

UNIVERSITÉ LAVAL

DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE, GÉNIE PHYSIQUE ET OPTIQUE

PHY-3501 PHYSIQUE DES PARTICULES

La courte vie d'un muon

Steven THÉRIAULT

111 152 825

Travail présenté à :

Luc MARLEAU

30 avril 2019



UNIVERSITÉ
LAVAL

Table des matières

1	Introduction	1
2	Historique et découverte	1
3	Les propriétés des muons	2
4	Comment créer un muon	4
	Production par les rayons cosmiques	4
	Production par accélérateurs	5
5	États liés	6
	Le muonium	6
	Les atomes muoniques	7
6	Applications	8
	Test de la relativité restreinte	8
	Tomographie	8
	Fusion nucléaire catalysée	10
7	Conclusion	12

1 Introduction

La plupart des gens savent que la matière ordinaire qui nous entoure est constituée d'atomes. En y regardant de plus près, nous nous sommes rendu compte que ceux-ci sont eux-mêmes constitués d'éléments plus petits, à savoir les électrons, les neutrons et les protons. Ces deux derniers sont eux-mêmes constitués de quarks up et down. Ces trois particules que nous considérons comme élémentaires sont à elles seules les briques constituant tout ce que nous voyons et touchons dans le monde dans lequel nous vivons. Bien que ces particules de matières soient suffisantes pour construire notre monde, la recherche en physique des particules nous a appris qu'il existe bien d'autres particules de matière, dont certaines sont stables, mais interagissent très peu, comme les trois saveurs de neutrinos. D'autres sont instables et se désintègrent rapidement, comme les quatre saveurs plus lourdes de quarks, le tau et le muon. C'est ce dernier auquel ce texte s'intéresse, nous verrons donc dans les prochaines pages plusieurs des propriétés fascinantes de cette particule éphémère qu'est le muon [15].

2 Historique et découverte

Commençons par regarder ce qui a mené à la découverte du muon. Au début du siècle dernier, une nouvelle découverte fascina certains scientifiques de l'époque, il s'agissait des rayons cosmiques. Ces particules de hautes énergies ont été découvertes par Victor Hess en 1912 qui, à l'aide d'un électromètre, mesura une ionisation plus grande en haute altitude qu'au sol et conclut que cette ionisation devait provenir de particules pénétrantes de hautes énergies venant de l'extérieur de l'atmosphère, mais d'un endroit autre que le soleil. Cette découverte lui valut d'ailleurs le prix Nobel de physique en 1936 [12]. À cette époque, seuls les photons et les électrons étaient connus.

Plusieurs années plus tard, avec le perfectionnement de la chambre à bulles, Werner Kolhörster découvrit que certaines de particules qui ionisaient l'air et laissaient une trace de leur passage dans la chambre à bulles devaient être chargées négativement. Puisque leur trajectoire courbait à la manière d'une particule négative suite à l'intervention d'un champ magnétique, il devait donc s'agir d'électrons [5]. Un problème persistait, de ces "électrons", certains parvenaient à pénétrer une grande épaisseur de plomb, alors que d'autres étaient bloqués presque à sa surface. Normalement, un électron traversant autant de plomb aurait dû produire une cascade de particules, telle une paire électron-positron ou perdre de l'énergie

par effet *Bremsstrahlung*. Il devait donc y avoir quelque chose d'erroné, soit les propriétés de l'électron, soit les mesures, soit une nouvelle particule. C'est en 1937 que Carl D. Anderson et son étudiant Seth Neddermeyer conclurent qu'il devait s'agir d'une particule de même charge que l'électron, mais plus massive que celui-ci tout en étant moins massif que le proton. Ils venaient de découvrir le muon [9].

3 Les propriétés des muons

Bien que considérés comme particules élémentaires dans le modèle standard, les muons nous sont peu communs à cause de leur courte durée de vie. En effet leur durée de vie moyenne au repos n'est que de $(2.1969811 \pm 0.0000022)\mu s$ [11]. En terme de perspectives, cligner des yeux prend environ un dixième de secondes, cela correspond à environ 45000 demi-vies d'un muon. Dans un temps si court, même la lumière ne peut parcourir qu'environ 650 mètres dans ce court laps de temps (section 6). C'est pourquoi le muon n'est détecté qu'immédiatement après sa création. Même si ce temps est extrêmement court, il est suffisamment long pour permettre au muon d'interagir et de former des états liés (section 5).

