

# Unveiling cosmic particles with muons: the cosmic connection

[Unveiling cosmic particles with muons: the cosmic connection](#)

[Introdução](#)

[Medição da taxa de muões cósmicos](#)

[Espectro angular dos muões cósmicos](#)

[Determinação da taxa de muões cósmicos que atravessa o primeiro cintilador](#)

[Determinação da intensidade vertical de muões: passo-a-passo](#)

[Resultados](#)

[Feb 2017](#)

[Bibliografia](#)

## Unveiling cosmic particles with muons: the cosmic connection

### Abstract:

Our cosmos is full of radiation. Its composition is made of massless particles (photons) and different mass particles such as protons, electrons, positrons and heavier nuclei. Their observation is a consequence of being accelerated with striking energies on the cosmic accelerator, at singular supernova regions.

Muons are smoking guns of these primary cosmic particles. They are relatively short lived particles that are generated on interactions of primaries on the top of the atmosphere, ten kilometers above earth surface. Its detection upon earth is due to its high energy that allows its survival for kilometers as was explained by the Einstein relativity. On this hands-on project we are going to use a bi-scintillator telescope to detect muons and to measure its rate (number of muons per second). From that measurement and its normalization that requires a small Monte-Carlo program to calculate the telescope geometrical acceptance, we shall be able to estimate the muon vertical intensity and compare its value with literature.

Os muões são partículas instáveis criadas nas interações de raios cósmicos primários, maioritariamente prótons, com os átomos da atmosfera. Em consequência da sua energia elevada (GeV) e a consequente dilatação temporal que ocorre no referencial da Terra, uma boa parte dos muões não se desintegra antes de chegar à superfície da Terra, transportando assim para a superfície da Terra os efeitos de partículas produzidas há milhões de anos em locais longínquos da galáxia. Neste trabalho, far-se-á a medida da intensidade vertical dos muões à superfície da Terra, com o auxílio de um detector telescópico feito de dois cintiladores plásticos.

### Introdução

Os muões (cerca de 200 vezes a massa do electrão) são partículas instáveis (tempo de vida da ordem dos  $2 \mu\text{sec}$ ) criadas nas interações de raios cósmicos primários (maioritariamente prótons) com os átomos da atmosfera. Dada a sua energia elevada (GeV) e a consequente dilatação temporal que ocorre no referencial da Terra, tem como consequência que uma boa parte dos muões não se desintegre antes de chegar à superfície da Terra.

Os muões podem ser detectados usando cintiladores sólidos (plásticos). Sempre que um muão atravessa o cintilador, interage com o meio e perde energia que é convertida em luz, detectável por fotomultiplicadores. No nosso caso, nós temos um sistema com dois detectores de cintilação, em que a luz é conduzida para os fotomultiplicadores através de fibras ópticas.

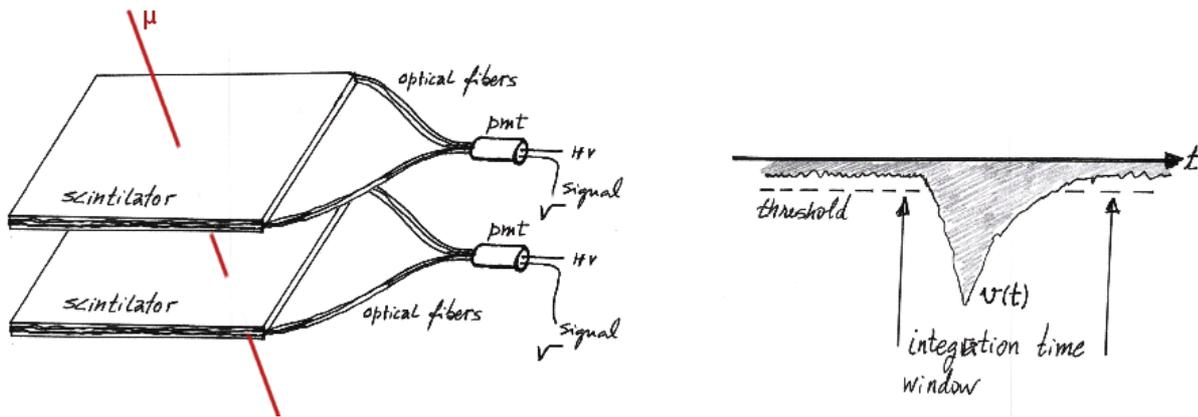
### Medição da taxa de muões cósmicos

A detecção de um muão corresponde à presença de um sinal luminoso em ambos os cintiladores sólidos, sobrepostos a uma dada distância um do outro e coincidentes em tempo. Podemos assim medir a taxa de muões cósmicos que atravessam o detector simplesmente contando o número de vezes que se tem um duplo sinal coincidente em tempo, no detector.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (1)$$

