

Medida da atenuação de raios cósmicos num edifício

José Alves¹, Nuno Castro^{1,2,3}, Raul Sarmento^{1,3}

¹ Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas - LIP

² Departamento de Física, Escola de Ciências da Universidade do Minho

³ Divisão de Física de Partículas da Sociedade Portuguesa de Física

Introdução

O fundo de radiação ambiente tem duas componentes predominantes, com origens distintas: a terrestre e a cósmica. Há ainda uma terceira componente, com origem humana, significativa apenas em alguns locais específicos do planeta: a radiação proveniente de reatores ou explosões nucleares [1].

A radioactividade terrestre tem origem nos radionuclídeos presentes no solo e nas estruturas dos edifícios. Estes radionuclídeos são produzidos nas cadeias de decaimento dos elementos pesados que, por sua vez, foram produzidos em processos de nucleossíntese estelar há mais de 4500 milhões de anos e integraram a nébula solar. Há quatro cadeias de decaimento radioactivo: as séries do tório, do neptúnio, do urânio e do actínio. Um exemplo conhecido é o radão, que é produzido na série do urânio e escapa dos seus locais de produção para a atmosfera, formando um gás.

A radiação emitida pelos radionuclídeos é maioritariamente constituída por partículas alfa (núcleos de hélio) com energias típicas da ordem dos MeV, partículas beta (electrões ou positrões, com centenas de keV), e partículas gama (fotões, com energia que varia entre os keV e os MeV), estas últimas emitidas em processos de desexcitação nuclear [2].

A outra componente relevante do fundo de radiação ambiente é originada por raios cósmicos. Estas partículas de origem astrofísica são maioritariamente prótons que se propagam no universo com energias que em alguns casos (raros) atingem valores extremos, acima dos 100 EeV. Ao atingirem a Terra, interagem na atmosfera e iniciam a produção de um número grande de partículas secundárias, maioritariamente fotões, electrões (e positrões), neutrinos, muões, nucleões, piões e outros hadrões.

Devido à absorção na atmosfera terrestre, e se exceptuarmos os neutrinos, ao nível do mar o fluxo de energia dos raios cósmicos secundários é dominado pelos muões, com um fluxo de aproximadamente 1 muão por segundo e por dm^2 horizontal (sensivelmente a área da palma da mão) e uma energia média de 4 GeV [3].

Dadas as características da sua produção ao longo da atmosfera, os muões têm direções em torno da vertical, com o sentido de cima para baixo. Assim sendo, e uma vez que os muões com energias mais baixas perdem toda a sua energia ao atravessarem os pisos de um edifício, será de esperar que o fluxo de muões cósmicos nos pisos inferiores de um edifício seja menor do que nos superiores.

No âmbito deste trabalho, propomos fazer medidas do fundo de radiação ambiente com o objectivo de observar a atenuação de raios cósmicos num edifício.

Procedimento experimental

As medidas foram feitas no LIP-Minho, no campus de Gualtar da Universidade do Minho, em Braga. O edifício em causa tem cinco andares, separados por pisos de betão, cuja espessura se estima ser de 40 cm.

Para a realização da experiência foram utilizados os seguintes componentes, mostrados na Fig. 1:

- 1 - *Arduino Nano* [4];
- 1 - *Radiation board* da Libelium, que inclui um tubo de Geiger com 1,1 cm de diâmetro, 11,1 cm de comprimento e que funciona a uma tensão de 350 V;
- 1 - Leitor Micro SD Card para Arduino;
- 1 - *Breadboard*;
- Cabos *jumper* para *breadboards*;
- 1 - *Power Bank*;
- Papel de alumínio;
- 6 - Placas de chumbo.

