

Activité 9 – Des muons venus du ciel

Approfondissement – 30 minutes indicatives – Adaptation de l'activité 18 du site

Nom : Classe : Date :

Capacités : C1 – Choisir un référentiel et comparer deux descriptions d'un même mouvement ; C2b – Calculer une distance à partir d'une vitesse et d'une durée. **Outil O1 :** convertir des km en m et des μs en s.

Prérequis : relation $d = v \times t$; activité 8 conseillée. **Matériel :** calculatrice. Approfondissement hors programme : toutes les relations nouvelles sont fournies.

Énoncé — Une particule qui ne devrait pas arriver

Des particules venues de l'espace, les **rayons cosmiques**, heurtent en permanence la haute atmosphère. Ces chocs créent d'autres particules, dont les **muons**. Un muon est instable : il finit par se désintégrer.

Problème : comment des muons créés si haut peuvent-ils atteindre le sol ?

- Altitude de création retenue dans le modèle : $h = 10 \text{ km}$.
- Mouvement : vers le sol, en ligne droite, à vitesse constante $v = 0,999 c$, soit environ $300\,000\,000 \text{ m/s}$.
- Durée de vie moyenne d'un muon au repos : $2,2 \mu\text{s}$, avec $1 \mu\text{s} = 0,000\,001 \text{ s}$.
- **Observation :** au niveau du sol, des détecteurs comptent environ **un muon par minute sur chaque centimètre carré** ; une centaine traversent une main chaque minute.

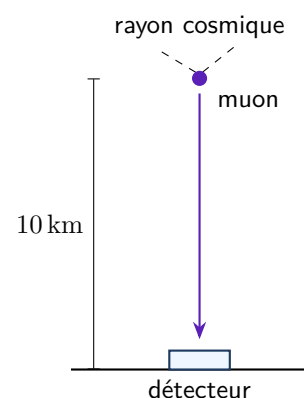


Schéma sans échelle.

Sources : Particle Data Group, *Review of Particle Physics* (durée de vie, flux au sol ; valeurs arrondies). Altitude et vitesse : valeurs typiques choisies pour le modèle.

1. Quel est le système étudié ? Dans le référentiel terrestre, quelle est sa trajectoire dans ce modèle ?

Le système étudié est le muon. Dans le référentiel terrestre, il descend en ligne droite vers le sol : sa trajectoire est rectiligne (verticale) et son mouvement rectiligne uniforme, puisque sa vitesse est supposée constante.

2. Sans tenir compte de la relativité, calculer la distance parcourue par un muon pendant $2,2 \mu\text{s}$ (sa durée de vie moyenne au repos), avec $d = v \times t$. Donner le résultat en mètres.

$t = 2,2 \mu\text{s} = 0,000\,002\,2 \text{ s}$; $d = v \times t = 300\,000\,000 \times 0,000\,002\,2 = 660 \text{ m}$.

3a. Comparer la distance trouvée à la question 2 avec l'altitude de création (10 km).

660 m , c'est beaucoup moins que $10 \text{ km} = 10\,000 \text{ m}$.

3b. D'après cette prévision, les muons devraient-ils atteindre le sol ?

Non : ils devraient se désintégrer bien avant d'arriver au sol.

3c. Cette prévision est-elle en accord avec l'observation ?

Non : les détecteurs comptent énormément de muons au sol. La prévision classique est contredite par l'observation.

Activité 9 – Des muons venus du ciel

L'explication d'Einstein

Rappel de cours — Relativité restreinte

La **relativité restreinte** (Albert Einstein, 1905) montre qu'à des vitesses proches de celle de la lumière, les distances et les durées mesurées dépendent du référentiel. Pour un muon à $0,999c$, le coefficient vaut $k \approx 0,045$.

- **Dans le référentiel du muon**, le muon est immobile et c'est le sol qui monte vers lui. L'épaisseur d'atmosphère qu'il mesure vaut $k \times h$.
- **Dans le référentiel terrestre**, la durée de vie du muon en mouvement est plus longue que $2,2\mu\text{s}$: elle vaut $2,2\mu\text{s} \div k$.

4. Dans le référentiel du muon, le sol se rapproche à $0,999c$ pendant $2,2\mu\text{s}$, soit 660 m . Calculer l'épaisseur d'atmosphère mesurée dans ce référentiel. Est-elle plus petite ou plus grande que ces 660 m ?

$k \times h = 0,045 \times 10\,000 = 450\text{ m}$, moins que 660 m : dans son référentiel, le muon voit le sol arriver avant de se désintégrer.

5a. Calculer la durée de vie moyenne du muon mesurée dans le référentiel terrestre.

$2,2 \div 0,045 \approx 49\mu\text{s}$, soit $0,000\,049\text{ s}$.

5b. Calculer la distance qu'il parcourt pendant cette durée. Atteint-il le sol ?

$d = v \times t = 300\,000\,000 \times 0,000\,049 \approx 14\,700\text{ m}$, soit $14,7\text{ km}$, plus que 10 km : le muon atteint le sol.

6. Dans le référentiel du muon, on dit « la distance est plus courte » ; dans le référentiel terrestre, « la durée de vie est plus longue ». Ces deux explications se contredisent-elles ? Répondre par oui ou non, puis justifier.

Non, elles ne se contredisent pas : les deux sont justes. Chacune décrit le phénomène dans un référentiel différent, et elles aboutissent à la même conclusion observable : le muon atteint le détecteur. Qu'un muon arrive ou non au sol ne dépend pas du référentiel ; seules les distances et les durées mesurées en dépendent.

7. En deux ou trois phrases, expliquer pourquoi les muons sont une preuve expérimentale de la relativité restreinte. Employer les mots *prévision*, *observation* et *référentiel*.

Sans relativité, la prévision indique que les muons parcourent seulement 660 m et ne devraient pas atteindre le sol. L'observation montre pourtant qu'ils y arrivent en grand nombre. La relativité restreinte explique cet écart : selon le référentiel choisi, c'est la distance à parcourir qui est plus courte ou la durée de vie qui est plus longue.

À retenir

Une théorie scientifique se juge en comparant ses prévisions aux observations. Aux vitesses proches de celle de la lumière, les distances et les durées mesurées dépendent du référentiel : c'est ce qui permet aux muons d'atteindre le sol.

Remarque — Sources et limites

Durée de vie ($2,197\mu\text{s}$) et flux au sol (environ $1\text{ cm}^{-2}\text{ min}^{-1}$) : Particle Data Group, *Review of Particle Physics*. Altitude et vitesse : valeurs typiques du modèle (création entre 10 et 20 km). La durée de vie

est une moyenne ; expérience historique : Frisch et Smith, *Am. J. Phys.* 31, 342 (1963).

Méthode — Conduite

Hors programme : les deux effets sont fournis. Mettre en commun le constat d'écart après la question 3, avant de lire le document d'Einstein.