

PEDRO TEIXEIRA

TOMOGRAFIA DE MUÕES



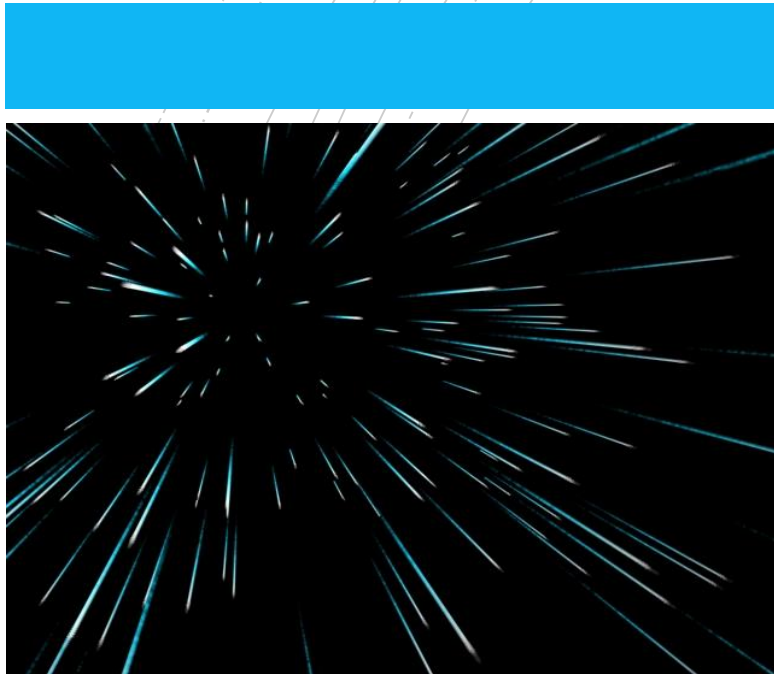
UNIVERSIDADE
DE ÉVORA





■ RAIOS CÓSMICOS

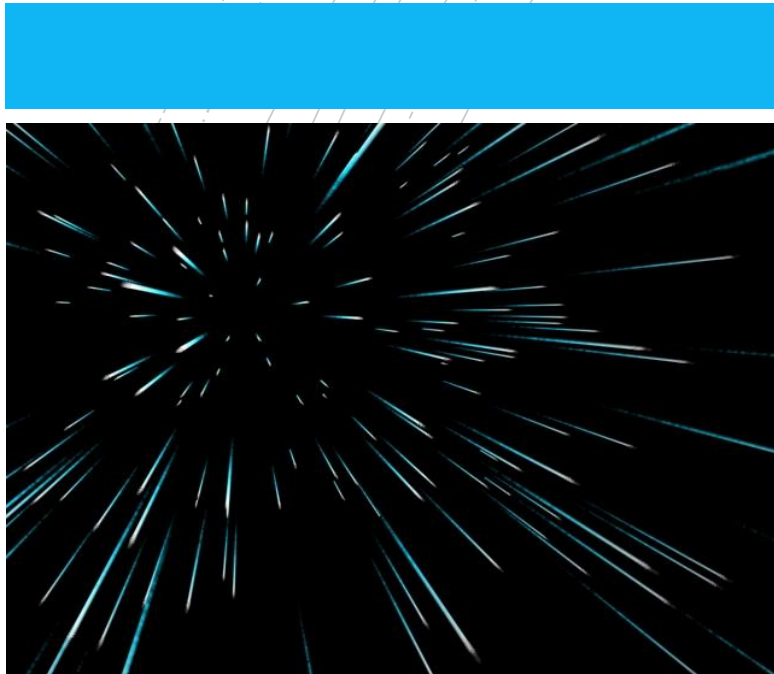
- A cada segundo que passa, **somos bombardeados com partículas** que atravessam o nosso corpo.
- Na sua maioria, **são produzidas por raios cósmicos** originados na nossa galáxia.

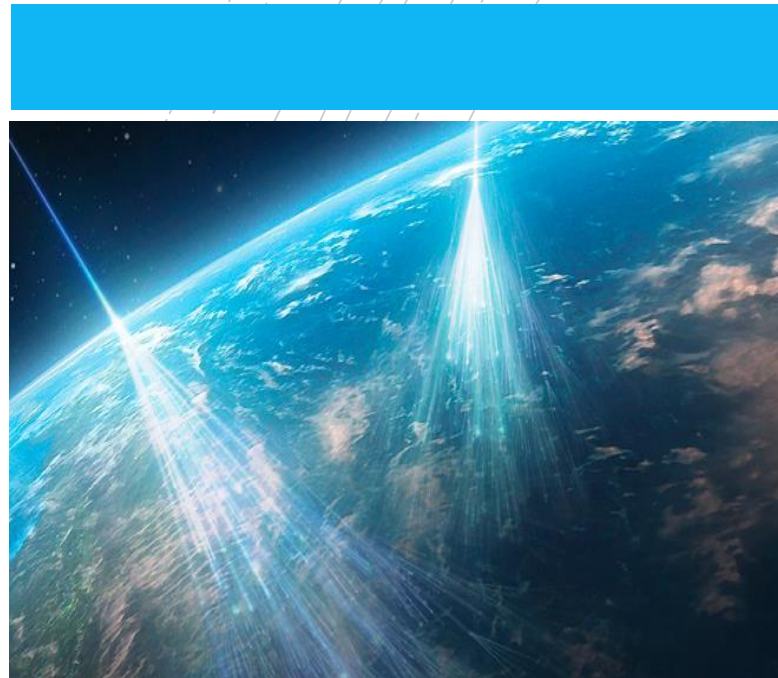




■ RAIOS CÓSMICOS

- Os raios cósmicos são um tipo de **radiação de alta-energia**.
- Na verdade, não são exatamente “raios”, mas sim **partículas altamente energéticas** que viajam pelo espaço a velocidades próximas da velocidade da luz.

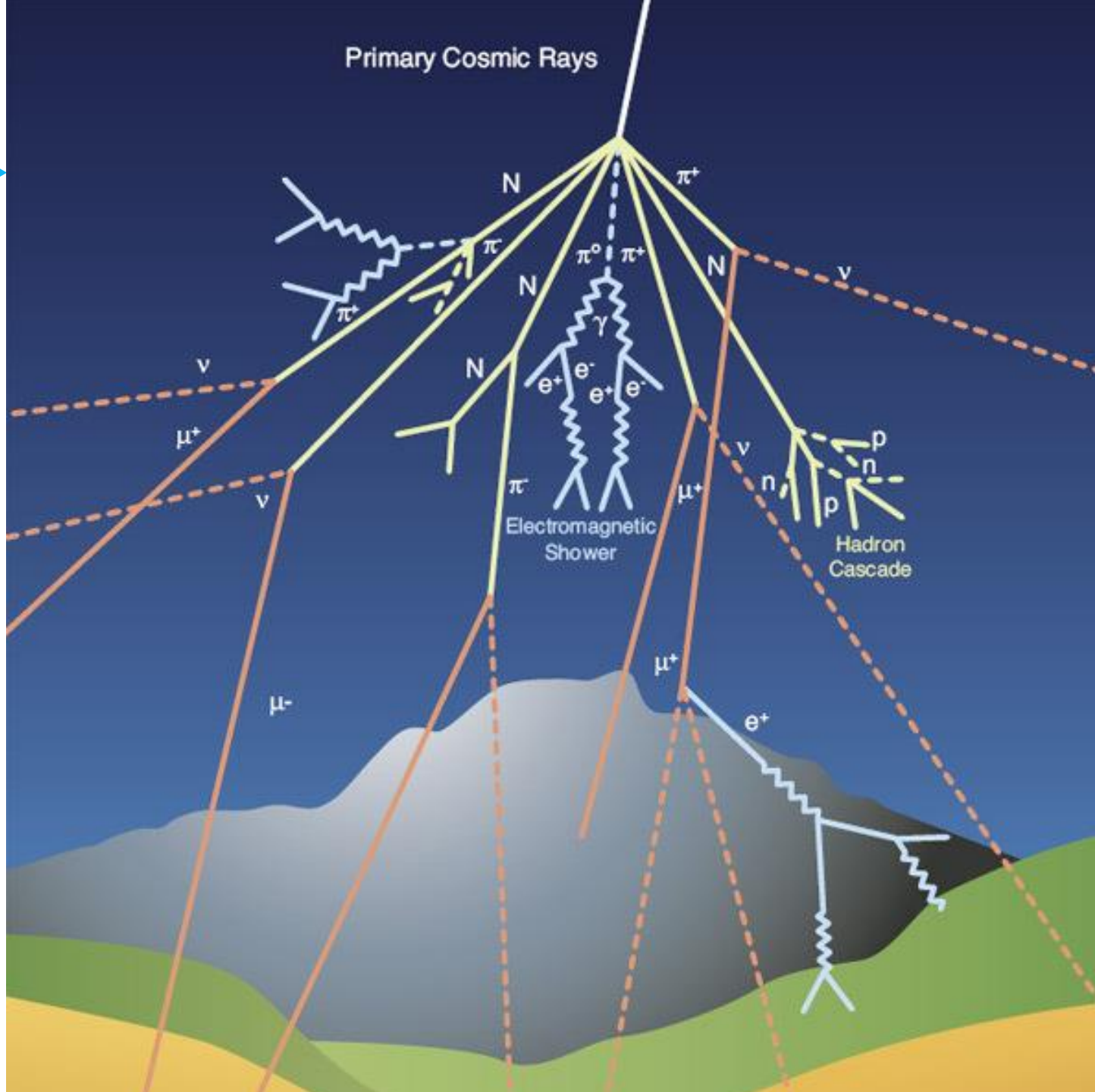




■ RAIOS CÓSMICOS

- Dessas partículas, 90% são prótons, 9% são núcleos de hélio e o restante são núcleos de outros elementos mais pesados, elétrons e outras partículas subatômicas.
- Ao colidirem com as moléculas da atmosfera terrestre produzem “chuvas” de partículas secundárias que podem ter um extensão de várias centenas de metros.
- Nas chuvas de partículas surgem os muões.

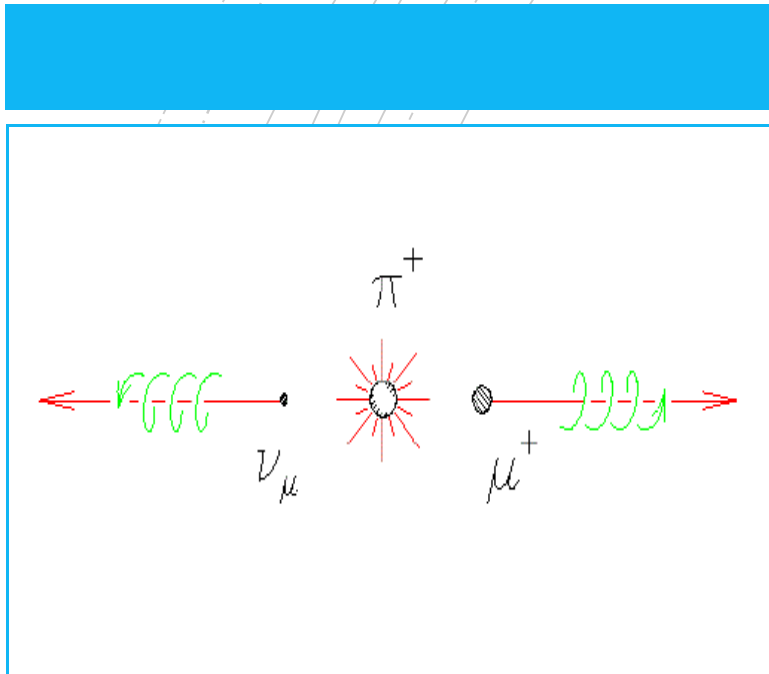
CHUVA DE PARTÍCULAS



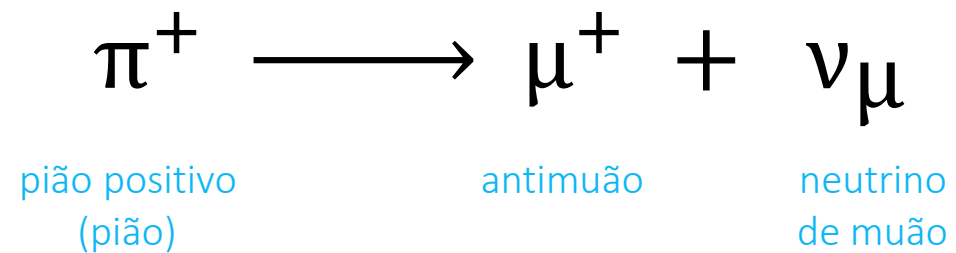
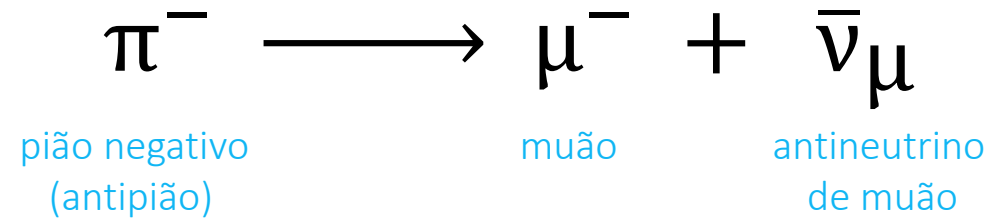
■ Diagrama da produção de partículas secundárias resultantes da interação de um raio cósmico com a atmosfera terrestre.