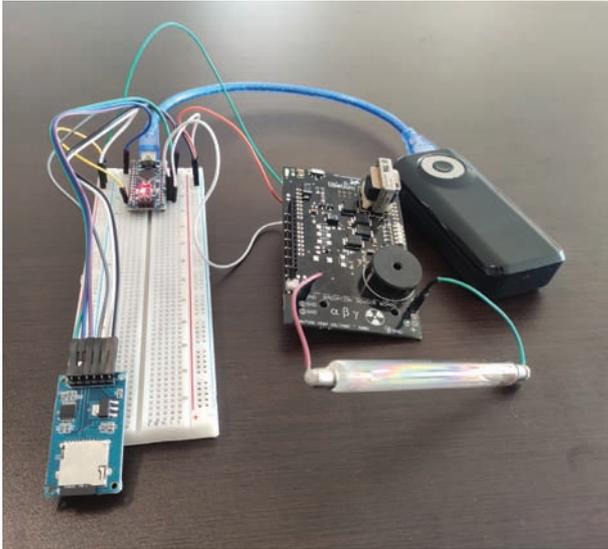


Figura 1 - A *breadboard* com o *arduino nano* e o leitor de cartão MicroSD, a *Radiation board* com o tubo de Geiger, e a fonte de alimentação.

Após obtermos todo o material, cujo custo rondou os 150 € (excluindo as placas de chumbo), utilizámos as bibliotecas disponíveis no *arduino* e o código fornecido pelo Libelium [5] para programar o nosso contador de Geiger e fazer com que os dados obtidos ficassem guardados num cartão MicroSD, para posterior tratamento.

Entretanto, fizemos uma caixa com as placas de chumbo, para que fosse possível colocar o tubo detector dentro desta e utilizá-la como um escudo da radiação ambiente com origem terrestre. Utilizámos seis placas de chumbo: quatro placas com 1 cm de espessura, uma com 0,5 cm de espessura e uma outra com 5 cm de espessura.

A aquisição de dados processou-se da seguinte forma:

- Em primeiro lugar, recolhemos amostras de uma hora fazendo variar o ângulo de inclinação do tubo de Geiger em relação à vertical. Isto serviu para verificar se haveria alguma dependência proveniente p.ex. da distribuição angular da componente muónica da radiação.
- Seguidamente, realizámos medições de uma hora em diferentes pisos do edifício, sem isolar o detector, para vermos se haveria alguma atenuação causada pelo edifício. Note-se que tivemos o cuidado de manter sempre o tubo detector a um ângulo de 90° em relação à vertical.
- Depois, recolhemos dados de uma hora no mesmo piso, mas desta vez utilizámos o papel de alumínio e as placas de chumbo para ver se era possível detectar uma redução do fundo de radiação ambiente. Nesta parte, foram isoladas as extremidades do tubo detector, pois poderíamos causar um curto-circuito no nosso sistema.

- Finalmente, efetuámos medidas de cinco horas em três pisos diferentes usando a caixa de chumbo, para verificarmos se haveria ou não uma atenuação da componente muónica provocada pelo edifício.

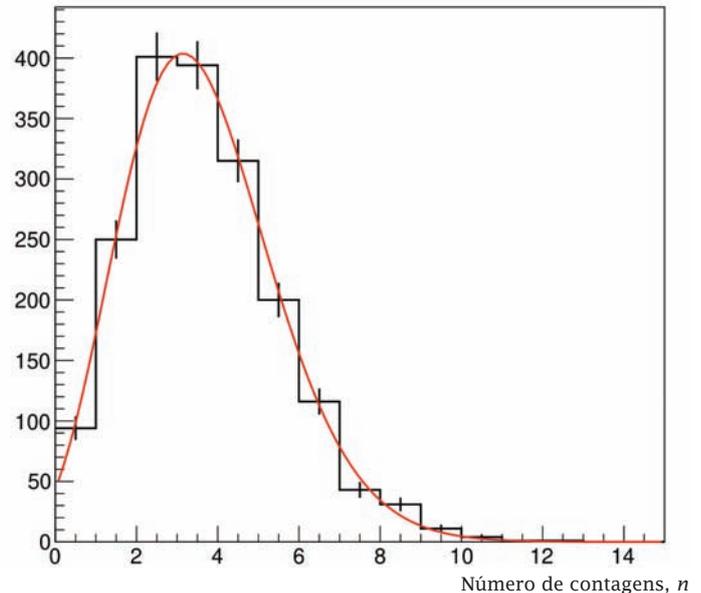


Figura 2 - Histograma das contagens cada 10 s, com o ajuste de uma distribuição de Poisson.