O sinal luminoso proveniente da cintilação é recolhido pelas fibras ópticas *wavelength shifters* e transportado para os fotomultiplicadores onde é convertido num sinal eléctrico. Os dois sinais eléctricos

provenientes do dois cintiladores são introduzidos de seguida num osciloscópio de 25 Keuros (!) onde uma coincidência em tempo dos dois sinais é realizada.

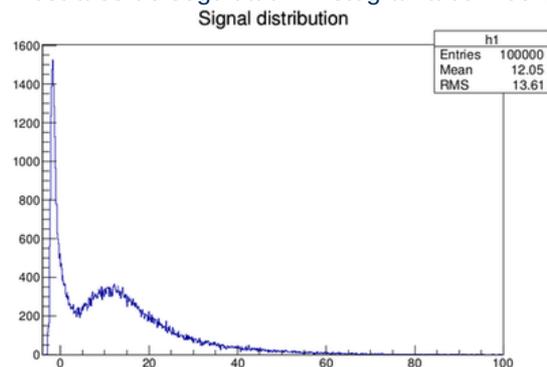


### Procedimento experimental para determinação da taxa de eventos:

- Os sinais eléctricos dos dois cintiladores são introduzidos no osciloscópio, canal 1 e canal 2, sendo definida uma coincidência temporal entre eles; isto é, somente acontecimentos coincidentes em tempo (dentro de algumas dezenas de nano segundos) são registados.

o sinal eléctrico de tensão  $v(t)$  representado na figura acima (à direita) de cada um dos cintiladores é integrado em tempo, obtendo-se então  $S_{1,2} = \int v_{1,2}(t)dt$ .

Mostra-se de seguida um histograma com os valores de  $S$  obtidos para uma aquisição de dados,



Na figura, o primeiro pico corresponde a sinais de ruído em coincidência e o segundo pico a acontecimentos muão.

- Obtenção do software de análise
  - verifica que existe no teu linux o pacote subversion  
**svn —help**; caso não exista, faz: `sudo apt-get install subversion`
  - verifica que existe no teu linux o pacote root do cern  
**root -I**; caso não exista, faz: `sudo apt-get install root-system`
  - cria um directório de trabalho e obtém uma cópia do software necessário

```
mkdir HandsOn_muons
```

```
cd HandsOn_muons
```

```
svn co svn://fcomp.tecnico.ulisboa.pt/LabRC/IDPASC.Sesimbra_Feb2017/softw/src --username=guest
```

```
svn co svn://fcomp.tecnico.ulisboa.pt/LabRC/IDPASC.Sesimbra_Feb2017/softw/DATA --username=guest
```

- No directório **src**, encontram-se as classes necessárias e no directório **DATA** estão os ficheiros de dados

```
DATA/acq_05Feb2017.root ..... root file com os dados
```

```
DATA/CorsikaSimulation.root .... root file com a simulação de cascatas atmosféricas
```

```
src/AtmReader.h, AtmReader.C ... classe de leitura da simulação de raios cósmicos atmosféricos (Corsika)
```

```
src/AMUacq.h, AMUacq.C ..... classe de leitura do ficheiro root de dados dos cintiladores
```

```
src/AMUacc.h, AMUacc.C ..... classe de cálculo da aceitação geométrica do telescópio
```

- Este histograma, que possui 252 bins entre os valores [-4,80] e corresponde a uma aquisição de **4 horas e 1 minuto**, pode ser obtido utilizando a classe [AMUacq.h](#)

- o verifica que te encontras dentro da pasta `src` (o comando `pwd`, permite verificar isso)
- o Faz uma macro simples em C++ que obtenha a distribuição dos sinais no cintilador

utilizando um editor de texto que conheças, abre um ficheiro de nome `macq.C`

```
void macq() {
    // opening data root file
    AMUacq ACQ("../DATA/acq_05Feb2017.root");
    // getting data histogram containing muon signals on 1st scintillator
    TH1F* h1 = ACQ.GetCharge();
    // draw histogram
    ...
}
```