- N – nucleão de alta energia
- e – eletrão
- p – protão
- n - neutrão
- π – pião
- μ - muão
- ν – neutrino

(Imagem: CERN)



■ EQUAÇÕES DE DECAIMENTO



SÍMBOLO = LETRA GREGA

μ

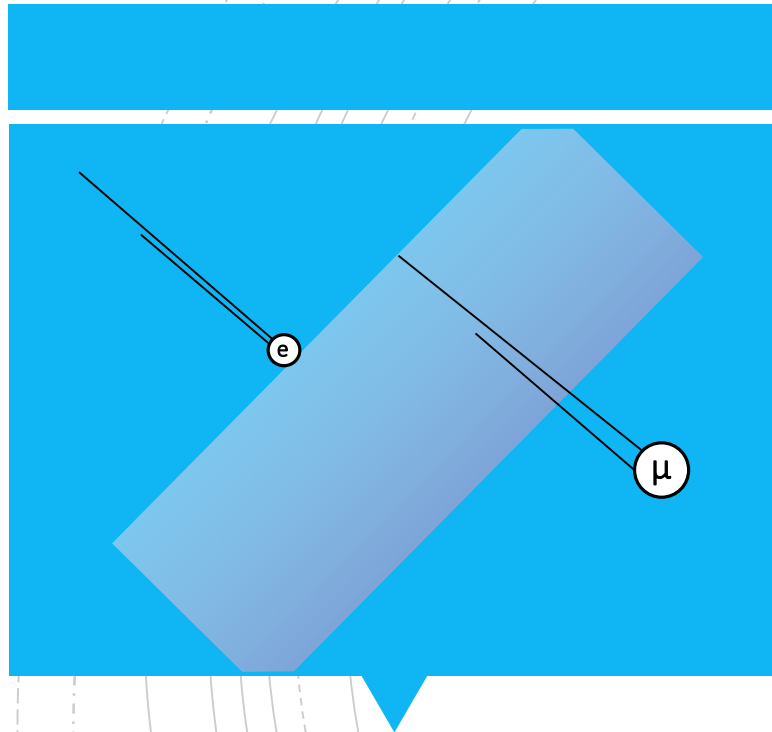
"MU"

MUON

■ O QUE É UM MUÃO?

- É uma **partícula elementar** com carga elétrica.
- Essencialmente, é **semelhante a um eletrão**, mas com uma **massa 200 vezes maior**.
- A maioria dos **muões são um produto de decaimento** originados pelos raios cósmicos ao atingirem a atmosfera.

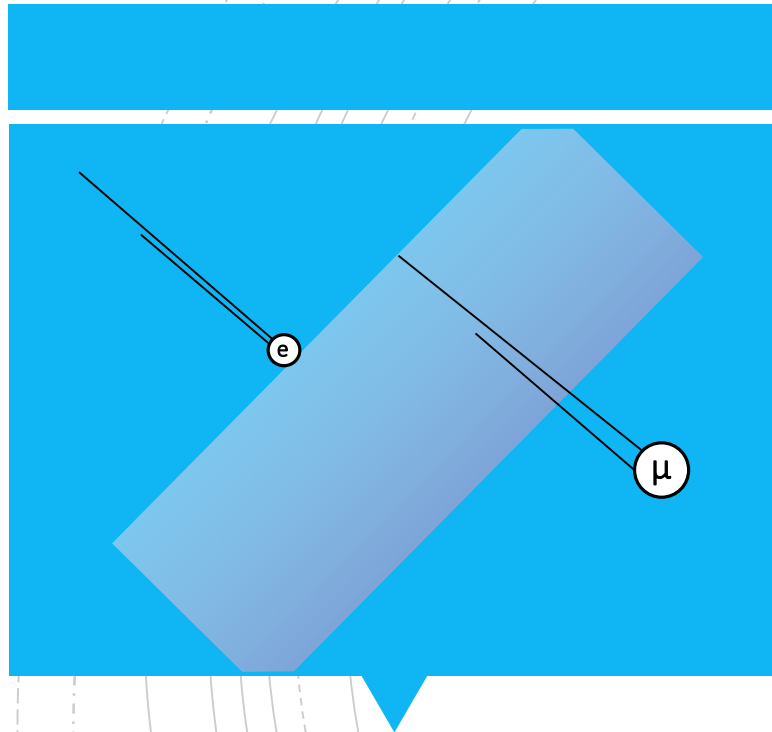




■ RELAÇÃO MUÃO - ELETRÃO

- O muão é um **eletrão mais pesado e instável** e por isso tem um **tempo médio de vida de $\sim 2 \mu\text{s}$** .
- Viaja quase à velocidade da luz e devido à dilatação do tempo isso é o **suficiente para percorrer longas distâncias** antes de decair.





■ RELAÇÃO MUÃO - ELETRÃO

- Quando o muão decai origina 1 eletrão/positrão e 2 neutrinos
- O eletrão é estável e não decai mas interage facilmente com a matéria, pelo que é absorvido muito rapidamente.





■ PARTICULARIDADES DOS MUÕES

- Devido à sua **grande massa**, a atração exercida nos muões pela matéria é menor e por isso não são desacelerados na sua trajetória tão facilmente como os eletrões.
- Isto **permite que conservem a sua energia por mais tempo**.
- Por esta razão, os muões têm um **enorme poder de penetração** na matéria.





■ PARTICULARIDADES DOS MUÕES

- A sua **interação** com a matéria é pequena, mas é o **suficiente para serem detetados**.
- Isso faz deles um **excelente meio para ver através de objetos** em grande escala, principalmente na área da geofísica.



ID

| | |
|---------------------|-----------------|
| SÍMBOLO | ν |
| CARGA ELÉTRICA | 0 |
| MASSA | ~ 0 |
| TEMPO MÉDIO DE VIDA | \sim infinito |

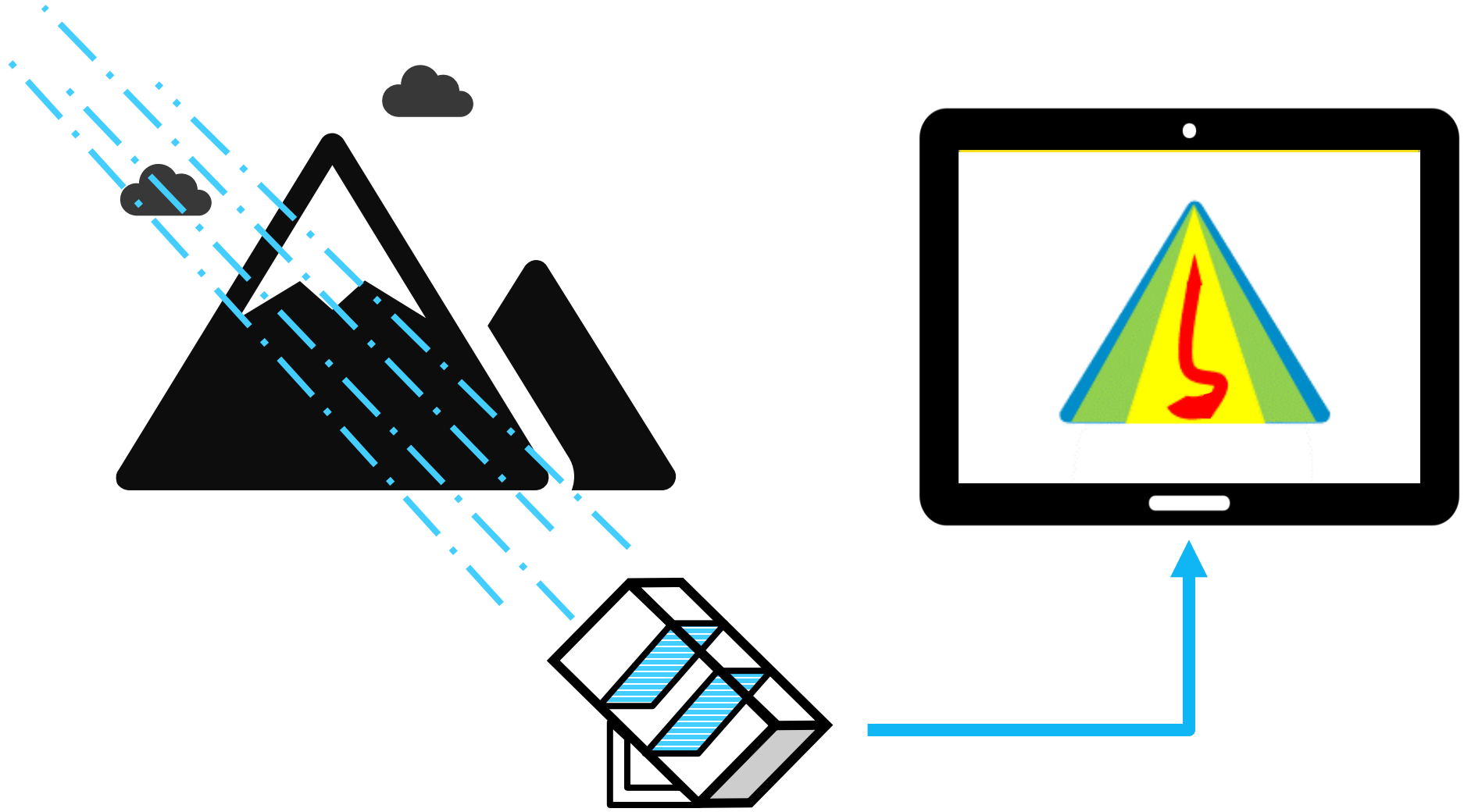
■ NEUTRINOS - PORQUE NÃO?

- São a **segunda partícula mais abundante no Universo**, a seguir ao fóton.
- Enquanto os muões podem atravessar uma grande quantidade de matéria, até serem absorvidos, **os neutrinos atravessam tudo** sem serem parados.
- Mas quase não interagem com a matéria e por isso **são muito difíceis de detetar**.