Na Fig. 2 podemos ver um exemplo de um histograma que contabiliza as contagens no detector cada 10 segundos. Foi ajustada ao histograma uma distribuição de Poisson, que o descreve quase na perfeição.

Resultados e discussão

Para podermos interpretar os resultados, temos de perceber como são geradas as contagens no detector. O tubo de Geiger utilizado é sensível a todas as partículas da radiação ambiente que atravessam o vidro e provocam uma ionização no gás de néon, existente no seu interior, com potencial de ionização de 21,6 eV [6].

As partículas alfa, assim como os prótons e restantes núcleos atômicos, não penetram no vidro e não são detectadas. As partículas beta e os muões atravessam o vidro e ionizam o gás. As partículas gama atravessam o vidro, mas a pressão no gás (~0,1 atm) é demasiado baixa para que as interações com este sejam significativas. No entanto, há uma pequena fracção de gamas que interage no vidro, por efeito fotoelétrico ou de Compton, gerando carga que, por sua vez, ioniza o gás. Como valores indicativos, a eficiência de detecção de partículas gama e beta com 1 MeV e de muões com 1 GeV é, respectivamente, de 0,5 %, 60 % e ~100 %, obtida a partir de uma simulação do aparato experimental feita com o programa Geant4 [7]. Estes valores foram obtidos através da injeção dos diferentes tipos de partículas ao longo da área activa do tubo de Geiger e dizem respeito a eficiências médias.

A Fig. 3 mostra o valor médio (e o desvio padrão) da taxa de contagens no tubo de Geiger, obtido do ajuste à respectiva distribuição de Poisson, para diferentes inclinações do tubo, em que 0° corresponde ao tubo disposto na vertical e 90° corresponde ao tubo disposto na horizontal. Foram fei-

tos dois conjuntos de medições, com e sem alumínio, mas a diferença entre os dois conjuntos no ponto de ângulo coincidente não é estatisticamente significativa.

Observa-se o aumento da taxa de contagens com o ângulo. Este aumento é compatível com um fluxo anisotrópico das partículas que dão as contagens. Mais ainda, indica um fluxo com predominância vertical, pois a área do tubo projectada no plano horizontal aumenta com o ângulo. Em todas as medições seguintes, o tubo de Geiger esteve disposto na horizontal.

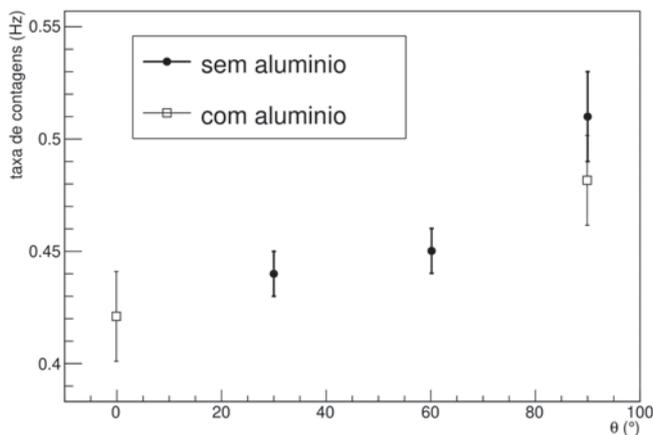


Figura 3 - Taxa de contagens no tubo de Geiger em função da inclinação do tubo relativamente à vertical.

A Fig. 4 mostra os resultados de um primeiro conjunto de medições feitas em diferentes pisos do edifício. A única consideração prévia foi a escolha do tempo de aquisição, de uma hora, com base numa estimativa do tempo necessário para se obter uma incerteza estatística de 2%. Não se observa uma variação do número de contagens em função do piso do edifício, nestas condições de medição.