- vamos correr o código da macro com o root

```
root -l
.x macq.C
```

- Modifica agora a macro para integrares a distribuição entre um valor mínimo `dethreshold` e o valor máximo

```
void macq() {
    // opening data root file
    AMUacq ACQ("../DATA/acq_05Feb2017.root");
    // getting data histogram containing muon signals on 1st scintillator
    TH1F* h1 = ACQ.GetCharge();
    // draw histogram
    ...
    // integrate distribution
    double xmin = 5.; //threshold value
    int imin = h1->FindBin(xmin); // bin number corresponding to xmin
    double a = h1->Integral(imin, 252);
    printf("integral value for x=[%f, %f] is %f \n", xmin, 80., a);
}
```

- corre a macro de novo e verifica o resultado
- modifica a macro para agora fazer o integral com `othreshold` a variar entre -4. e 20.  
Produz um *TGraph* (<https://root.cern.ch/doc/master/classTGraph.htm>) com os resultados da integração, tendo nos eixo dos XX o valor do `threshold` e no eixo dos YY o valor do integral.
- modifica de novo a macro para obtermos a taxa de acontecimentos em função do `dothreshold`.  
Para tal basta termos em conta o seguinte:
  - o o número total de acontecimentos colectados na aquisição e que estão no histograma, podem ser obtidos através do método `AMUacq::GetEntries()`, correspondendo a uma taxa de acontecimentos que pode ser calculada tendo em conta que a aquisição durou 4 horas e 1 minuto.  
Calcula a taxa de acontecimentos adquiridos
  - o a taxa de acontecimentos adquiridos para um dado `threshold` pode ser obtida fazendo a razão dos integrais parcial (para um dado `threshold`) e total, e multiplicando esta pela taxa de acontecimentos adquiridos

#### 4. procura a região no gráfico onde a taxa de acontecimentos estabiliza

- o valor da taxa de acontecimentos muão que atravessam os dois cintiladores corresponde a esse valor  
Vale a pena discutir um pouco porquê!!!!

### Espectro angular dos muões cósmicos

O espectro angular e em energia dos muões e a sua direcção pode ser simulado usando o software CORSIKA, que simula as interações dos primários com a atmosfera e o transporte das partículas na atmosfera até chegarem à superfície da Terra. O resultado desta simulação foi colocado num ficheiro ROOT no directório `DATA/`, que pode ser lido com o auxílio da classe C++ desenvolvida, [AtmReader.h](#)

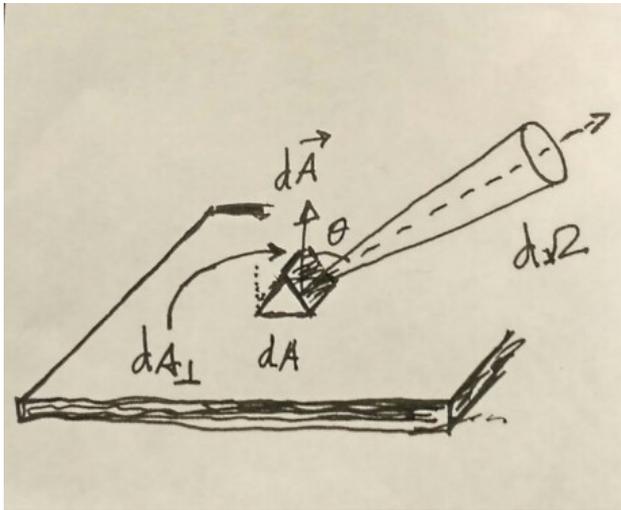
As diversas medições feitas do fluxo de muões cósmicos indicam que este, quando integrado em energia, pode ser parametrizado de forma muito aproximada por:

$$\frac{dN}{dA_{\perp} d\Omega dt} = I_0 \cos^2(\theta) \quad (2)$$

onde,

$I_0$ , é a intensidade vertical de muões acima da energia de 1 GeV/c:  $I_0 \sim 70 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$

$dA_{\perp} = dA \cos(\theta)$ , é o elemento de área transversa em relação à direcção de observação dos muões cósmicos