TOMOGRÁFIA DE MUÕES

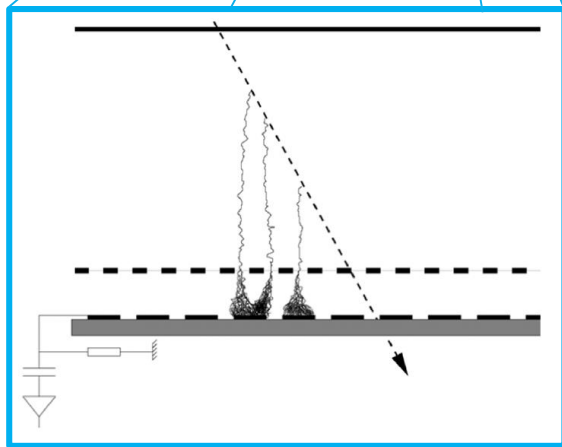
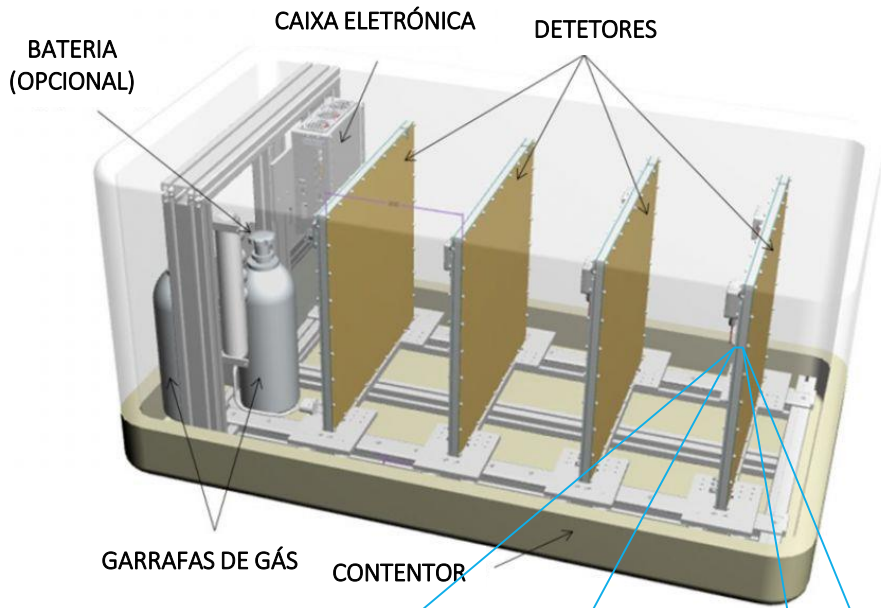
TOMOGRÁFIA DE MUÕES





■ TOMOGRAFIA DE MUÕES

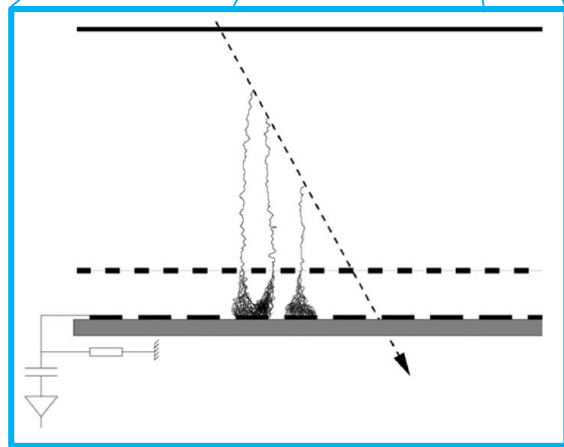
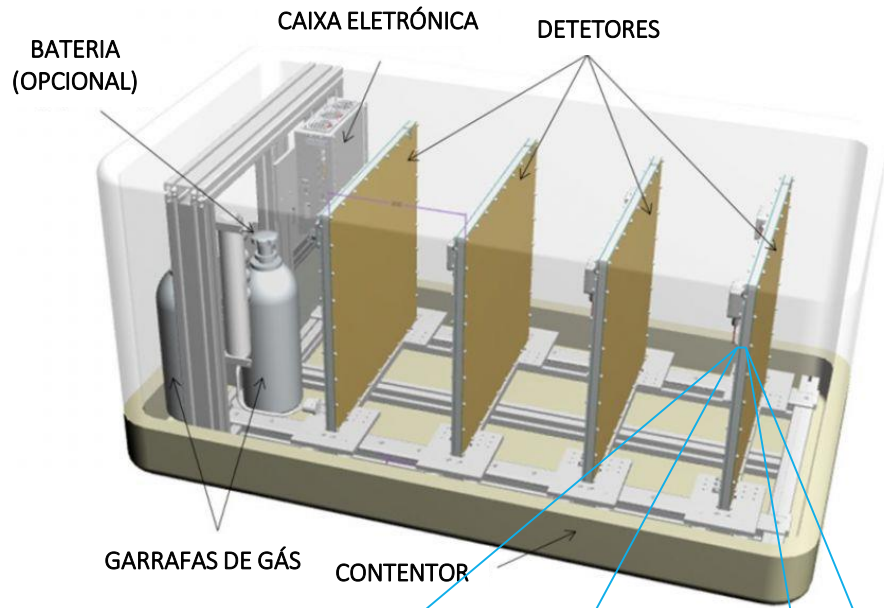
- A primeira aplicação dos muões foi feita por Eric George, nos anos 50, para medir a espessura de uma camada de gelo por cima de um túnel na Austrália.
- Entretanto, as aplicações tornaram-se mais sofisticadas e adquiriram diferentes formas. As duas variantes mais comuns são:
 - Tomografia por transmissão de muões;
 - Tomografia por dispersão de muões.



(Imagem: Procureur, 2017)

■ TELESCÓPIO DE MUÕES COM RPCs

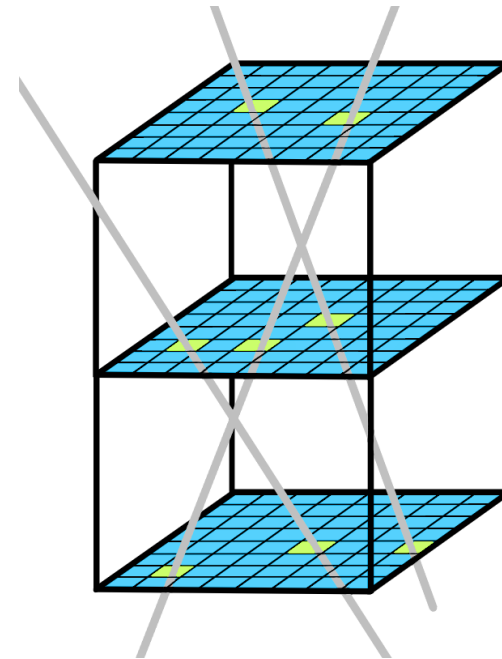
- As RPCs (*Resistive Plate Chambers* – Câmaras de Placas Resistivas) são detectores de partículas e os principais componentes do telescópio.
- Cada uma, consiste em duas placas paralelas, carregadas com cargas elétricas opostas e separadas por uma mistura de um gás ionizante.
- Quando um muão atravessa a câmara, este interage com o gás, ioniza-o ao longo da sua trajetória e causa uma avalanche de elétrons que produzem um sinal no detector.



(Imagem: Procureur, 2017)

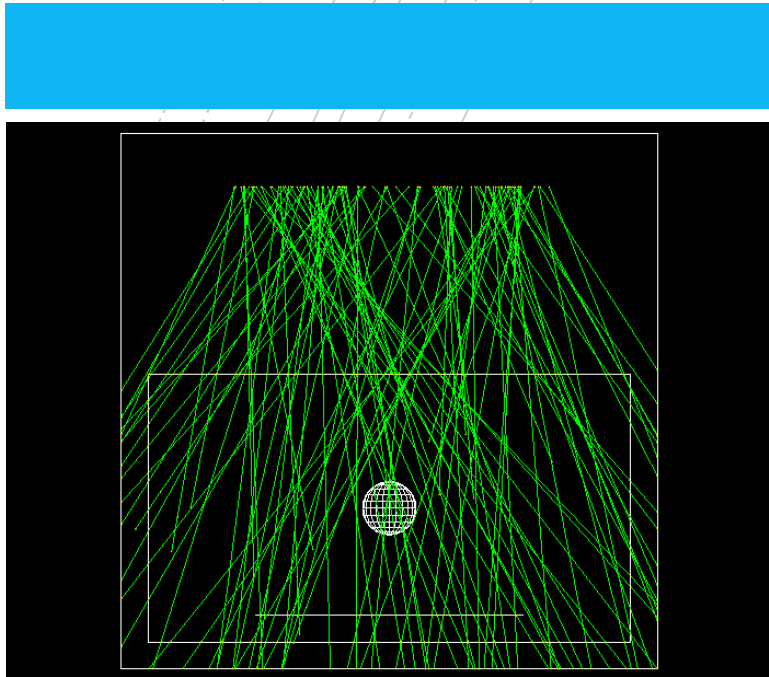
■ TELESCÓPIO DE MUÕES COM RPCs

- A deteção do muão ao longo dos planos dos vários detetores dá-nos a **direção da sua trajetória**.





■ GEANT4



- É uma **ferramenta de software desenvolvida pelo CERN** (o laboratório do Grande Colisor de Partículas) **desenhada para simular o percurso das partículas**.
- **Inclui inúmeros recursos** que permitem, por exemplo, reconstruir a geometria do local em estudo ou rastrear a trajetória das partículas.
- A grande vantagem é que **permite aos investigadores dedicarem-se aos aspetos mais importantes da simulação**, por automatizar muitos detalhes iniciais.

TOMOGRAFIA DE MUÕES

■ VANTAGENS

- A técnica:
 - é não invasiva, permitindo fazer uma visualização remota.
 - o telescópio consome pouca energia (na ordem de $\sim 10^1$ watts) dado que usa radiação natural.

■ DESVANTAGEM:

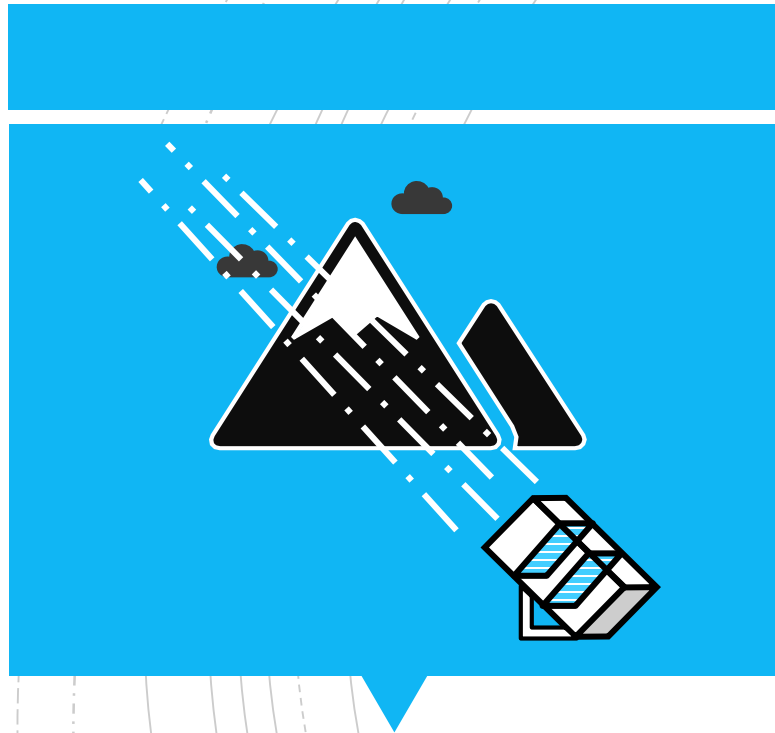
- a observação só pode ser feita acima do plano horizontal em relação aos detetores.

■ Os muões:

- são naturalmente abundantes e acessíveis em todo o globo terrestre.
- podem atravessar locais sem acesso físico, potencialmente perigosos ou blindados.



TOMOGRÁFIA POR TRANSMISSÃO DE MUÕES



■ TOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO DE MUÕES

- O **telescópio** é colocado virado na direção do objeto em estudo e **regista a transmissão e a absorção dos muões que o atravessam**, vindos dessa direção.
- Quanto **maior a energia de um muão**, mais matéria consegue **atravessar** antes de ser absorvido.
- Quanto **mais denso o material**, mais muões são **absorvidos** e menos deles atingem o telescópio nessa direção.



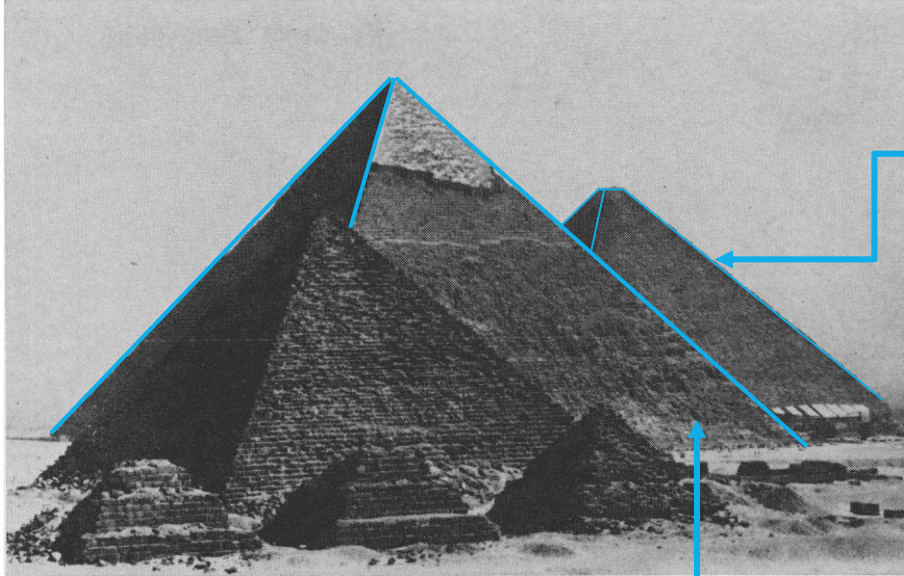
■ TOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO DE MUÕES

- O conjunto dos impactos registados produz imagens parecidas a radiografias, chamadas de muografias.
- A tomografia de muões permite assim, inferir a distribuição das densidades médias da observação com base no fluxo de muões transmitido e absorvido.
- Movendo o detetor de posição, faz-se o registo em diferentes direções, depois, combinando os resultados, é possível recriar uma imagem 3D do interior do objeto.