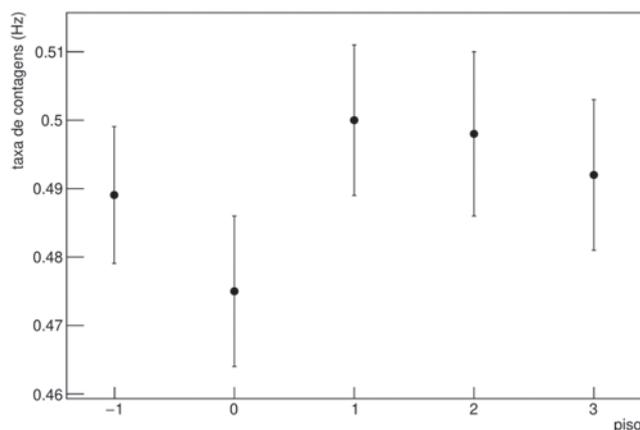


Figura 4 - Medições de uma hora, sem blindagem, em que não há observação da atenuação.

Para explicar a ausência de sensibilidade à atenuação dos muões cósmicos na Fig. 4, colocámos as seguintes hipóteses: a taxa de contagens tem uma contribuição importante de outras partículas que não os muões cósmicos, de modo que a variação no fluxo destes é diluída pelas flutuações estatísticas associadas à medição, ou a redução esperada na

taxa de contagens dos muões é pequena quando comparada com a incerteza estatística da medição.

De modo a testar estas hipóteses, procurámos compreender as componentes do sinal no nosso detector usando dois tipos de blindagem:

- de alumínio, usando uma folha de papel de alumínio enrolada numa espessura total de poucos mm, para bloquear as partículas beta;
- de chumbo, usando placas, para bloquear uma fracção importante das partículas gama.

A quantidade de matéria usada é, mesmo no caso do chumbo, demasiado pequena para que haja uma atenuação assinalável no fluxo de muões cósmicos por efeito da blindagem.

A Fig. 5 mostra os resultados das medições efectuadas com blindagem. É visível a forte diminuição na taxa de contagens quando o detector foi envolvido em completo por chumbo.

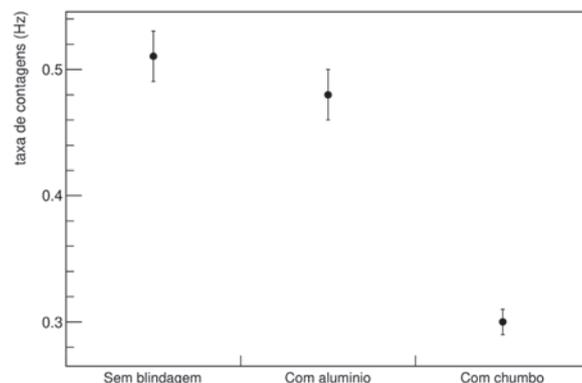


Figura 5 - Medições com as blindagens de alumínio e de chumbo.

Uma vez que a espessura de alumínio usada absorve as partículas beta, podemos concluir que a contribuição destas para a taxa de contagens é pequena. Por outro lado, o número de gamas de 1 MeV de um feixe que incide em 1 cm de chumbo é reduzido aproximadamente para metade. Podemos assim inferir as fracções de contagens provenientes dos betas e dos gamas, sendo o restante a fracção de contagens proveniente dos muões.

A taxa de contagem de muões que estimamos com base nestas considerações (i.e. a blindagem de chumbo absorve as partículas beta e metade das partículas gama) - pouco rigorosas, pois usam valores aproximados e não têm em conta múltiplos fatores, tais como os espectros de energia ou as distribuições angulares - é equivalente a 0,12 Hz. Curiosamente, esta grandeza coincide com a taxa estimada diretamente a partir da multiplicação da área de secção horizontal do tubo de Geiger, a pelo fluxo de muões ao nível do mar, ϕ ,

$$\tau = \phi \times a = 0,01 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \times 1,1 \text{ cm}^2 = 0,12 \text{ Hz} \quad (1)$$

Estas observações são compatíveis com as hipóteses anteriormente colocadas. Para reduzir o efeito das flutuações estatísticas associadas às contagens de outras partículas que não os muões, a estratégia seguida consistiu em realizar medições com a blindagem de chumbo e um tempo de aquisição maior. A questão que então se coloca é saber, nestas condições, qual é o tempo de aquisição necessário para que a redução na taxa de contagens devida à atenuação dos muões pelo edifício tenha significância estatística.