La charge électrique du muon est $-e$, soit $\approx -1.6021766208(98) \times 10^{-19}$ Coulomb et $+e$ pour l'antimuon [11], ce qui est exactement la même que l'électron. Sa masse étant de $(105.6583715 \pm 0.0000035)$ MeV, soit environ 207 fois plus massif que l'électron, il est considéré comme un cousin lourd de l'électron, Il fait d'ailleurs parti de la même famille que celui-ci, soit les leptons, qui sont des particules de spin 1/2 qui obéissent à la statistique de Fermi-Dirac. Le muon a une charge leptonique muonique L_μ de 1 et cette charge doit être conservée durant ses interactions [15].

Étant chargé électriquement, le muon interagit avec les autres particules chargées par l'interaction électromagnétique, mais il peut également interagir via la force faible, mais seulement si son hélicité est gauche (*Left-handed*), puisque seule cette hélicité peut participer aux interactions faibles. Ce muon a alors un isospin faible de $-1/2$ ($+1/2$ pour l'antimuon). Pour les muons d'hélicité droite (*right-handed*), ils ne peuvent interagir avec d'autres particules sous l'effet de la force faible ont un isospin faible de 0 [15].

Suivant leur demi-vie, les muons instables se désintègrent via l'interaction faible presque 100% du temps en électrons, accompagnés d'un neutrino muonique et un antineutrino électronique. Pour l'antimuon, la désintégration produit plutôt un positron, accompagné d'un neutrino électronique et un antineutrino muonique (équation 1). Ces désintégrations ne conservent pas la parité et l'électron produit sera émis de manière préférentielle selon l'axe de spin du muon [19].

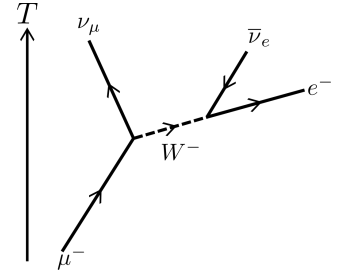


FIGURE 1 – Désintégration du muon μ^- [1]

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (1)$$

La désintégration présentée à l'équation (1) est celle prescrite par le modèle standard et tient compte de la conservation du nombre leptonique et les expériences ont montré que la désintégration plus simple (équation 2) ne satisfaisant pas cette conservation est proscrite [3].

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma \quad (2)$$

Il existe aussi deux autres désintégrations plus rares [11] présentées aux équations (3) et (4) accompagnées de leur probabilité. Elles sont plus rares, car elles font intervenir plus de particules.

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + \gamma \quad (1.4 \pm 0.4)\% \quad (3)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^- + e^+ \quad (3.4 \pm 0.4) \times 10^{-5}\% \quad (4)$$

Des recherches utilisant des collisions d'électrons et de positrons ont démontré que le muon agit comme une particule ponctuelle jusqu'à concurrence d'une taille de 10^{-16} m [14]. Il agit donc encore une fois comme un électron.

Une des propriétés du muon qui est étonnante est son moment magnétique anomal, qui est la différence entre le facteur de Landé g provenant de la relation du moment magnétique et du spin d'une particule (équation 5) et celle prédite par l'équation de Dirac, soit $g = 2$ [2].1

$$\vec{\mu}_s = g \frac{q}{2m} \vec{S} \quad (5)$$

Le problème avec cette valeur est que celle mesurée est en désaccord avec la valeur théorique prédite par le modèle standard de 3.5 écarts type (3.5σ). Une telle différence n'est pas commune et pourrait suggérer une lacune du modèle standard ou une extension de celui-ci, de plus amples recherches sur ce sujet sont donc attendues [6].

4 Comment créer un muon

Sur terre, il existe deux principales sources de muons, les rayons de hautes énergies, mais de faibles densités produits par les rayons cosmiques et les rayons de faibles énergies, mais de fortes intensités produits par les accélérateurs de particules. La principale manière d'avoir des muons est par la désintégration des pions π^\pm selon :

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \qquad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \qquad (6)$$

Cette réaction survient seulement $(2.6033 \pm 0.0005) \times 10^{-8}$ s après la création du pion, soit environ cent fois plus vite que la désintégration du muon et se produit dans $(99.98770 \pm 0.00004)\%$ des désintégrations du pion [11].