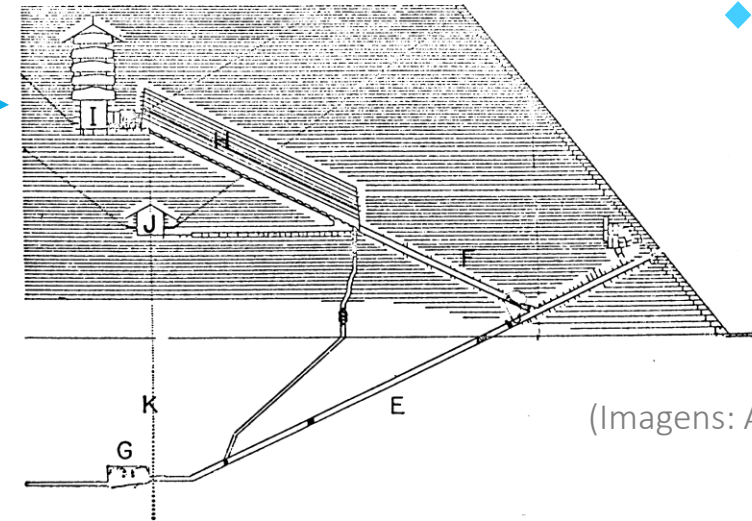
TOMOGRAFIA NAS PIRÂMIDES

Por volta de 1969, Luis Alvarez e a sua equipa, utilizaram esta técnica para procurar câmaras escondidas dentro da pirâmide de Quéfren, a segunda maior das pirâmides de Gizé.

Concluiu-se que não haviam mais câmaras no interior da pirâmide de Quéfren.

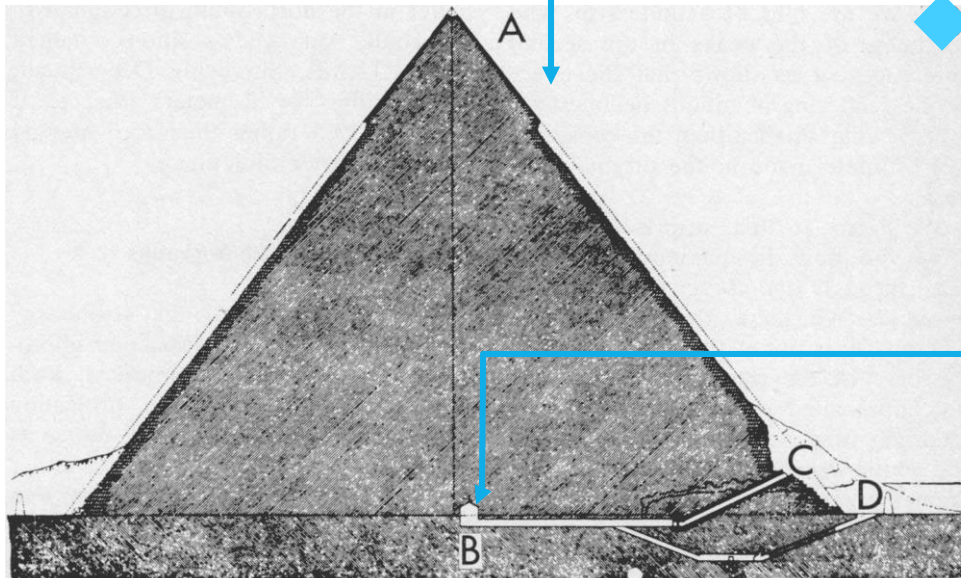


■ Pirâmides de Gizé.

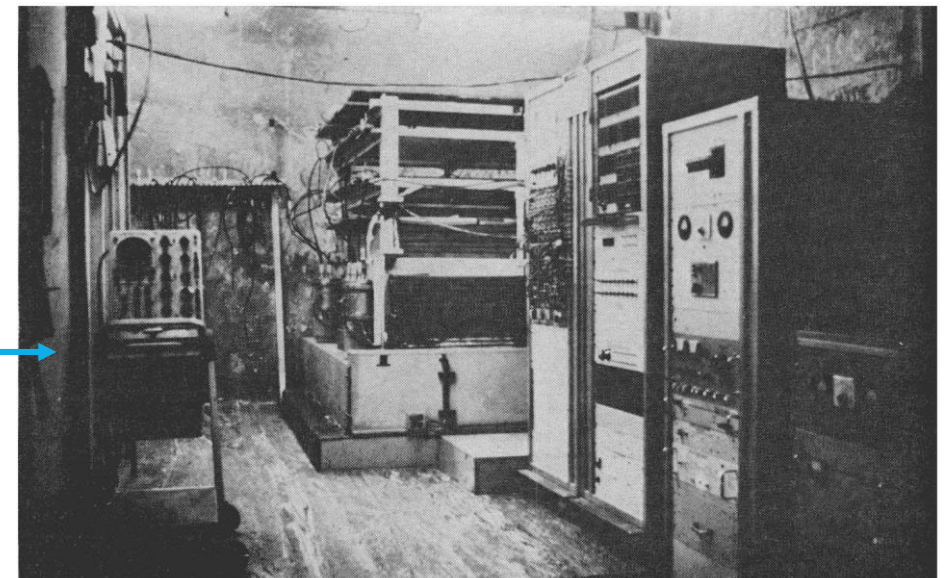


(Imagens: Alvarez *et al*, 1970)

■ Câmaras interiores da pirâmide de Quéops.



■ Interior da pirâmide de Quéfren.



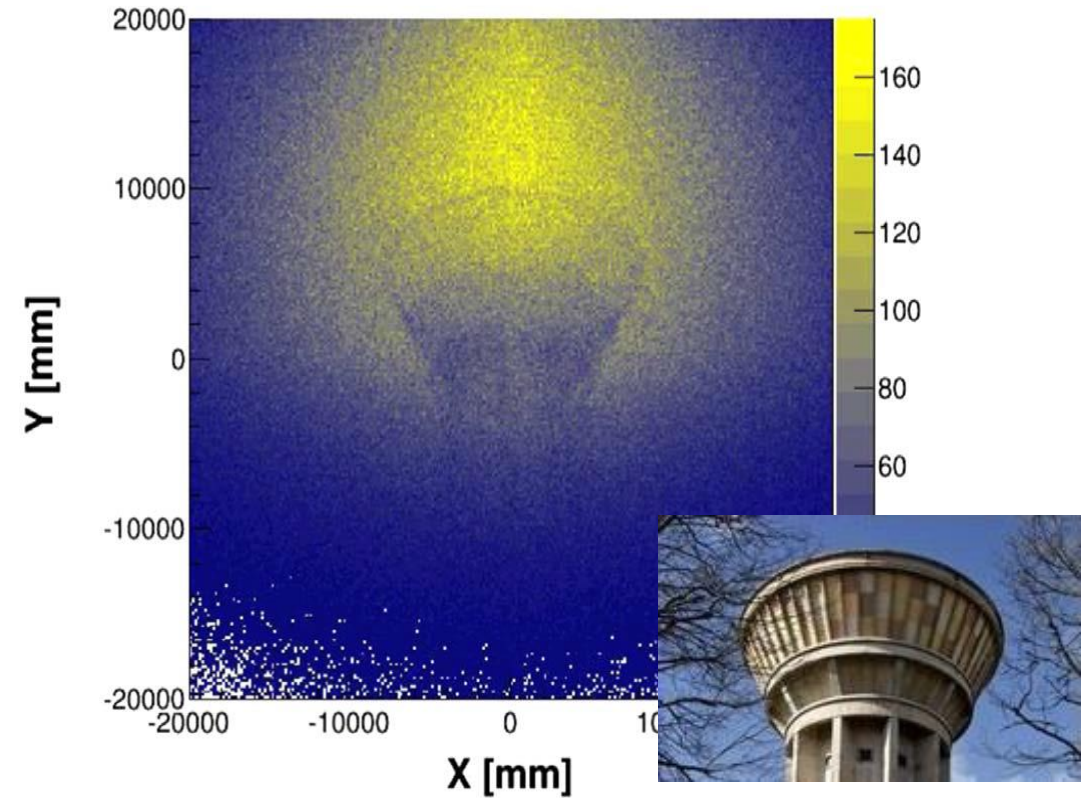
■ Equipamento de deteção colocado na câmara interior da pirâmide de Quéfren.

EXPERIÊNCIA WATTO

Em 2016 foram publicados os resultados desta experiência, que teve como objetivo validar a capacidade da tomografia de muões. A torre de água de Saclay, em França, foi usada como objeto de teste.



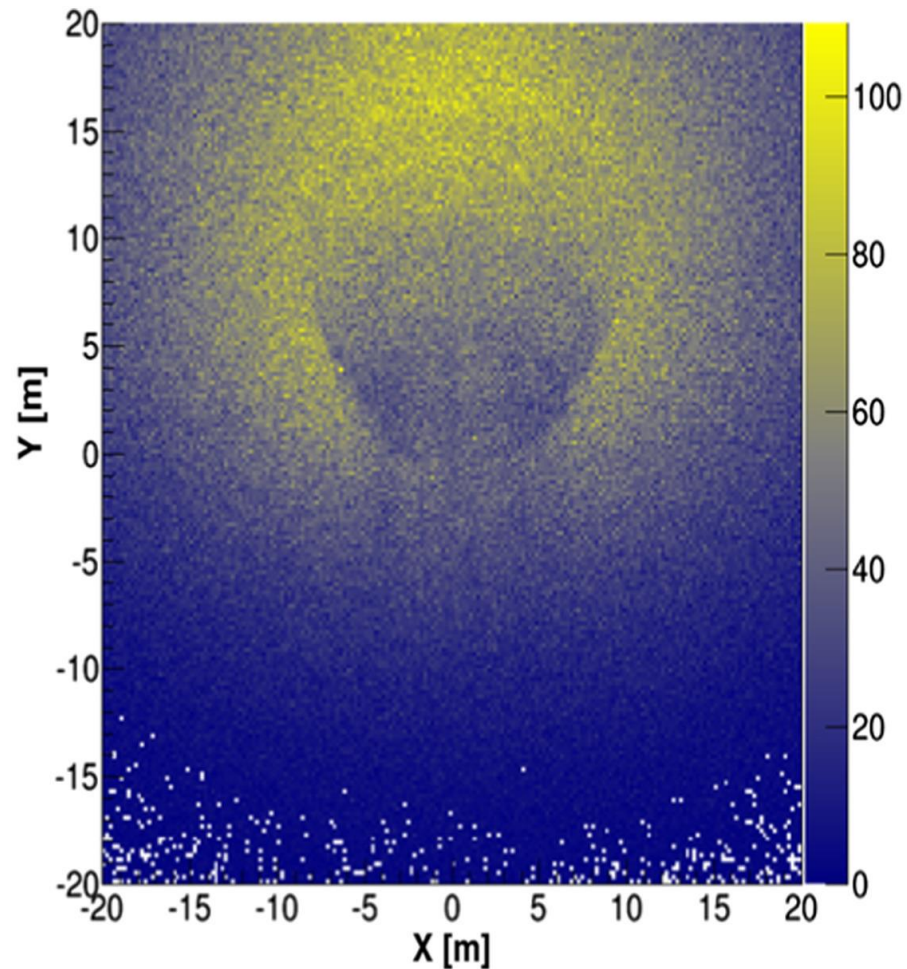
- Telescópio usado na experiência WatTo, com um peso total superior a 100 kg e detetores quadrados de 50 cm.



