

ASTRONOMIE MULTIMESSAGER EN CLASSE

LES RAYONS COSMIQUES : TESTER LA DILATATION DU TEMPS

Cédric Vanden Driessche, professeur de physique-chimie,
Lycée Charles de Gaulle à Caen

L'astronomie multimessagers offre une opportunité pédagogique exceptionnelle pour faire découvrir aux élèves la richesse des phénomènes cosmiques. Il devient possible d'explorer simultanément, dans le cadre scolaire, des domaines aussi divers que l'astrophysique et la physique des particules, révélant ainsi la continuité entre ce que l'on nomme parfois les deux infinis. Dans cet article nous allons nous intéresser à deux activités réalisées au lycée Charles de Gaulle à Caen avec les rayons cosmiques¹. Une fois passée leur heure de gloire dans la première moitié du 20^e siècle, ils ont peu à peu cédé la place aux accélérateurs de particules. Mais aujourd'hui leur étude revient sur le devant de la scène avec des projets tels que KM3NeT² et IceCube³ qui utilisent l'observation des neutrinos pour sonder l'Univers. Au lycée, l'observation de neutrinos est évidemment impossible mais l'étude des muons⁴ est tout à fait réalisable et nous offre un objet expérimental qui présente de nombreuses qualités. En effet, au sol, les rayons cosmiques se présentent sous la forme d'un flux constant de muons voyageant à une vitesse proche de celle de la lumière et quasiment insensibles aux obstacles rencontrés. Nous avons ainsi pu réaliser deux expériences en astronomie de muons afin d'aborder puis de tester la théorie de la relativité restreinte.

Première activité : l'expérience de Frisch et Smith

En 1962, deux physiciens du MIT, David H. Frisch et James H. Smith⁵, décident de reproduire l'expérience réalisée par Rossi et Hall⁶ en 1941 afin de tester la relativité. Il s'agit de mesurer le flux de muons à deux altitudes différentes et de montrer que ces flux ne sont pas compatibles avec le temps de vie du muon mesuré lorsque celui-ci est au repos dans le référentiel terrestre. C'est cette expérience que nous allons reproduire avec les élèves.

Détection des muons : notion de coïncidences

Pour détecter le passage d'un muon il faut utiliser deux capteurs en « coïncidence ». En effet le passage d'une particule chargée dans un capteur (scintillateur ou tube Geiger) va produire un signal, mais seuls les muons sont capables de traverser successivement les deux détecteurs quasiment au même instant. Il est ainsi possible de s'affranchir de la radioactivité naturelle et du bruit électronique qui statistiquement n'ont qu'une probabilité infime de se produire au même instant. Ces coïncidences sont souvent notées N_{12} pour désigner les comptages simultanés sur les voies 1 et 2 du détecteur.

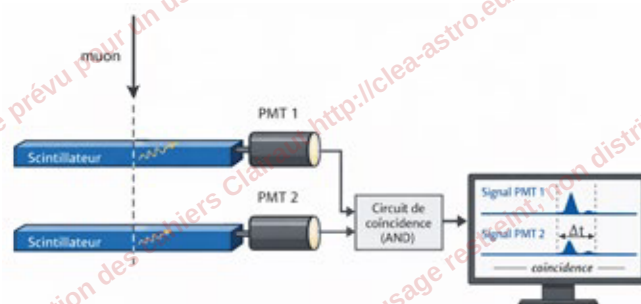


Fig.1. Principe de la coïncidence (schéma avec aide IA).

Mesure du temps de vie moyen propre du muon τ

Si ces mesures nous permettent de mesurer les flux, les muons ainsi comptés ne sont pas au repos dans notre référentiel. La plupart des muons traversent de grandes quantités de matière, mais afin de mesurer le temps de vie moyen de cette particule il nous faut nous intéresser aux quelques-unes qui se sont arrêtées dans le détecteur. Le cosmodétecteur⁷ prêté par « Sciences à l'École » possède un cylindre de plastique scintillant assez volumineux pour permettre de réaliser cette mesure en classe. Le muon qui est arrêté par le scintillateur va provoquer une première fluorescence. Ce rayonnement amplifié par un photomultiplicateur permet la mesure d'une impulsion électrique et la partie logique de notre montage va alors déclencher un chronomètre. Ensuite, lorsque le muon se désintègre il y a émission d'un électron ($\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$). Cet électron induit un deuxième signal qui va stopper le chronomètre.

1 Pour en savoir plus sur l'histoire de la découverte des rayons cosmiques voir « Histoire du rayonnement cosmique », Matthieu Renaud, Cahier Clairaut n°171 automne 2020.

