente em uma tese de doutorado realizada no Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro (ver 'Sugestões para leitura'), sob a orientação do autor deste artigo.

HIPÓTESES SOBRE A PRODUÇÃO

Com os resultados recentes do Auger, surge um candidato mais forte (núcleos ativos de galáxias) para explicar a origem dos RCAEs. Com isso, outras hipóteses que concorriam com essa saem enfraquecidas. A lista de hipóteses:

i) Núcleos ativos de galáxias, que geralmente escondem em seu interior um buraco negro supermaciço, que suga matéria de estrelas destruídas pela gravitação intensa em sua vizinhança, produzindo radiação e jatos de matéria que se estendem por centenas de milhares de anos-luz.

ii) Explosões de raios gama, os eventos mais luminosos do universo, provavelmente causados pelo nascimento de buracos negros nos núcleos de estrelas de grande massa ou pelo 'agrupamento' (coalescência) de estrelas de nêutrons binárias ou mesmo de buracos negros.

iii) Objetos localizados na própria Via Láctea, como estrelas de nêutrons jovens, pulsares ou o buraco negro que, tudo indica, habita o centro de nossa galáxia.

iv) Defeitos topológicos, algo que pode ser comparado a um diminuto volume de 'espaço' que não 'explodiu' no início do universo.

v) Partículas superpesadas de matéria escura que se transformariam (decairiam, no jargão dos físicos) em RCAEs.

Como dissemos, os resultados do Auger fazem do item (i) a fonte mais provável dos RCAEs. Já o item (iii) fica muito desfavorecido, pois é muito improvável que eles sejam produzidos dentro de



Figura 4. Jato de matéria emitido pela M87, um núcleo ativo de galáxia que está no aglomerado de Virgo, na vizinhança da Via Láctea. Acredita-se que o fenômeno seja produzido por um buraco negro alimentado por gás caindo em seu interior

nossa galáxia. Os defeitos topológicos (iv), ainda podem ser válidos, mas terão de mostrar que se distribuem no céu de forma semelhante à dos núcleos ativos de galáxias (ou seja, não homogeneamente). O mesmo, de certa forma, deve ocorrer com as partículas superpesadas (v). Quanto ao item (ii), continua como uma possibilidade interessante, pois as fontes prováveis de explosões de raios gama se distribuem como a matéria em larga escala, de forma semelhante aos núcleos ativos de galáxias.

Por que não descartar todas as outras hipóteses e ficar apenas como os núcleos ativos, já que os dados do Auger mostraram a forte correlação entre os RCAEs e tais objetos cósmicos? Simplesmente porque a história da física (e da ciência!) revela que é preciso cautela com as conclusões.

Caso dados futuros continuem confirmando a forte associação entre os núcleos ativos e os RCAEs, os físicos terão, ainda, bastante trabalho pela frente, pois fica em aberto a seguinte questão: que mecanismo físico nesses objetos cósmicos é capaz de imprimir energias tão altas a núcleos atômicos?

Essa distância determina a energia mínima que um raio cósmico deve ter para poder ser detectado por vários tanques, pois, quanto mais energético o chuveiro, mais ele se espalha na superfície.

A astronomia vem sendo tradicionalmente feita através da captação da luz emitida pelos objetos celestes, bem como das ondas de rádio (radioastronomia) e, mais recentemente, de raios gama e neutrinos (estes últimos partículas sem carga elétrica e extremamente penetrantes).

Com o Auger, estamos vislumbrando, pela primeira vez, a possibilidade de uma nova astronomia: enxergar o universo próximo através do fluxo de raios cósmicos extremamente energéticos que chegam à Terra.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- COLABORAÇÃO
PIERRE AUGER.
'Correlation of the highest-energy cosmic rays with nearby extragalactic objects'.
In: *Science*, v. 318, p. 938-943 (2007).
- SIFFERT, B. B.
Anisotropia de raios cósmicos de altíssimas energias no Observatório Pierre Auger (tese de doutorado).
Instituto de Física, UFRJ (2008).
Disponível em <http://omnis.if.ufrj.br/~beatriz/>
- ESCOBAR, C. O. e SHELLARD, R. C.
'Energias extremas no universo'.
In: *Ciência Hoje* nº 151 (1999).
- ANJOS, J. C. e SHELLARD, R. C.
Raios Cósmicos – energias extremas no universo. Folder do projeto Desafios da Física. Rio de Janeiro: CBPF (2004).
Disponível em <http://mesonpi.cat.cbpf.br/desafios/> no formato PDF.
- SHELLARD, R. C.
'Um 'Einstein' gigantesco nos pampas – como as idéias do físico alemão ajudam a estudar os raios cósmicos'.
In: *Ciência Hoje* nº 214 (2005).
Na internet: <http://www.auger.org.ar> (em espanhol)

J. A. BIRETTA ET AL., HUBBLE HERITAGE TEAM (STSC/JAURA), NASA

NOVA JANELA PARA O UNIVERSO

Precisamos continuar a acumular mais dados sobre os raios cósmicos de altíssima energia. Se chegarmos a detectar eventos aglomerando-se em torno de uma dada fonte no céu, poderemos precisar melhor que objeto cósmico é capaz de produzir a distribuição de energia observada para os RCAEs que vêm daquele local.

Em breve, pretende-se construir um observatório semelhante ao Auger no estado norte-americano do Colorado, provavelmente cobrindo área ainda maior, com tanques mais espaçados uns dos outros.