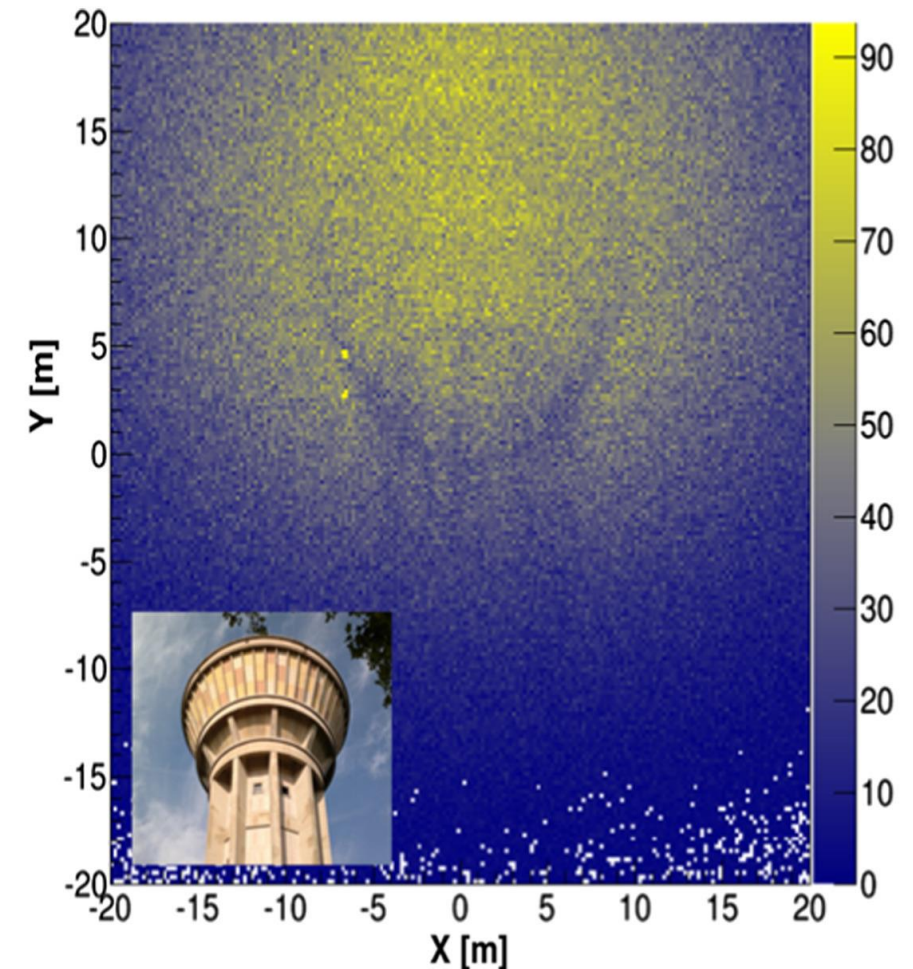
- Muografia obtida da torre de água de Saclay ao fim de 4 semanas de exposição.

EXPERIÊNCIA WATTO

Imagens sem tratamento da tomografia realizada na torre de água de Saclay. Cada imagem contém dados de 4 dias de exposição.



■ Torre de água de Saclay com água.



■ Torre de água de Saclay sem água.

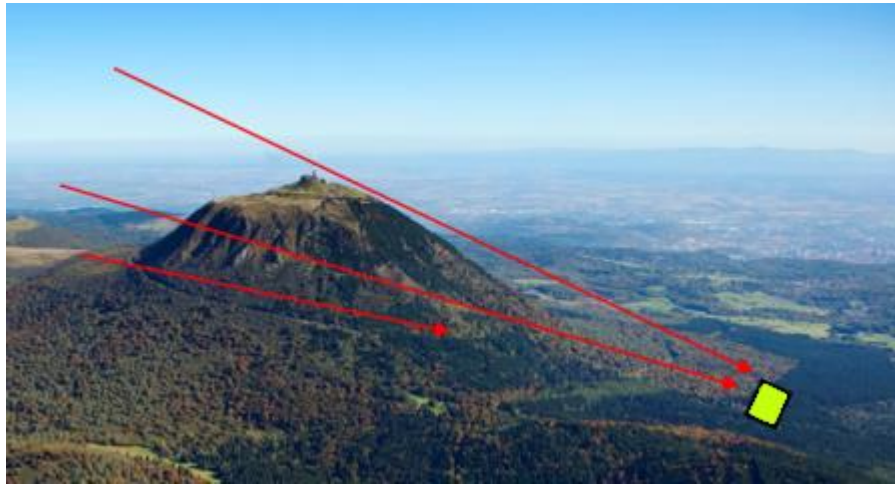
A [habilidade de detetar variações de densidade](#) é uma característica essencial em telescópios de muões.

VULCÃO PUY DE DÔME

Puy de Dôme é um domo vulcânico localizado no centro de França.

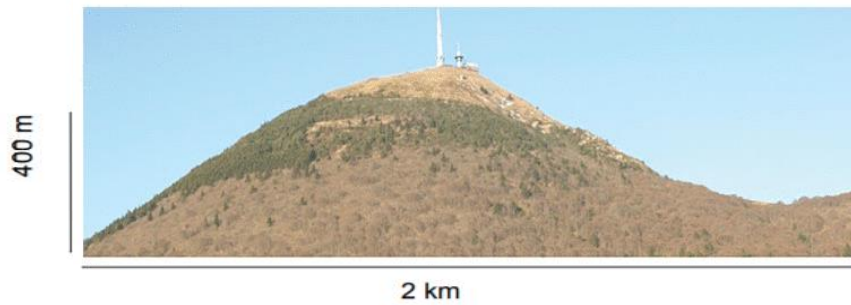
Desde 2010, a cientista Cristina Cârloganu tem desenvolvido estudos neste vulcão utilizando a tomografia de muões.

Localização do telescópio TuMoVol no sopé do vulcão

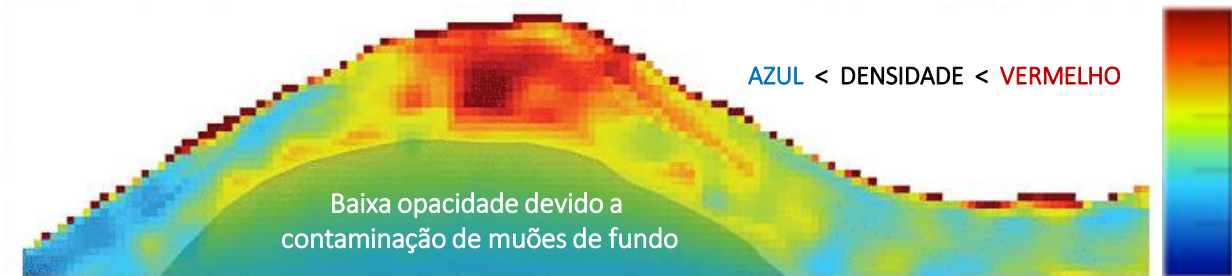


- O interior do vulcão e a sua estrutura geológica já são bem conhecidos, o que faz dele um excelente meio de confirmação da aplicação da tomografia na vulcanologia.
- A imagem abaixo é o resultado da densidade integrada do vulcão ao longo de diferentes direções de observação. É possível relacionar o resultado com a geologia do vulcão observada no local.

Vista de Puy de Dôme a partir do local do telescópio



Estrutura interna observada através da muografia realizada com o telescópio ToMuVol



(Imagens: C. Cârloganu, 2012)

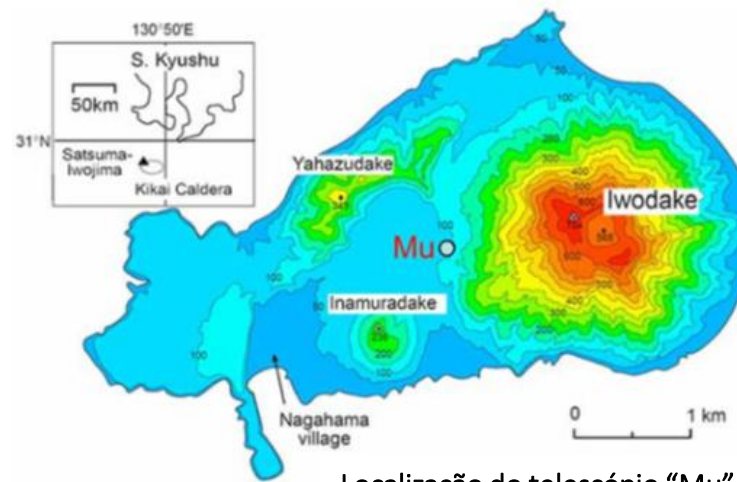
ILHA SATSUMA-IWOJIMA

O Monte Iwodate é um vulcão ativo situado na Ilha Satsuma-Iwojima no Japão.

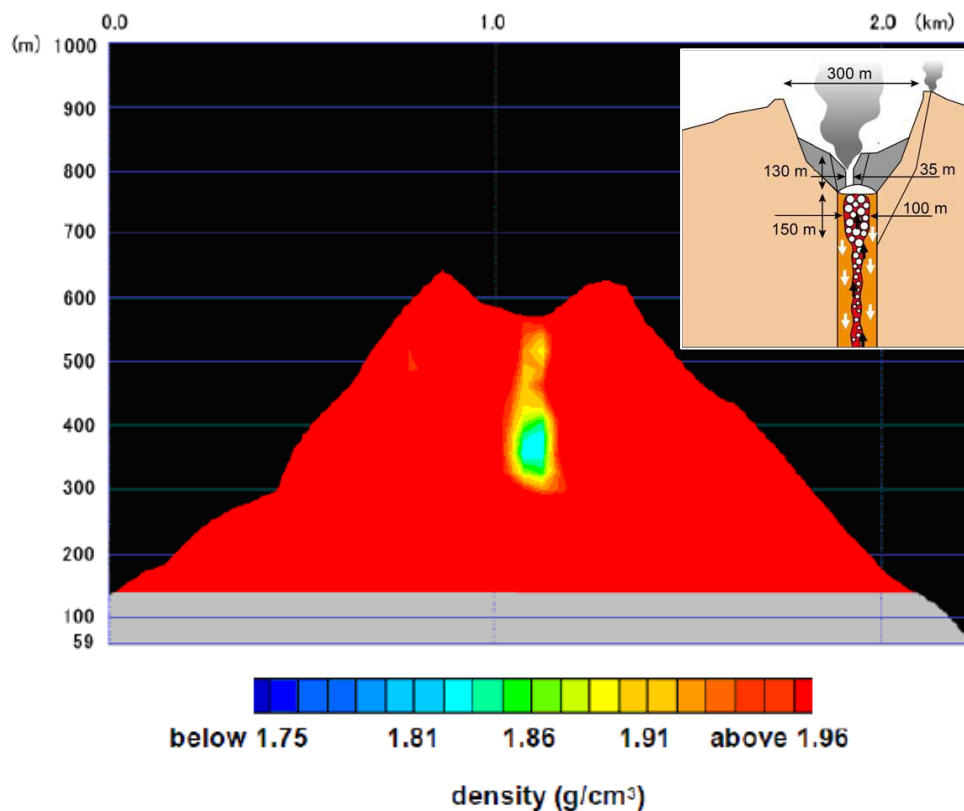
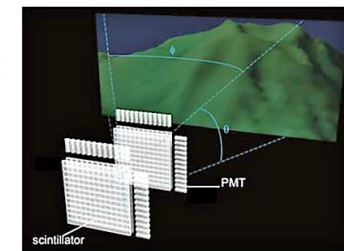
O trabalho de muografia realizado no local por Tanaka *et al.* (2010) identificou a localização da chaminé vulcânica no interior do vulcão.



Monte Iwodate



Localização do telescópio “Mu” na Ilha Satsuma-Iwojima

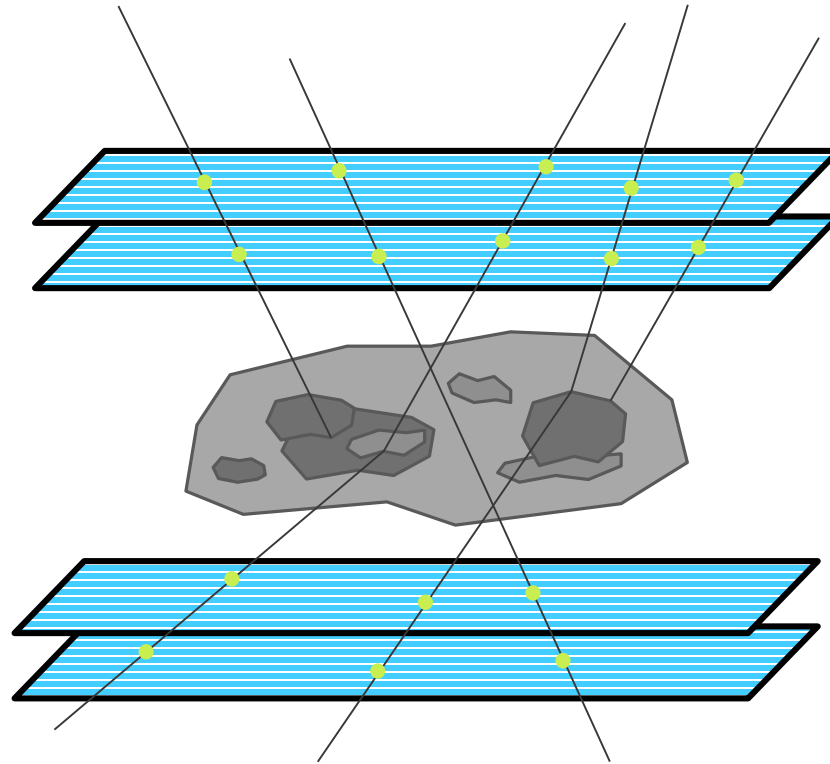


- Os detetores possuíam uma área de 1 m^2 e eram constituídos por uma matriz de 12×12 pixels de 8 cm .
- Distribuição das densidades médias da região da chaminé vulcânica no interior do cone vulcânico.
- A forma da chaminé está de acordo com o modelo do fluxo do magma responsável pela libertação dos gases.