Puisque c'est la principale manière de produire des muons et que c'est son mode principal de désintégration, créer des muons revient à se demander comment créer des pions. Les pions sont des particules composées de quarks et nous pouvons les rencontrer dans les accélérateurs de particules et les rayons cosmiques. Ils sont créés lorsque des protons de hautes énergies interagissent avec les noyaux atomiques de cibles ou de la haute atmosphère.

Production par les rayons cosmiques

La plupart des rayons cosmiques sont des protons de très hautes énergies, de l'ordre du GeV et du TeV. En entrant en contact avec les atomes d'azote et d'oxygène de notre atmosphère, il s'en suit la production d'une cascade de pions π^\pm , π^0 et de kaons K^0 et K^+ qui se désintègrent soit en pions soit en muons selon :

$$K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \qquad K^+ \rightarrow \pi^+ + \pi_0 \qquad (7)$$

Les pions π^0 quant à eux peuvent se désintégrer dans $(98.823 \pm 0.034)\%$ des cas en deux rayons gammas et dans $(1.174 \pm 0.035)\%$ des cas en un électron, un positron et un rayon gamma selon :

$$\pi_0 \rightarrow \gamma + \gamma \qquad \pi_0 \rightarrow e^- + e^+ + \gamma \qquad (8)$$

Il en résulte que près de 70% des particules secondaires atteignant la surface de la Terre sont des muons de hautes énergies [19]. Puisqu'ils ont une très grande énergie, ces muons sont très pénétrant dans la matière et peuvent être utilisés pour sonder la matière en tomographie (section 6).

Bien que les muons produits par les rayons cosmiques soient d'une utilité pratique, ils sont relativement peu abondants avec un flux d'environ 10 000 par mètre carré par minute

[25]. À titre de comparaison, cela revient à environ un muon traversant la surface d'une main humaine par seconde. Ce flux varie également légèrement selon la latitude à cause du champ magnétique terrestre. Pour un flux plus dense et contrôlé, il faut donc se tourner vers les accélérateurs et les créer nous-mêmes.

Production par accélérateurs

La manière la plus aisée d'avoir un flux constant de muon est d'utiliser un accélérateur de particules. Habituellement des protons sont accélérés et vont frapper une cible qui relâche des pions qui se transforment en muon selon une des collisions possibles avec les protons formant la cible :



Comme c'est le cas pour les rayons cosmiques, la collision avec la cible produit les trois types de pions. Dans le cas où l'on recherche un type de muon en particulier, il faut donc filtrer l'autre type et les électrons produits par la désintégration du π^0 . Trois types de séparation peuvent avoir lieu.

La première provient de la séparation des pions suivant leur production à la source en se servant de champ magnétique. Les pions souhaités peuvent ensuite être confinés par d'autres champs magnétiques jusqu'à leur désintégration. Cette séparation porte donc le nom de désintégration en vol (*decay in flight*) et permet d'optimiser la sélection des muons que l'on souhaite avoir [19].

La deuxième séparation peut être faite directement en enlevant les muons du faisceau de pions sortant la cible. Ces muons se désintègrent donc à des endroits différents et ont des énergies différentes. Les muons produits de cette manière ont donc la forme d'un nuage (*Cloud*). Il est donc plus difficile de s'en servir pour avoir un bon faisceau de muons [19].

Une troisième séparation peut avoir lieu suite à une propriété des μ^+ . En effet, une fraction non négligeable des muons est arrêtée dans la cible. Dans le cas des μ^- , ceux-ci sont attirés par les noyaux positifs et sont capturés jusqu'à leur désintégration, mais pour les μ^+ qui sont repoussés par les noyaux et se retrouvent libres jusqu'à leur désintégration. Il est donc possible de séparer ces μ^+ de surface avec des champs magnétiques. Cette séparation a le désavantage d'être contaminée par les positrons venant de la désintégration des μ^+ et de la production de paire résultant des rayons gamma produits par la désintégration des π^0 . La séparation de surface a toutefois l'avantage de pouvoir produire un grand flux de faible énergie peu pénétrant [19].