2 <https://www.km3net.org/>

3 <https://fr.wikipedia.org/wiki/IceCube>

4 Le muon, selon le modèle standard, est un fermion de la famille des leptons avec l'électron et le tau, environ deux cents fois plus massique qu'un électron.

5 Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons, David H. Frisch and James H. Smith, Am. J. Phys. 31, 342 (1963); Film réalisé par les auteurs : <https://archive.org/details/TimeDilation> (vu le 4 mars 2026).

6 Variation of the Rate of Decay of Mesotrons with Momentum, B. Rossi et D.B. Hall, Physical Review, 59, 223 (1941).

7 <https://www.sciencesalecole.org/plan-cosmos-a-lecole-presenta-tion/>, voir également J-M Vienney, « Comment bénéficier du prêt d'un détecteur/compteur de muons ? », Les Cahiers Clairaut, n°171, p31-32, automne 2020.

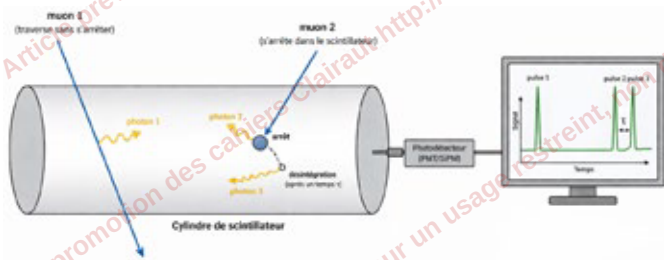


Fig.2. Mesure de tau (schéma avec aide IA).

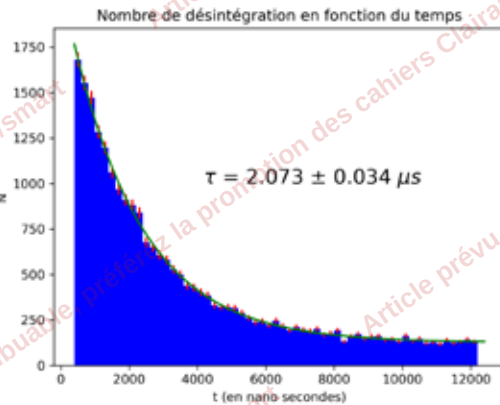


Fig.3. Activité en fonction du temps.

Analyse des résultats

La prise de données nécessitant au minimum 24 heures, les élèves lancent la mesure à la fin du cours précédant la séance de travaux pratiques. Lors du TP, ils récupèrent le fichier dans lequel sont consignés les temps de vie de plusieurs milliers de muons. L'ensemble des muons est traité comme s'ils avaient été arrêtés au même instant. On obtient alors une population qui va se désintégrer au cours du temps à la manière d'un échantillon radioactif. Le temps de vie moyen, noté généralement τ (tau), représente le temps moyen mis par une particule instable pour se désintégrer. Les muons suivant une loi de décroissance exponentielle, 37 % de la population initiale subsistent après un temps τ . Une fois les données nettoyées, le tracé du nombre de muons désintégrés en fonction du temps et la modélisation par une exponentielle décroissante permettent de mesurer le temps de vie moyen du muon. La valeur mesurée par les élèves est de $2,073 \mu s^8$.

Mesurer le flux en fonction de la distance parcourue

Il s'agit ensuite d'étudier la diminution du flux de muons en fonction de la distance parcourue. La population de muons décroît exponentiellement en fonction du temps, et puisque ces particules se déplacent quasiment à la vitesse de la lumière nous devrions pouvoir tester l'hypothèse de la dilatation du temps, ou au contraire voir si le temps s'écoule de manière absolue. Pour cela nous devons réali-

ser des mesures à deux altitudes différentes, et à cause de la vitesse importante des muons nous avons besoin d'une distance significative. Cette activité a été réalisée avec un petit groupe d'élèves dans le cadre d'un projet présenté aux Olympiades de physique. Les muons sont produits entre 10 et 15 km d'altitude lorsque les rayons cosmiques primaires frappent l'atmosphère et leur population va décroître en fonction de l'altitude. Avec un temps de vie de l'ordre de la microseconde la diminution devrait être rapide, est-ce le cas ?