◆ (Imagens: Tanaka *et al.*, 2009)

TOMOGRAFIA POR DISPERSÃO DE MUÕES

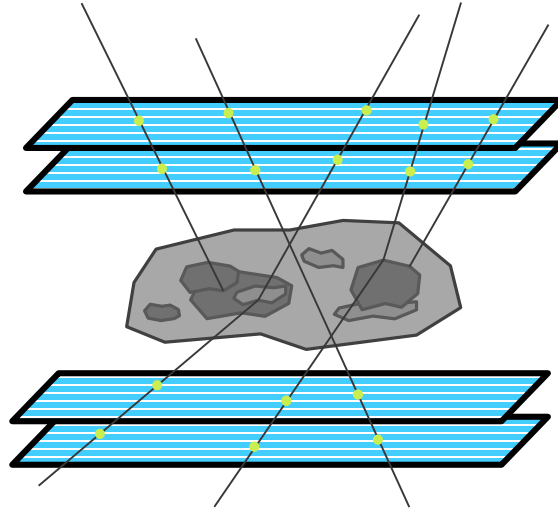
TOMOGRAFIA POR DISPERSÃO



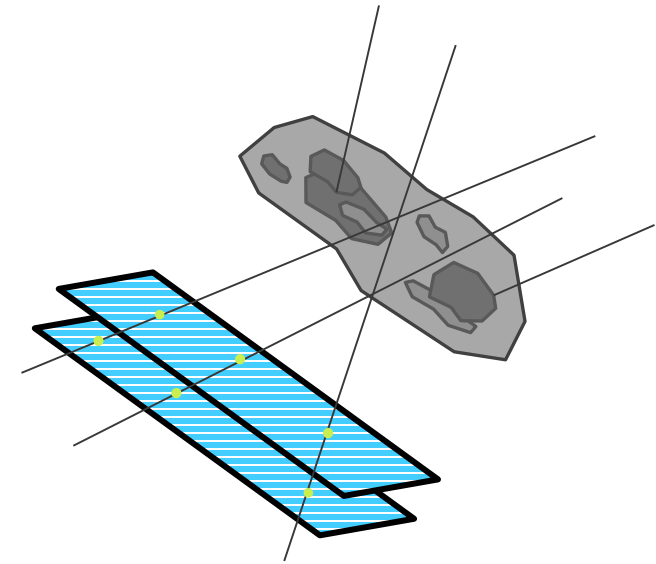
- Usa dois telescópios para realizar a observação.
- Usada nos casos onde é possível observar o objeto de dois lados opostos.
- A direção das trajetórias de entrada e de saída dos muões são registadas.

TOMOGRAFIA DE MUÕES

TOMOGRAFIA POR DISPERSÃO VS. TOMOGRAFIA POR TRANSMISSÃO

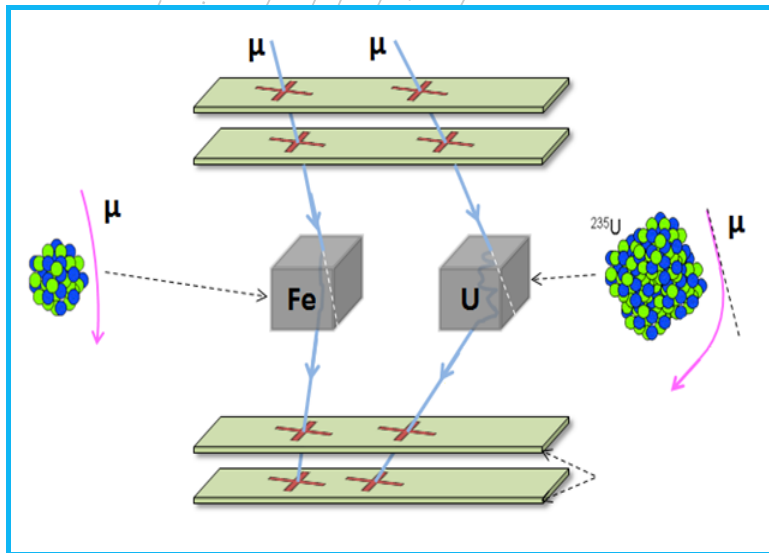


- Contempla o efeito de dispersão dos muões ao atravessar a matéria.
- Localiza o material denso mais rapidamente e fornece uma informação mais rica.
- A dimensão do material precisa de caber entre os dois telescópios.



- Admite apenas a absorção dos muões e a sua transmissão através da matéria num percurso essencialmente retilíneo.
- Deteta o material mais denso mas para o localizar é preciso “olhar” de outras direções.
- Permite observar em qualquer escala.

■ TOMOGRAFIA POR DISPERSÃO DE MUÕES

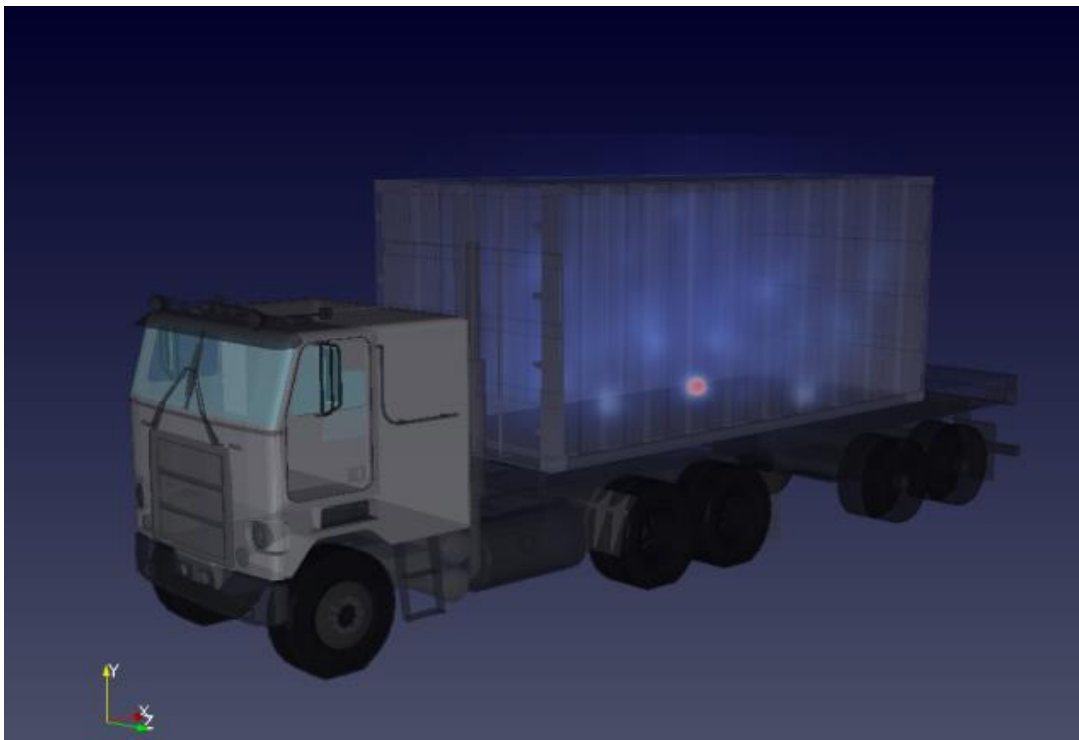
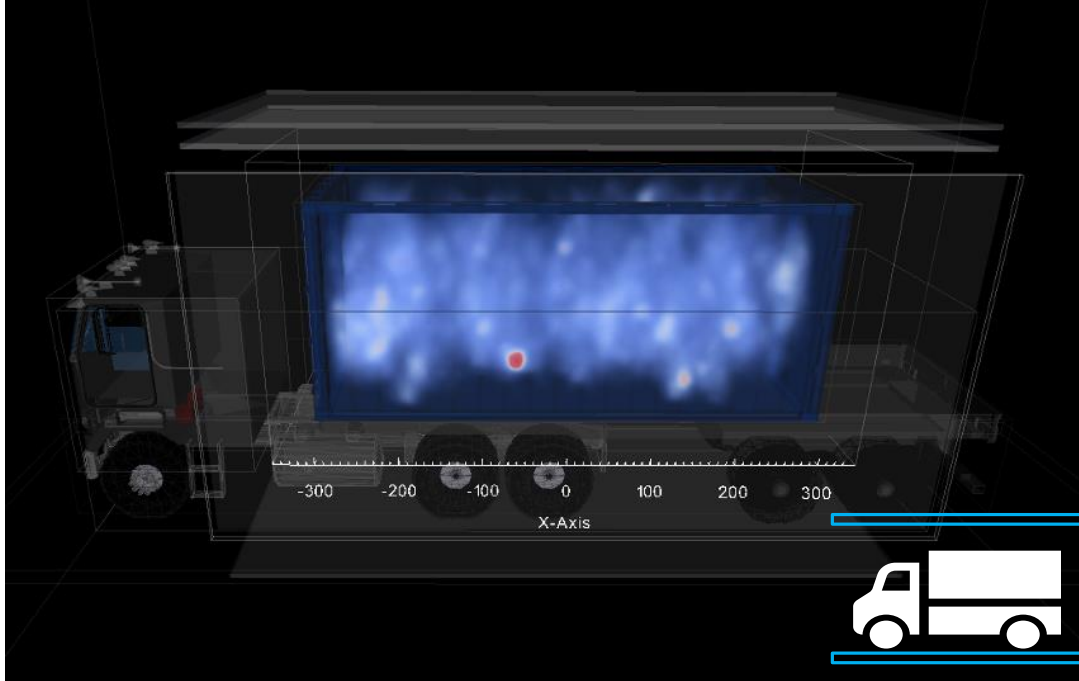


(Imagem: CERN)

- Foi desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Los Alamos, em 2003, como uma medida de detetar contrabando de material nuclear dentro de camiões.
- Materiais com grande número atômico são capazes de provocar pequenas deflexões na passagem de um muão e ainda que o ângulo de deflexão seja quase zero, a soma das sucessivas deflexões ao longo da sua trajetória, provoca um efeito de dispersão detetável.
- Este fenómeno é conhecido por **dispersão múltipla de Coulomb** e pode ser usada para **reconstruir um mapa tridimensional com as densidades relativas** do volume atravessado.

DETEÇÃO DE MATERIAL RADIOATIVO

Simulação realizada pelo Laboratório Nacional de Legnaro (Itália) usando tomografia por dispersão de múons.



- O transporte de sucata para fábricas de fundição, onde por vezes se encontra material radioativo perdido, representa um risco para a saúde e o ambiente.
- A simulação reproduz um camião transportando um contentor com sucata metálica e, em vez de material radioativo, contém um pequeno volume de chumbo.
- O chumbo está blindado pela sucata envolvente e seria muito difícil de detetar com outras técnicas a não ser com os múons.
- A deteção tem de ser conseguida em apenas alguns minutos.