Un tel montage pour collecter des muons pourrait ressembler à la figure 2.

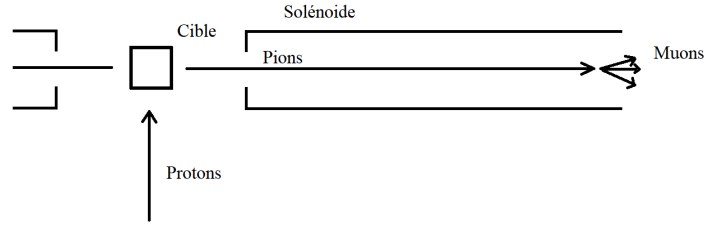


FIGURE 2 – Montage d'accélérateur et collecteur de muons

5 États liés

Lorsque les muons sont ralentis, ils peuvent atteindre des énergies permettant de former des états liés. Pour ralentir les muons de plusieurs keV, tels que ceux produits par les accélérateurs, le principal mécanisme à l'oeuvre pour les μ^+ et μ^- est l'ionisation du milieu. Le taux de perte de l'énergie des muons par mètre est donnée par la formule de Bethe (sans correction pour la densité) selon :

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_a r_e^2 m_e \rho \frac{Z}{A} \frac{c^4}{v^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2}{I} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (10)$$

où N_a est le nombre d'Avogadro, $r_e = 2.817 \times 10^{-13}$ m, m_e la masse de l'électron, c la vitesse de la lumière, ρ la densité, Z la charge, A le nombre atomique du milieu, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$ avec v la vitesse du muon et I le potentiel moyen d'ionisation [19].

On voit avec l'équation (10) que les muons sont plus ralentis par les atomes lourds et vont moins pénétrer les régions denses, ce qui peut être utilisé pour caractériser des volumes en tomographie (section 6). L'ionisation minimale est atteinte pour une énergie du muon de 200 MeV et en dessous de 10 keV ils deviennent trop lents pour ioniser les atomes. Sous cette énergie, μ^+ et μ^- ont un comportement différent provenant de leur charge différente [19].

Le muonium

Sous les énergies d'ionisation, le μ^+ peut encore perdre de l'énergie par capture d'électrons et thermalisation (collisions avec les particules). Aux énergies de 200 eV et moins, il peut alors rester dans deux états dans la matière. Le premier est simplement un μ^+ libre ou un μ^+ diamagnétique. La différence étant que la forme diamagnétique ne peut former un état lié à cause de rencontres fréquentes avec des électrons de conduction d'un métal par exemple [19].

L'autre plus intéressant est la formation du muonium, qui consiste en un μ^+ qui a capturé un électron. Cette combinaison peut être comparée à un atome d'hydrogène où le proton

a une masse réduite, si bien que l'énergie de liaison en première approximation peut être obtenue à partir du modèle de Bohr :

$$E_n = -\frac{m_r e^4}{2\hbar^2 n^2} \quad (11)$$

Où m_r est la masse réduite $\frac{m_e m_\mu}{m_e + m_\mu}$.

Cette équation nous donne une énergie d'ionisation de l'électron de 13.539 eV, que l'on peut comparer avec celle de l'hydrogène qui est de 13.5981 eV. On peut donc convenablement poser qu'il s'agit d'un isotope exotique de l'hydrogène [13].

Puisqu'il ne s'agit pas d'un atome d'hydrogène, mais plutôt d'un état lié de leptons, plusieurs mesures très intéressantes peuvent se faire sur ce couple. La mesure de l'interaction magnétique entre les deux, la mesure du spin de l'électron suite aux intervalles d'énergies engendrés par l'effet Zeeman ou une mesure précise de la structure fine et du décalage de Lamb sont quelques exemples de propriétés qui peuvent être mesurés en observant le muonium [13].

Étudier le muonium offre donc la possibilité de mesurer certaines propriétés de la matière de manière plus précise que d'autres techniques et d'offrir un test pour certaines théories.