A equação de Bethe-Bloch fornece uma expressão para o valor médio da energia perdida, por unidade de distância percorrida, por uma partícula com carga elétrica ao atravessar um meio material, devido à excitação ou ionização dos átomos deste. Para os muões cósmicos, que são partículas relativistas e mip (do inglês “minimum ionizing particles”), este valor corresponde a cerca de $2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$. A espessura de betão (com densidade de $2,3 \text{ g cm}^{-3}$) que um muão atravessa entre o piso superior e o piso inferior do edifício é de 160 cm, pelo que perde, em média, um total de 736 MeV nesse percurso. Note-se que este valor é relativo a um muão vertical e que uma análise mais rigorosa teria de considerar o ângulo médio de incidência dos muões.

A Fig. 6 mostra a simulação do espectro de energia dos muões cósmicos, adaptado para uma altitude de 200 m.

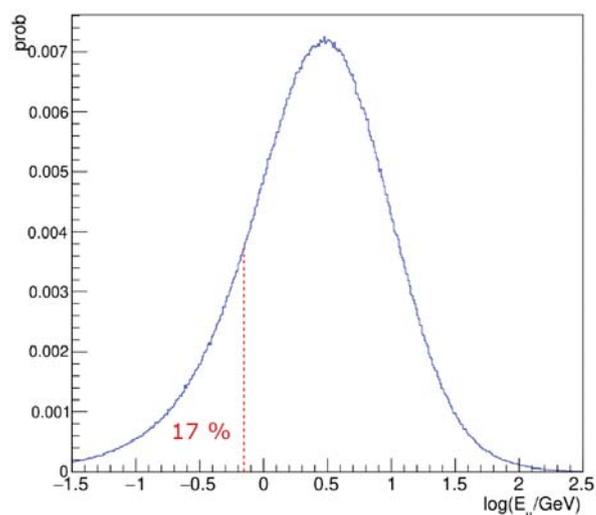


Figura 6 - Simulação do espectro de energia dos muões cósmicos a 200 m de altitude (adaptado de [8]).

A fracção de muões com energia inferior a 736 MeV é 17 %, sendo esta também a redução que estimamos para a taxa de contagens de muões, entre o piso superior e o piso inferior do edifício. Uma vez mais, estas são considerações directas, que nos permitem apenas estimar valores aproximados. Resulta daqui que a variação esperada na taxa de contagens é da ordem de 0,02 Hz. Para o valor de taxa de contagens com blindagem de chumbo, o desvio padrão de uma medida feita durante uma aquisição de cinco horas é

cerca de cinco vezes inferior à variação referida.

Repetimos as medidas no edifício, com a blindagem de chumbo e com um tempo de aquisição de cinco horas. Devido ao tempo de aquisição ser agora maior, só se fizeram medidas nos pisos extremos e no piso intermédio. Estas medidas ocorreram entre as 12 e as 17 horas para o piso superior e inferior, e entre as 10 e as 15 horas para o piso intermédio, em condições de pressão e temperatura semelhantes.

A Fig. 7 mostra os resultados deste conjunto de medidas. Observa-se uma redução na taxa de contagens para os pisos inferiores, compatível com a atenuação da componente cósmica do fundo de radiação ambiente no edifício.

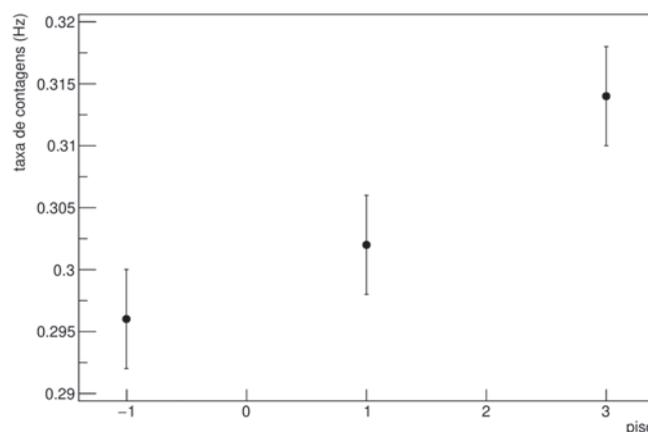


Figura 7 - Observação do efeito de atenuação na taxa de contagens medidas em intervalos de 5 horas, com o detector blindado a chumbo.