Les mesures ont été réalisées à Caen (41 m d'altitude) et à l'Alpe d'Huez (1 850 m) en utilisant le détecteur MicroCosmos⁹. Ce détecteur constitué d'un Arduino et de deux tubes Geiger a été développé afin de proposer une solution à coût réduit (150 euros) aux enseignants n'ayant pas accès à un prêt de cosmodétecteur. Il nécessite des temps de mesure plus longs que le cosmodétecteur, mais est peu cher et se déplace facilement. Branché sur une batterie USB il est autonome et enregistre les données sur

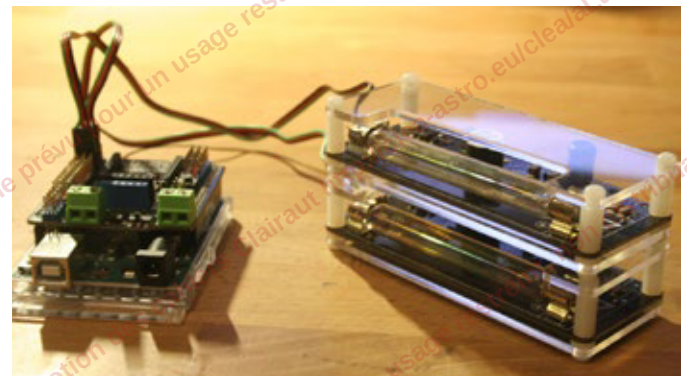


Fig.4. Détecteur MicroCosmos.

carte micro-SD.

Les résultats sont donnés sur la figure 5.

Les mesures réalisées à Caen doivent être pondérées. En effet les muons ont traversé une épaisseur d'atmosphère de 1809 m supplémentaires, ce qui correspond à peu près à une absorption de 15 % du rayonnement par l'air. Dans leurs expériences Rossi, Hall, Frish et Smith modifiaient l'épaisseur d'un bouclier de fer au-dessus de leur détecteur pour compenser cette différence. Nous obtenons donc :

$$N_{Caen} = \frac{2,228}{0,85} = 2,62 \text{ muons} / 2 \text{ min}$$

$$\text{et } N_{Huez} = 4,2 \text{ muons} / 2 \text{ min}$$

$$\text{soit un rapport } \frac{N_{Huez}}{N_{Caen}} = 1,60.$$

⁸ Le résultat est en bon accord avec la valeur donnée par le Particle Data Group : $2,197 \mu s$.

⁹ C. Vanden Driessche, « MicroCosmos, Un détecteur de particules à base d'Arduino », Bull. Un. Prof. Phys. Chim., n° 1066, novembre 2024.

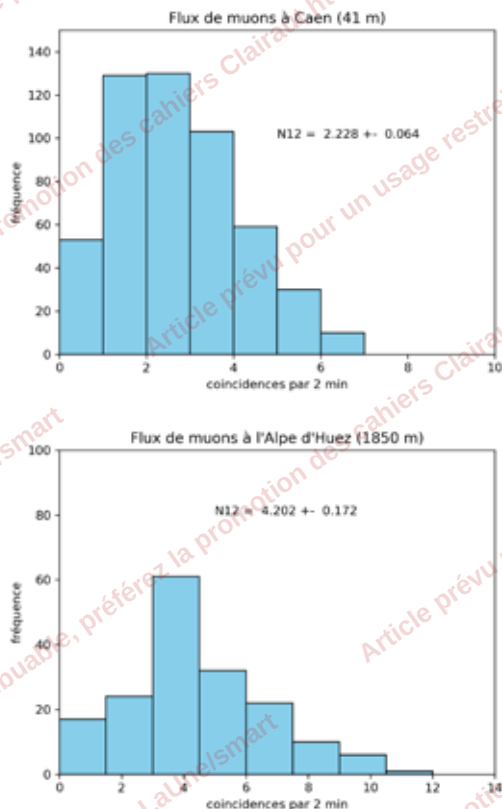


Fig.5. Les résultats. a. À Caen. b. À l'Alpe d'Huez.

Paradoxe

Le muon étant une particule instable on a

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ soit } \frac{N_{Huez}}{N_{Caen}} = e^{-\frac{t_{Huez}}{\tau}} = e^{-\frac{z_{Caen} - z_{Huez}}{v_{muon} \tau}}$$

avec $z_{Caen} - z_{Huez}$ la différence d'altitude (négative) et v_{muon} la vitesse du muon environ égale à 0,99 c. Par le

calcul on obtient $\frac{N_{Huez}}{N_{Caen}} = 16,05$. Nous devrions observer

16 fois plus de muons à l'Alpe d'Huez qu'à Caen alors qu'expérimentalement nous n'en observons que 1,60 fois plus !