Les atomes muoniques

Pour ce qui est du μ^- , une fois qu'il a atteint une énergie d'environ 3 keV, il devient fortement attiré par les noyaux positifs des atomes et fini par être capturé. Il descend ensuite vers les niveaux de plus basse énergie et vient remplacer un électron des couches les plus basses en émettant des rayons X à chaque transition. Il se forme alors un atome muonique [19].

De par la masse élevée du muon, la taille de l'hydrogène muonique est de près de 200 fois réduite, la fonction d'onde du muon étant restreinte à une distance beaucoup plus près du proton que ne l'est l'électron. L'énergie d'ionisation de tels atomes est également augmentée d'un grand facteur, en partie à cause de la masse plus élevée du muon, mais également de sa plus grande proximité avec le proton. De ce fait, les énergies d'ionisation d'atomes muonique sont de l'ordre du keV pour l'hydrogène et l'hélium et de 10 MeV pour le plomb [19].

À ce moment, le muon va soit rester en orbite autour du noyau jusqu'à sa désintégration ou être absorbé par un proton et se transformer en neutron selon :



Les muons peuvent donc amener certains atomes à devenir radioactifs [13].

6 Applications

Test de la relativité restreinte

Il a été mentionné plus haut que la durée de vie du muon, même à la vitesse de la lumière ne lui permettrait que de franchir 650 mètres ($c \times 2.2\mu\text{s}$), or comme la haute atmosphère où les rayons cosmiques interagissent avec l'air pour créer des muons est située à plusieurs kilomètres d'altitude, pourquoi détectons-nous autant de muons au sol ? La réponse réside dans leur immense vitesse et l'effet que celle-ci a sur eux. Ils voyagent tellement vite, certains à plus de 0.99% de la vitesse de la lumière, que l'on ne peut négliger les effets relativistes de la dilatation du temps et de la contraction des longueurs [7].

Pour tester ces effets relativistes, l'expérience menée par Bruno Rossi et David B. Hall en 1940 [23] consistait à placer un détecteur au sommet d'une montagne et un détecteur au pied de la montagne. En comptant le nombre de muons traversant chaque détecteur on peut alors déterminer le taux de perte et la durée de vie des muons sachant leur vitesse et la hauteur qui sépare les deux détecteurs.

Cette expérience démontra directement que lorsque l'on s'approche de la vitesse de la lumière, notre temps propre semble plus long du point de vue d'un observateur extérieur selon l'équation :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{propre}}{\sqrt{c^2 - v^2}} \quad (13)$$

Du point de vue du muon, son temps est tout à fait normal et sa durée de vie moyenne est la même qu'au repos. Pour lui c'est plutôt la distance le séparant de la terre qui diminue, démontrant expérimentalement la contraction des longueurs avec la vitesse de l'équation (14) [7].

$$L = L_{propre} \sqrt{c^2 - v^2} \quad (14)$$

De notre point de vue au sol, le muon semble avoir une horloge ralentie et une durée de vie plus longue. Ce qui signifie qu'il peut parcourir une plus grande distance avant de se désintégrer. Les valeurs expérimentales montrent que dans ce cas des rayons cosmiques, la durée de vie moyenne du muon est de 6 à 10 fois plus grande que pour un même muon au repos [8]. Le fait que nous observions ces particules instables est donc tout à fait expliqué par la relativité restreinte et permet également de prouver sa validité.

Tomographie

Nous avons vu que la forte pénétration des muons d'origine cosmique est ce qui a amené

à sa découverte (section 2). Cette pénétration qui est plus grande que pour les rayons X peut être forte utile dans la reconstruction 3D de structures à grandes échelles. En effet, les rayons X se font assez absorber par la matière pour ne plus être utilisable à partir de quelques mètres. On pourrait penser utiliser des particules comme les protons ou les neutrons, mais ceux-ci ne peuvent augmenter la distance qu'à une dizaine de mètres. Les muons de hautes énergies produits par les rayons cosmiques peuvent traverser des épaisseurs de 100 mètres à un kilomètre s'ils ont une énergie entre 100 GeV et 1 TeV [10].