A partir da expressão anterior, podemos então derivar a distribuição diferencial de partículas por unidade de área do detector ( $A$ ), por unidade de ângulo sólido ( $d\Omega$ ) e por unidade de tempo ( $dt$ ):

$$\frac{dN}{dA d\Omega dt} = I_0 \cos^3(\theta) \quad (3)$$

Conclui-se daqui que os muões que atravessam o detector não apresentam qualquer dependência na posição de atravessamento do detector ( $dA = dx dy$ ),

$$\frac{dN}{dx dy} = k \quad (4)$$

não apresentam qualquer dependência do ângulo  $\phi$ ,

$$\frac{dN}{d\phi} = k \quad (5)$$

e apresentam uma dependência em  $\cos(\theta)$ ,

$$\frac{dN}{d \cos(\theta)} = \cos^3(\theta) \quad (6)$$

1. Verifica que a lei (5) acima se verifica para a distribuição angular dos muões atmosféricos simulados no CORSIKA (simulation package)

- Fazer um histograma da variável  $\cos(\theta)$  dos muões atmosféricos simulados
- Realizar um ajuste ao histograma de forma verificar a lei,  $\frac{dN}{d \cos \theta} = \cos^2(\theta)$

Para acedermos ao ficheiro ROOT com os dados dos muões simulados:

```
void mangle() {
  // open simulation file and associated root structure
  AtmReader R("../DATA/CorsikaSimulation.root");
  // create histogram
  ...
  // loop on events
```

```

for (int i=0; i < R.GetEntries(); i++) {
    // load event (event number is returned on method and is randomly chosen)
    // get variables associated to it
    int Ev = R.LoadEvent(); // event number returned
    double theta = R.GetParticleZenithAngle();
    // fill histogram
    ...
}
// draw histogram
...
// fit histogram
...
}

```

## Determinação da taxa de muões cósmicos que atravessa o primeiro cintilador

A taxa de muões cósmicos que atravessa um detector cintilador cuja superfície é  $S$ , assumindo a distribuição aproximada em  $\theta$  dos acontecimentos que verificámos atrás  $\propto \cos^2(\theta)$ , pode assim ser calculada da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \frac{dN}{dt} &= \int_{\Omega, S} I_0 \cos^2(\theta) dA_{\perp} d\Omega \\
 &= I_0 \int_0^{\pi/2} \cos^2(\theta) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta \int_0^{2\pi} d\varphi \int_S dA \\
 &= I_0 \frac{\pi}{2} S
 \end{aligned}$$

O factor  $\frac{\pi}{2} S$  corresponde à aceitação geométrica do detector ( $G$ ) - área vezes o ângulo sólido disponíveis, e possui unidades de ( $m^2 sr$ ).

Nota: Caso a distribuição angular dos muões seja diferente da testada atrás, deveremos recalculer a aceitação geométrica do plano de entrada cintilador

Foi desenvolvida uma classe em C++ para o cálculo das aceitações geométricas, [AMUacc.h](#).

Complete a seguinte macro em C++ onde se obtém a aceitação geométrica para um cintilador e para muões incidindo com ângulos zenitais entre 0 e 90 graus.

```

void mrate() {
    AMUacc A;
    double acc_sci = A.GetScintillatorAcceptance();
    // expected muon rate on scintillator
    ....
}

```

## Determinação da intensidade vertical de muões: passo-a-passo

O objectivo deste trabalho é avaliar a intensidade vertical de muões detectada pelo detector bi-cintilador

Para tal os passos a efectuar são os seguintes:

- Calcular a aceitação geométrica de um plano cintilador, sendo as dimensões deste  $25 \times 25 \text{ cm}^2$

$$G(S_1) = \int \frac{dN}{d \cos(\theta)} \cos(\theta) d\Omega \int_{S_1} dA \quad (7)$$

- Calcular a aceitação geométrica do detector de dois cintiladores, tendo em conta que eles se encontram sobrepostos com uma distância de intervalo de 18 cm. Utilize as direcções simuladas dos muões atmosféricos,

$$G = G(S_1) \frac{N(S_1 \wedge S_2)}{N(S_1)} \quad (8)$$

- Determinar a taxa medida de muões e comparar com a taxa esperada

$$\frac{dN}{dt} = I_0 G$$

(9)

de forma a determinar o  $I_0$ .

## Resultados

### Feb 2017

- The muon rate was estimated as  $2.5 \pm 0.3$  events per second
- A aceitação geométrica do telescópio na configuração acima:

## Bibliografia

- [cosmic rays](#)

---

Fernando Barão, P. Assis, R. Conceição (Jan, 2017)