Résolution du paradoxe : la relativité restreinte

Pour résoudre ce paradoxe nous devons prendre en compte la théorie de la relativité restreinte qui implique une dilatation du temps pour des vitesses proches de celle de la lumière. D'après cette théorie, la durée de vie du muon en déplacement par rapport à un observateur au sol est $\gamma\tau$ avec γ le facteur de Lorentz tel que :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_{muon}}{c}\right)^2}}$$

Nous pouvons alors réécrire l'équation précédente :

$$\frac{N_{Huez}}{N_{Caen}} = e^{-\frac{z_{Caen} - z_{Huez}}{\gamma v_{muon} \tau}}$$

Avec $v_{muon} = 0,99 c$, le calcul donne :

$$\frac{N_{Huez}}{N_{Caen}} = 1,48$$

Ce qui est très proche de la valeur expérimentale de 1,60. Les résultats expérimentaux penchent clairement en faveur de la théorie de la relativité restreinte.

Deuxième activité : modélisation de la distribution angulaire $N = f(\theta)$, un modèle à l'épreuve des données expérimentales

Cette fois nous souhaitons mener une activité en classe entière. Le déplacement à la montagne n'étant pas envisageable, nous avons opté pour une étude de la distribution angulaire du flux de muons. En fonction de l'angle, les muons parcourent des distances différentes dans l'atmosphère.

Les élèves commencent par mesurer le flux de muons en fonction de l'angle par rapport au zénith. Avec le cosmodétecteur chaque point prend 5 min et cette mesure peut éventuellement se faire en classe. Avec le MicroCosmos l'efficacité est beaucoup plus faible il faut des temps longs. On obtient des résultats corrects avec des mesures d'une heure. La mesure se fait avec des élèves volontaires venant lancer une mesure par jour pendant une dizaine de jours en modifiant l'angle de 10 degrés chaque jour.

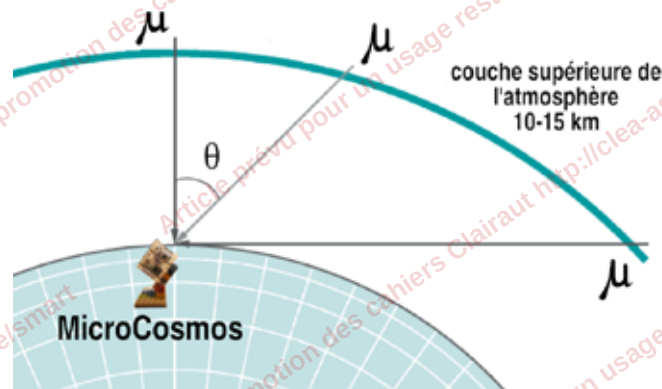


Fig.6. Étude de la distribution angulaire du flux de muons.

Les résultats obtenus pour les coïncidences N_{12} entre le tube 1 et le tube 2 sur une durée de 1 h pour le MicroCosmos sont les suivants :

Angle θ	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Muons $N_{12}/1 \text{ h}$	73	67	63	58	42	33	25	16	10

Incertitudes $u(\theta) = 2^\circ$; $u(N_{12}) = 4$ muons.

La modélisation

Pour modéliser cette distribution nous faisons plusieurs hypothèses :

- à l'échelle de la mesure nous négligeons la courbure de la Terre ;
- nous négligeons la dispersion en vitesse et en énergie

des muons et travaillons sur un muon « moyen » ;

- la diminution du nombre de muons n'est liée qu'à deux facteurs : l'absorption par l'air et la décroissance radioactive.

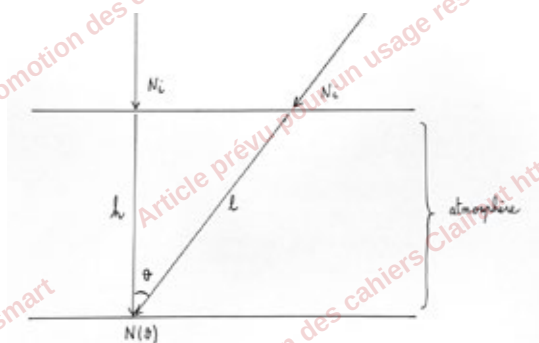


Fig.7. Schématisation de la situation.

L'absorption par l'air est supposée proportionnelle à la longueur du chemin parcouru, ce qui conduit à un nombre de muons inversement proportionnel à la distance l , soit $N_\theta \propto \frac{\cos \theta}{h}$ ⁽¹⁰⁾.