Conclusão

O objectivo deste trabalho é a observação da atenuação de raios cósmicos num edifício, tal como esperado teoricamente. Para tal, foram realizadas várias medidas em pisos diferentes de um edifício. Fizeram-se medidas com e sem blindagem, sendo a blindagem composta por barras de chumbo. Após a conclusão da experiência, verificámos que existe uma atenuação na radiação detectada, e que esta tem origem na atenuação dos raios cósmicos ao longo do edifício.

No futuro, medidas diferentes poderiam ser feitas utilizando o mesmo conceito, tais como a medida do espectro de energia dos muões num edifício com mais pisos, os efeitos que o Sol ou as condições climatéricas podem provocar nestas medidas, ou a medida da distribuição angular dos muões. Tal implica fazer um estudo prévio da sensibilidade deste tipo de experiência aos efeitos mencionados e eventualmente adaptar o procedimento adotado.

É de salientar que este trabalho pode ser feito em contexto de sala de aula ou em contexto de um clube de ciência, por alunos do Ensino Secundário, permitindo explorar diversos conteúdos de Física de Partículas com uma montagem experimental de custo relativamente baixo. Os autores deste artigo desde já se disponibilizam para fornecer as informações necessárias a quem quiser reproduzir esta demonstração experimental, bem como para apoiar na medida do possível as Escolas Secundárias que queiram implementar trabalhos relacionados.

Referências

- [1] "Sources and Effects of Ionizing Radiation", United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) 2008 Report, Volume I;
- [2] T. Ichimiya et al., "Natural background Gammaray spectrum; List of Gamma-rays ordered in energy from natural radionuclides", JAERI-DATA-CODE-98-008;
- [3] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group), "Review of Particle Physics", Phys. Rev. D **98**, 030001 (2018);
- [4] "Getting Started with the Arduino Nano", (<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoNano>);
- [5] "Libelium Geiger Counter - Radiation Sensor Board for Arduino and Raspberry Pi", (<https://www.cooking-hacks.com/documentation/tutorials/geiger-counter-radiation-sensor-board-arduino-raspberry-pitutorial/index.html>);
- [6] NIST Chemistry WebBook, (<https://webbook.nist.gov/cgi/inchi/InChI%3D1S/Ne>);
- [7] S. Agostinelli et al., "Geant4-a simulation toolkit", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. **506** (2003), pp. 250-303;
- [8] H. Asorey, L. A. Núñez and M. Suárez-Durán, "Preliminary results from the latin american giant observatory space weather simulation chain", Space Weather **16** (2018) 461.



José Alves, é Web Developer e Gestor de Conteúdos Científicos no LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas. Licenciou-se em Física na Universidade do Minho, onde se encontra a realizar o seu Mestrado. Desenvolve projectos de divulgação para escolas secundárias, que levam a física de partículas aos mais jovens.



Nuno Castro, é Professor Auxiliar no Departamento de Física da Universidade do Minho e Director do LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas. Doutorou-se na Universidade de Coimbra e foi Investigador de pós-doutoramento no Departamento de Física Teórica e do Cosmos da Universidade de Granada, Espanha, tendo também sido Professor Convidado no Departamento de Física e Astronomia da Universidade do Porto. Desenvolve a sua investigação na pesquisa de novos fenómenos de física em colisionadores de partículas, em particular no sector do quark top. É membro da Colaboração ATLAS do CERN desde 2004 e Investigador Principal do projeto BigDataHEP (PTDC/FIS-PAR/29147/2017, financiado por fundos OE/FCT, Lisboa2020, Compete2020, Portugal 2020 e FEDER).



Raul Sarmiento, é Investigador no LIP – Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas, no pólo do Minho. Licenciou-se na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Doutorou-se no Instituto Superior Técnico, tendo desenvolvido a sua actividade no Instituto Tecnológico e Nuclear e no CERN, como membro da Colaboração n_TOF. Desde 2013, desenvolve a sua investigação em medidas de muões e pesquisas de multi-mensageiros, sendo membro da Colaboração Pierre Auger.