Sachant la fluence des muons d'origine cosmique (sous-section 4) quelqu'un voulant connaître la densité d'une structure de grande taille (supérieure à 10 m) comme une montagne, peut installer un détecteur et enregistrer la quantité de muons traversant le détecteur. Si ce détecteur est capable de mesurer la direction de propagation de la particule incidente, il devient possible de compter le nombre de muons ayant traversé la structure visée et en comparant avec le flux attendu, il devient possible de prendre une image 2D de la densité de ce que l'on observe. Avec un détecteur suffisamment grand ou plusieurs détecteurs, il devient également possible de faire une reconstruction 3D de la structure exactement comme il est fait en radiographie médicale. La différence étant qu'en imagerie médicale, les rayons X sont parallèles et leur direction est connue. Il faut donc un peu plus de traitement pour reconstruire une image. Un grand avantage à ce genre de reconstruction est qu'elle est non-invasive et ne requière donc pas la destruction ou la modification de ce qui est observé. Cette technique permet aussi d'observer des choses qui seraient très difficiles à observer autrement [18].

Pour faire une bonne reconstruction, il faut un très grand nombre de détections, premièrement pour comparer avec les autres sections de la région à reconstruire, mais également pour comparer avec le bruit de fond. Sachant que la fluence de muon cosmique est très faible, un tel détecteur doit être placé au même endroit pendant une très longue période de temps, de l'ordre du mois, pour avoir une bonne résolution. Les détecteurs utilisés peuvent donc être constitués de films ou d'émulsions qui sont observés plus tard, plutôt que de détecteurs numériques [18]. Il existe également des détecteurs à scintillations et des détecteurs à gaz qui peuvent être utilisés pour la même tâche [17].

Parmi les reconstructions qui ont été effectuées, on peut noter la reconstruction de la pyramide de Khéops (grande pyramide de Gizeh) qui, en se servant des trois méthodes de détection mentionnées plus haut, a permis d'identifier une cavité d'une taille de 30 mètres dont l'utilité est inconnue. La tomographie par muon peut donc être utilisée dans un domaine tel que l'archéologie pour sonder les constructions humaines [17]. De la même manière, il a été possible d'identifier la forme de la chambre magmatique d'un volcan, proposant l'utilisation de cette technique pour observer l'évolution et le déplacement du magma. Cette technique

pourrait donc possiblement mener à la prédiction d'éruptions volcaniques [24].

Cette technique peut également être utilisée dans des environnements qui ne sont pas nécessairement trop grands, mais qui peuvent être dangereux ou composés de matière très opaque aux autres techniques, comme des structures faites de métaux lourds. Les réacteurs nucléaires sont l'exemple type de ce genre d'environnement, puisqu'il est très dangereux de s'approcher d'une telle structure et que le coeur du réacteur est fait de métaux lourds. Les contenants de déchets radioactifs provenant de réacteurs nucléaires peuvent aussi avoir recours à cette technique pour identifier s'ils sont sécuritaires à manipuler. La tomographie peut être très utile pour identifier l'intérieur d'un réacteur en cas d'accident, comme ce fut le cas suite à la catastrophe de la centrale de Fukushima Daiichi. Suite à cet incident, les intervenants avaient besoin de connaître l'ampleur des dégâts dans le coeur de plusieurs réacteurs pour planifier la réponse à avoir. Malheureusement, ces réacteurs produisaient tellement de rayonnements que les circuits des robots envoyés pour prendre des mesures ont grillés, rendant inopérants les robots. Il a donc fallu utiliser la reconstruction tomographique par les muons pour permettre d'identifier l'étalement des produits radioactifs[20].

Fusion nucléaire catalysée

Nous avons vu que le μ^- peut se lier à un noyau et que dans le cas de l'hydrogène cela a pour effet de grandement réduire la taille de l'atome et l'effet est le même pour les isotopes de l'hydrogène que sont le deutérium et le tritium. Quelque chose d'inattendu se produit lorsqu'un de ses isotopes muonique rencontre un autre atome, il se forme une molécule liée par le muon. Tel le dihydrogène, le muon prend la place des électrons de valences qui maintiennent un lien covalent entre les atomes, mais à cause des propriétés du muon, cette molécule est beaucoup plus petite que sa contrepartie liée par un électron [4].