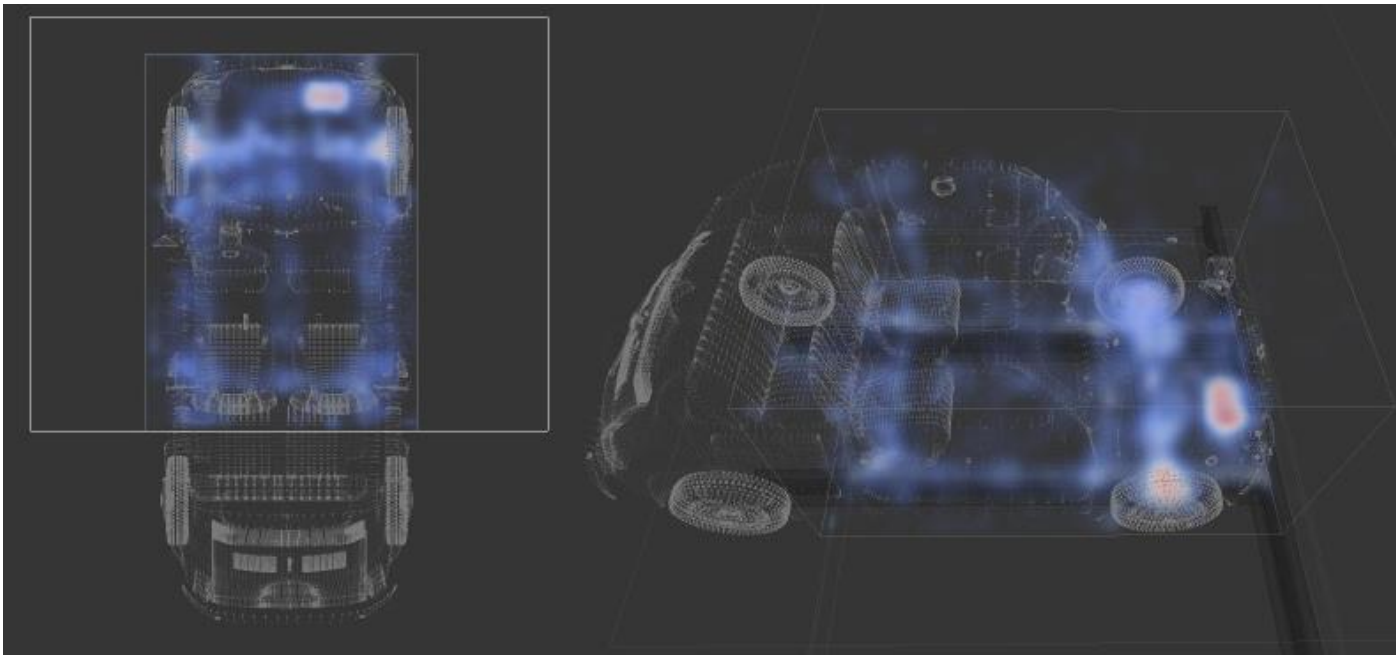
(Imagens: CMTp)

SISTEMA DE DETEÇÃO

Telescópio protótipo do Laboratório Nacional de Legnaro (Itália).



- Para assegurar a validade da simulação com o camião, foi testado um veículo funcional no protótipo do sistema de deteção de muões criado pelo laboratório.



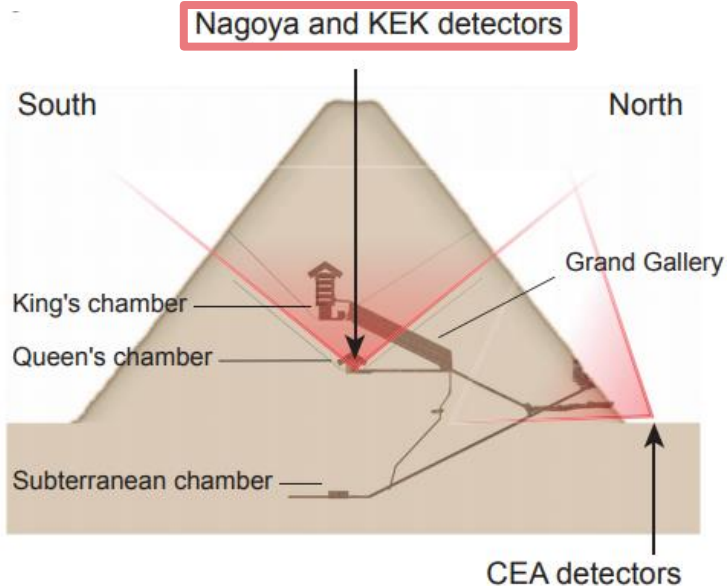
- A reconstrução obtida distinguiu claramente a bateria do carro como o volume mais denso da estrutura, mostrando a viabilidade do processo.

(Imagens: CMTp)

CASOS DE REFERÊNCIA

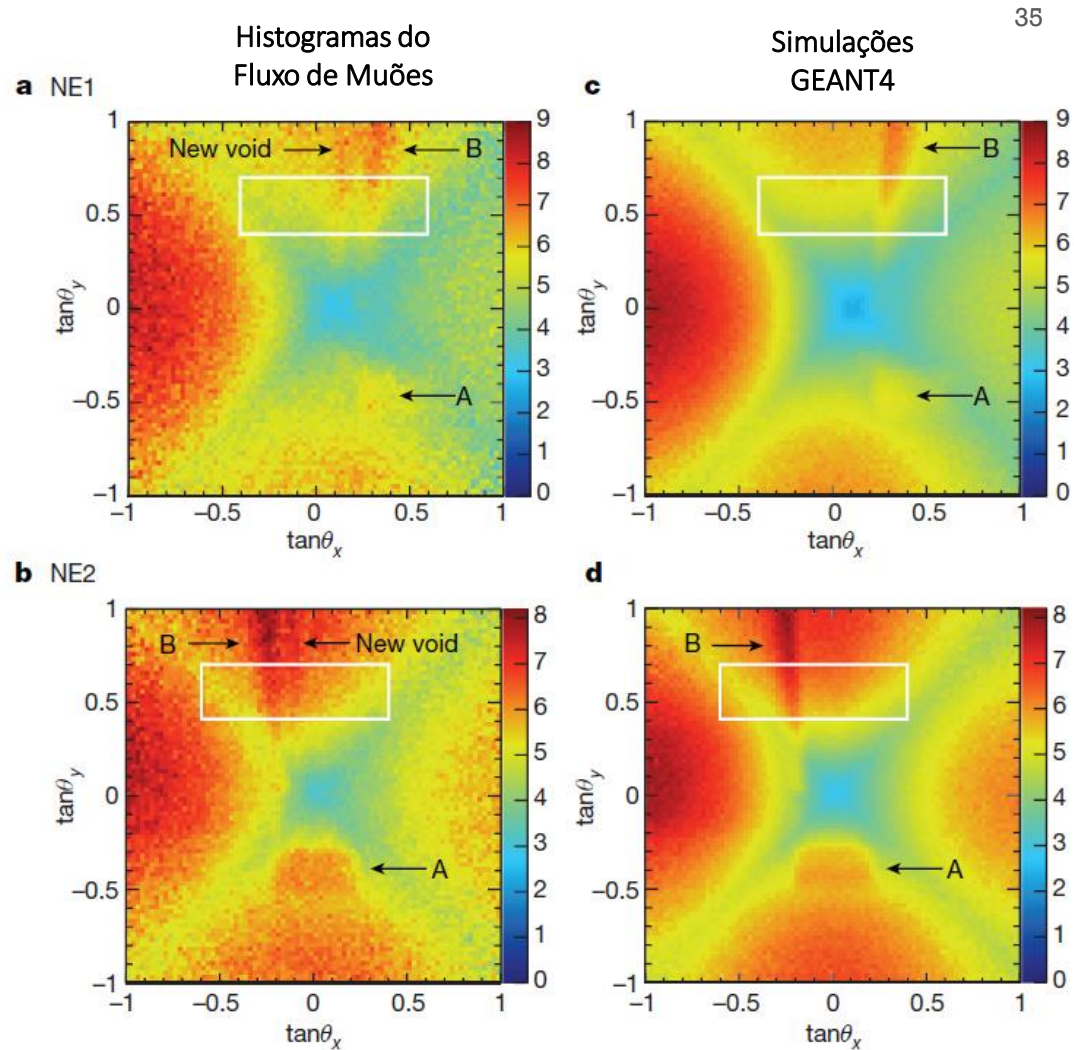
PIRÂMIDE DE QUÉOPS

O projeto ScanPyramids é uma missão interdisciplinar que arrancou em 2015, com o objetivo de estudar o interior de várias pirâmides no Egito. Para isso, utiliza tomografia de muões para perscrutar o interior dos monumentos.



- Telescópio KEK, colocado no interior da Câmara da Rainha.

(Imagens: Morishima *et al*, 2017)

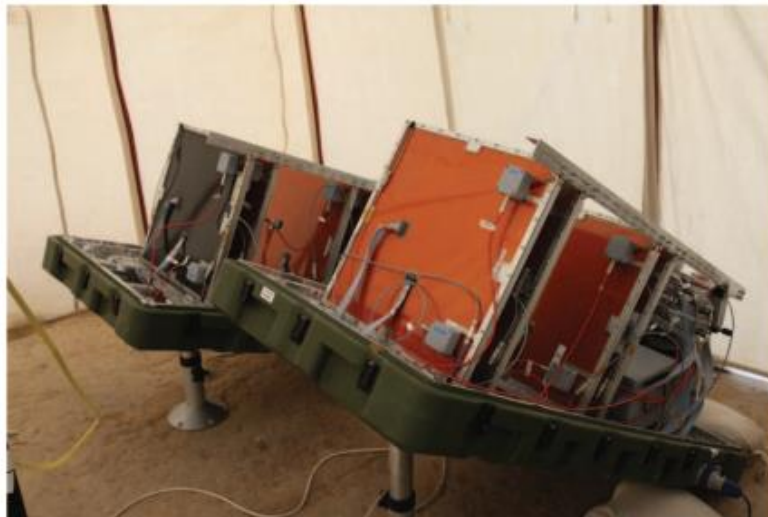
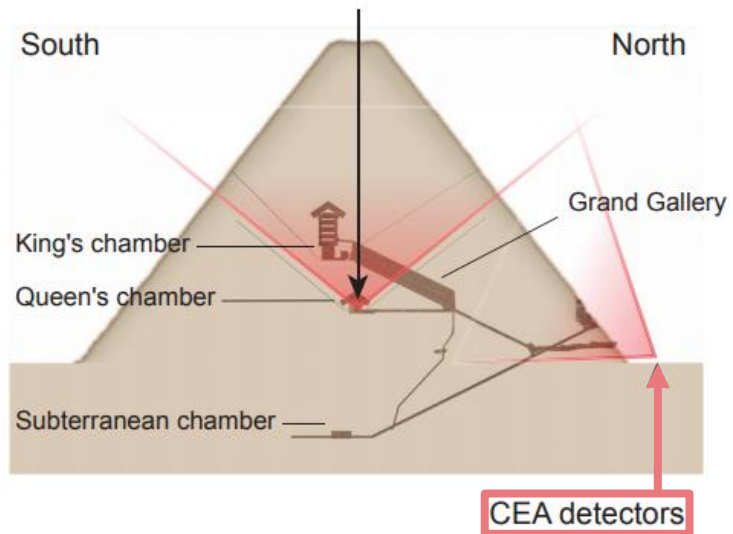


- Imagens da pirâmide de Quéops após tratamento, obtidas pelos detectores de muões KEK e simulações. (A – Câmara do Rei, B – Grande Galeria)

PIRÂMIDE DE QUÉOPS

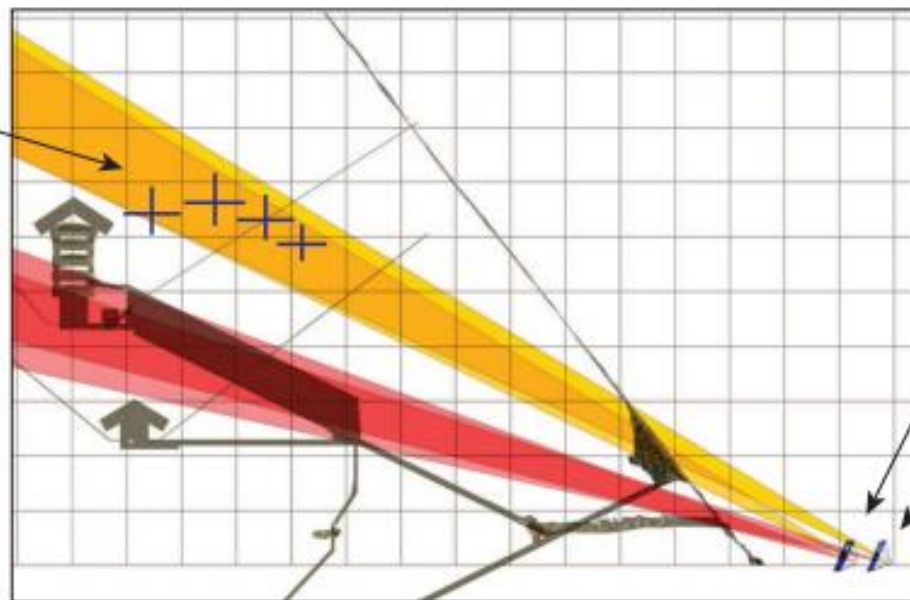
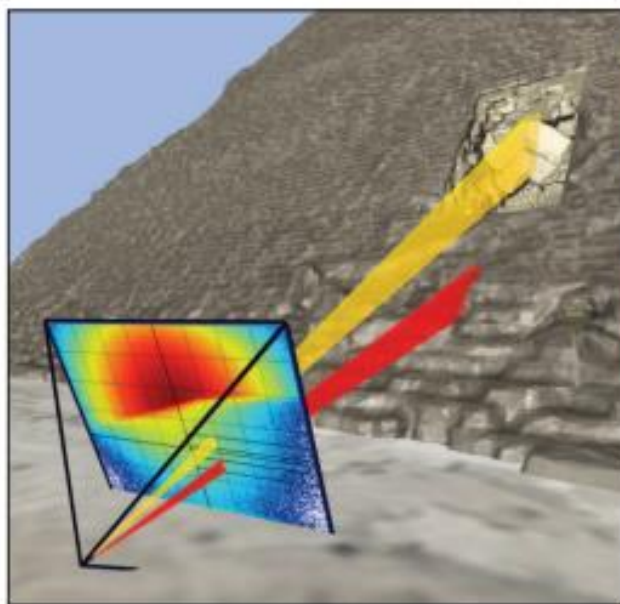
Para confirmar a descoberta, foram colocados dois telescópios adicionais, fora da pirâmide, direcionados de frente para Grande Galeria.