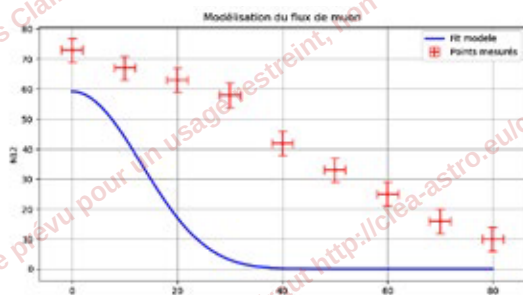
La décroissance radioactive se traduit par $N_\theta \propto N_i e^{-\frac{t}{\tau}}$ soit en l'exprimant en fonction de la distance parcourue plutôt qu'en fonction du temps :

$$N_\theta \propto N_i \cdot e^{-\frac{h}{v_{\mu} \tau \cos(\theta)}}$$

On ne connaît pas le nombre initial de muons N_i produits à l'altitude h mais que l'on peut exprimer N_0 en fonction de $N_{\theta=0}$. Nous obtenons l'équation suivante :

$$N_\theta = N_{\theta=0} \cdot \cos(\theta) \cdot e^{-\frac{h}{v_{\mu} \tau \cos(\theta)}}$$

Les élèves adaptent un programme en Python qui leur est fourni afin de tester cette hypothèse. Ils obtiennent le résultat ci-dessous. Il est clair que ce modèle ne décrit pas les données obtenues.



Discussion et modélisation relativiste

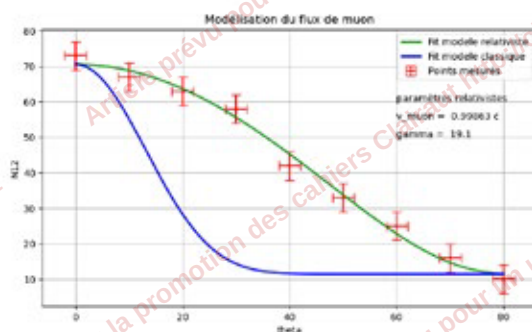
La première remarque est qu'il est nécessaire d'apporter du bruit puisque notre modèle d'atmosphère « horizontale » fait tendre le flux de muons vers zéro lorsque $\theta \rightarrow 90^\circ$ ce qui ne correspond pas à la réalité. Mais plus important, de même que dans l'expérience précédente, avec un temps de vie moyen de 2,196 μs , une diminution

du nombre de muons beaucoup plus rapide devrait être observée. Or ce n'est pas le cas. Nous devons, comme vu précédemment, prendre en compte la théorie de la relativité restreinte qui implique une dilatation du temps et prendre $\gamma \tau$ à la place de τ .

L'équation devient :

$$N_\theta = N_{\theta=0} \cdot \cos(\theta) \cdot e^{-\frac{h}{v_{\mu} \gamma \tau \cos(\theta)}} + \text{bruit}$$

En Python, la fonction *curvfit* nous permet de faire varier la vitesse v_{μ} afin d'ajuster la fonction aux points expérimentaux. Le modèle fonctionne et les valeurs obtenues, $v_{\mu} = 0,998\,63\,c$ et $\gamma = 19,1$, sont cohérentes avec la littérature, même si la valeur de γ est un peu plus grande que la valeur mesurée par Frish et Smith ($\gamma \approx 9$). Plusieurs raisons expliquent cet écart : une grande sensibilité de la fonction modèle (une faible variation de v_{μ} a un impact important), un modèle un peu simpliste, le fait qu'en réalité le flux soit un mélange de muons d'énergies et de vitesses différentes et donc ayant un γ différent, alors que nous travaillons sur un muon « moyen ». Des mesures plus récentes réalisées en améliorant l'efficacité du détecteur grâce à une réduction de la distance entre les deux tubes Geiger nous donne des valeurs $v_{\mu} = 0,99295\,c$ et de $\gamma = 8,4$ ce qui correspond aux valeurs mesurées par Frisch et Smith. Quoi qu'il en soit, cette fois encore, les résultats expérimentaux penchent clairement en faveur de la théorie de la relativité restreinte.



Conclusion

Tester la théorie de la relativité restreinte, travailler sur la théorie d'Einstein et constater la dilatation du temps, des éléments qui font aujourd'hui partie de notre imaginaire collectif, est une expérience pédagogique extrêmement riche. De plus, au-delà de la diversité des contenus scientifiques, ces activités permettent d'établir un pont concret entre le programme scolaire et la recherche contemporaine. Les élèves ne se contentent pas d'étudier des concepts théoriques : ils accèdent à des données réelles issues d'observations modernes. Au final ils participent, au moins symboliquement, à la démarche d'investigation qui anime la communauté scientifique internationale. ■

¹⁰ Le symbole $\propto$ signifie « est proportionnel ».