Lorsque cette liaison se produit, les deux nucléons se retrouvent rapprochés d'un facteur de près de 200, leur séparation devenant donc de l'ordre de 260 fm [19]. Sachant que la force forte résiduelle liant les nucléons ensemble s'étend à quelques femtomètres du noyau [15], il devient alors suffisamment aisé pour un des deux nucléons de faire effet tunnel au travers de la barrière de potentiel coulombienne positive de l'autre noyau qui, en plus d'être moins longue, est masqué par la présence du muon. Il s'en suit une fusion très rapide, dans le cas du deutérium-tritium en helium, nous avons :



Cette réaction est tellement rapide, que durant la courte durée de vie d'un muon, il aurait le temps de catalyser de l'ordre de 1000 fusions, et ce, à température pièce. Il s'agit donc d'une

forme de fusion froide, puisqu'elle ne nécessite pas de température extrême pour avoir lieu, en fait un taux de fusion élevé reste présent même pour des températures très faibles de 30 K et possiblement moins [4].

Il survient par contre un problème lors de la fusion, lorsque le noyau d'hélium est créé, habituellement le muon est éjecté et peut continuer son rôle de catalyseur, mais dans 0.848 % des cas [16], celui-ci reste lié au noyau d'hélium. Le muon ne participe alors plus aux réactions de fusion et finit par se désintégrer. Il s'agit d'un problème pour ceux qui voudraient utiliser cette technique pour produire de l'énergie dans ce qui pourrait être une centrale électrique. Le problème vient du fait que pour produire un μ^- il faut environ 5 GeV et à cause de ce problème, le muon est limité à environ une centaine de fusions et une production d'environ 2 GeV. Puisqu'il s'en suit une nette perte d'énergie, si l'on arrive pas à rendre les accélérateurs plus efficaces ou réduire le problème de liaison à l'hélium, son utilisation pour alimenter le monde d'une énergie propre semble ne pas être pour demain [22].

Malgré cette barrière qui semble insurmontable, l'espoir d'une source d'énergie avec autant de potentiel maintient la curiosité et la recherche d'un moyen d'optimiser la réaction se poursuit. Plusieurs voies ont été abordées pour produire plus de fusions par muon, dont un changement de mixture hydrogène/deutérium/tritium, la recherche d'une température favorisant des résonances et des recherches sur l'efficacité des accélérateurs [21].

Une des manières d'utiliser cette fusion qui semble pouvoir fonctionner est un réacteur hybride où les neutrons produits par la réaction de fusion sont utilisés pour fissionner des atomes d'uranium 238 placés autour. Cette sorte de réacteur aurait l'avantage de pouvoir être contrôlé très rapidement, puisque la fusion et la fission seraient dépendants de l'activation de l'accélérateur produisant les muons. En cas de problème, un tel réacteur pourrait donc être arrêté presque immédiatement. Il a également l'avantage de pouvoir réutiliser les protons de l'accélérateur pour fissionner l'uranium 238 qui est normalement non fissile dans réacteurs traditionnels, mais comme il compose près de 99% de l'uranium naturel, il fait une source abondante de combustible qui n'a pas à être enrichi avant d'être utilisé. Si l'uranium ne convient pas, il pourrait être remplacé par du thorium 232 qui est encore plus abondant que l'uranium [21] [22].

7 Conclusion

Au travers de ce texte, nous avons pu voir que le muon est une particule très semblable à l'électron, si ce n'est de sa masse 207 fois plus élevée, de sa vie moyenne très courte de $2.2 \mu s$ et de son moment magnétique anomal qui dévie du modèle standard (3). S'il est très peu courant dans notre vie, il peut naître des accélérateurs ou des rayons cosmiques (4) avant de se trouver dans un état lié avec un électron ou un noyau selon sa charge (5). Durant sa courte vie, il peut tout de même faire bien des choses, tel la tomographie de structures immenses ou dangereuses (6), nous confirmer la relativité restreinte (6) ou nous aider à produire de l'énergie nucléaire (6). Il semblerait donc que même si la vie est courte, elle peut être pleine d'aventures et vaut la peine d'être vécue à fond ; si le muon est capable, vous aussi !