Nagoya and KEK detectors



36

- Telescópios CEA, equipados com detetores RPCs.



G1 (Alhazen)

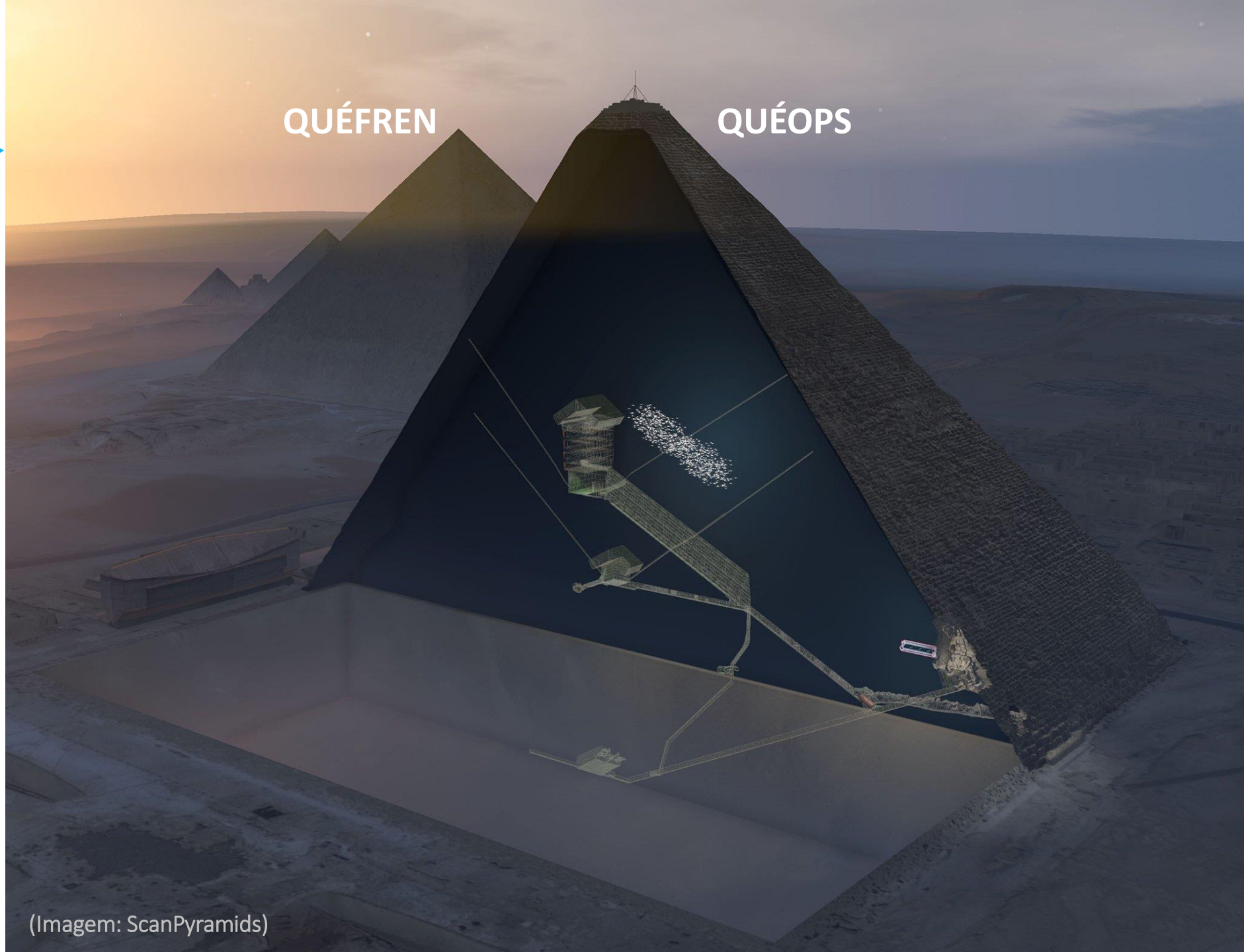
G2 (Brahic)

- Confirmação de um espaço vazio por cima da Grande Galeria

(Imagens: Morishima *et al*, 2017)

Até ao momento, concluiu-se que existe um espaço vazio localizado a 40 ou 50 metros acima da Câmara da Rainha, com um comprimento superior a 30 m e uma largura semelhante à da Grande Galeria.

Além disso, foi descoberto também um pequeno túnel horizontal, anteriormente desconhecido, junto à entrada da pirâmide



(Imagem: ScanPyramids)

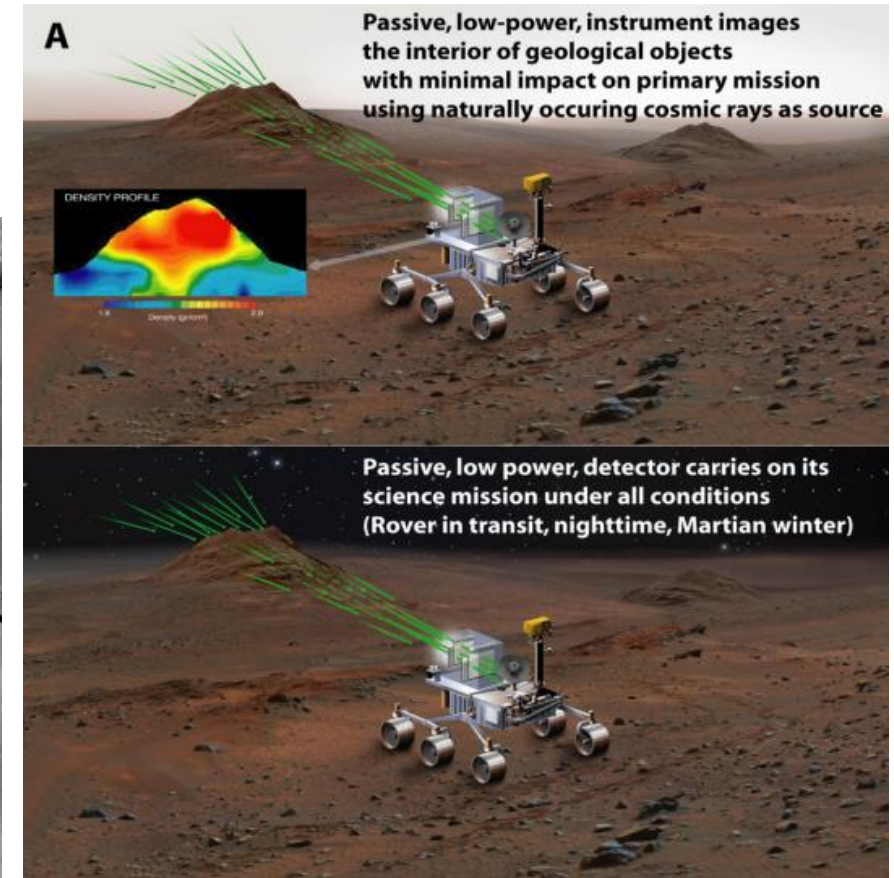
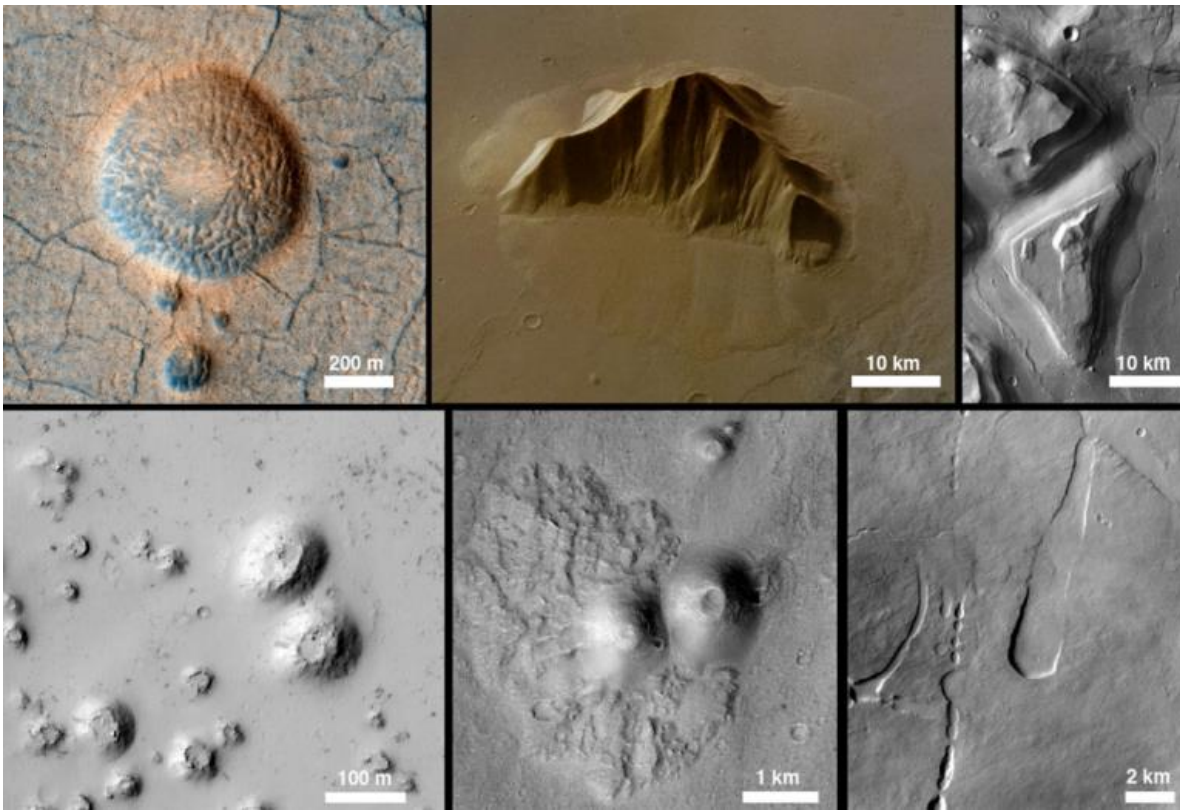
TOMOGRAFIA DE MUÕES EM MARTE

Apesar da atmosfera fina apresentada por Marte, estudos indicam que o fluxo de muões que chegam à sua superfície será semelhante ao observado na Terra.



(Imagem esquerda: PD-US)

- A instalação de detetores de muões em *rovers* enviados a Marte, permitiria conhecer melhor inúmeras estruturas geológicas observadas na superfície marciana.
- Como a tomografia não depende da luz solar, o trabalho pode continuar sob quaisquer condições meteorológicas.



(Imagens: Kedar et al., 2013)

▼
FIM

OBRIGADO PELA
VOSSA ATENÇÃO ◆