Références

- [1] Anonymous. Muon. <https://en.wikipedia.org/wiki/Muon>, 2012.
- [2] Anonymous. Moment magnétique anomal. https://fr.wikipedia.org/wiki/Moment_magnétique_anomal, 2018.
- [3] AM Baldini, Y Bao, E Baracchini, Carlo Bemporad, F Berg, M Biasotti, G Boca, M Cascella, PW Cattaneo, G Cavoto, et al. Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ with the full dataset of the meg experiment. *The European Physical Journal C*, 76(8) :434, 2016.
- [4] WH Breunlich, P Kammel, JS Cohen, and M Leon. Muon-catalyzed fusion. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 39(1) :311–356, 1989.
- [5] Per Carlson. A century of cosmic rays. *Phys. Today*, 65(2) :30, 2012.
- [6] Michel Davier, Andreas Hoecker, Bogdan Malaescu, and Zhiqing Zhang. Reevaluation of the hadronic contributions to the muon $g-2$ and to $\alpha(m_z^2)$. *The European Physical Journal C*, 71(1) :1515, 2011.
- [7] A. Einstein and SBP Editors. *Relativity : The Special and the General Theory*. Samaira Book Publishers, 2017.
- [8] D. H. Frisch and J. H. Smith. Measurement of the Relativistic Time Dilation Using μ -Mesons. *American Journal of Physics*, 31 :342–355, May 1963.
- [9] Peter Galison. The discovery of the muon and the failed revolution against quantum electrodynamics. *Centaurus*, 26(3) :262–316, 1982.
- [10] Donald E Groom, Nikolai V Mokhov, and Sergei I Striganov. Muon stopping power and range tables 10 mev–100 tev. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 78(2) :183–356, 2001.
- [11] Particle Data Group. Review of particle physics. *Phys. Rev. D*, 98 :030001, Aug 2018. Il s’agit d’un regroupement de recherches sur les propriétés des particules.
- [12] Victor Hess. On the Observations of the Penetrating Radiation during Seven Balloon Flights. 2018.
- [13] Vernon W Hughes and CS Wu. Muon physics. volume i. electromagnetic interactions. 1977.

- [14] Toichiro Kinoshita. *Quantum electrodynamics*, volume 7. World Scientific, 1990.
- [15] Marleau L. Introduction à la physique des particules. <http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/intl/fr/cours.html>, 2019.
- [16] VE Markushin. Sticking and stripping in muon-catalyzed fusion. Technical report, 1987.
- [17] Kunihiro Morishima, Mitsuaki Kuno, Akira Nishio, Nobuko Kitagawa, Yuta Manabe, Masaki Moto, Fumihiko Takasaki, Hirofumi Fujii, Kotaro Satoh, Hideyo Kodama, et al. Discovery of a big void in khufu’s pyramid by observation of cosmic-ray muons. *Nature*, 552(7685) :386, 2017.
- [18] Kunihiro Morishima, Akira Nishio, Masaki Moto, Toshiyuki Nakano, and Mitsuhiro Nakamura. Development of nuclear emulsion for muography. *Annals of Geophysics*, 60(1) :0112, 2017.
- [19] Kanetada Nagamine. *Introductory muon science*. Cambridge University Press, 2003.
- [20] John Perry, Mara Azzouz, Jeffrey Bacon, Konstantin Borozdin, Elliott Chen, Joseph Fabritius, Edward Milner, Haruo Miyadera, Christopher Morris, Jonathan Roybal, et al. Imaging a nuclear reactor using cosmic ray muons. *Journal of Applied Physics*, 113(18) :184909, 2013.
- [21] C Petitjean. Progress in muon catalyzed fusion. *Nuclear Physics A*, 543(1-2) :79–97, 1992.
- [22] Yu V Petrov. Muon catalysis for energy production by nuclear fusion. *Nature*, 285(5765) :466, 1980.
- [23] Bruno Rossi and David B. Hall. Variation of the rate of decay of mesotrons with momentum. *Phys. Rev.*, 59 :223–228, Feb 1941.
- [24] H Tanaka, K Nagamine, N Kawamura, SN Nakamura, K Ishida, and K Shimomura. Development of a two-fold segmented detection system for near horizontally cosmic-ray muons to probe the internal structure of a volcano. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 507(3) :657–669, 2003.
- [25] M. Wolverton. Muons for Peace. *Scientific American*, 297(3) :26–28, September 2007.