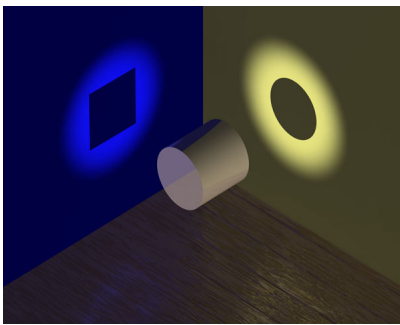
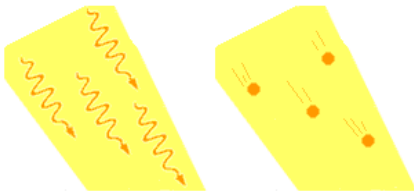


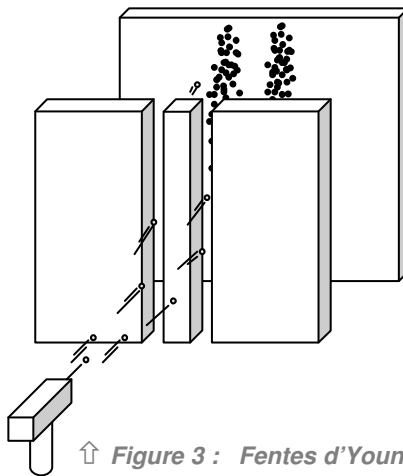
1 mars **Albert Einstein** publie un premier article révolutionnaire dans la revue "Annalen der Physik", intitulé "Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière".

Pour comprendre la nature de la lumière, il s'est penché sur l'effet photoélectrique, phénomène par lequel certains matériaux émettent des électrons sous l'action des rayons lumineux. En s'appuyant sur les travaux de **Max Planck**, il explique que la lumière est formée de "quanta" (qu'on appellera plus tard "photons"), sorte de grains d'énergie qui, en fonction de la fréquence du rayonnement, provoque l'émission de ces électrons.

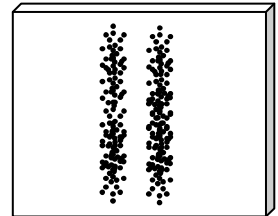
Il en déduit que la lumière est à la fois continue (une onde) et discontinue (des particules). Cette conclusion l'amènera alors à la dualité onde-particule de la lumière car cette dernière présente simultanément les propriétés physiques de l'onde et celles de la particule.



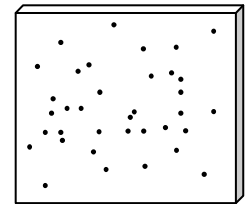
↑ Figure 2 : La dualité



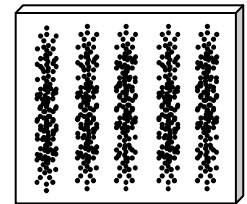
↑ Figure 3 : Fentes d'Young



↑ Figure 4



↑ Figure 5



↑ Figure 6

Questions :

- Dans l'expérience des fentes d'Young, distinguer les « phases » du voyage d'un électron jusqu'au dispositif détecteur.
- Pourquoi les physiciens ayant effectué cette expérience ont-ils envoyé les électrons un après l'autre jusqu'au détecteur ?
- Quelles sont les propriétés différenciant un photon d'un électron ?
- En quoi cette expérience montre le caractère probabiliste des phénomènes quantiques ?

ELEMENTS DE REPONSE :

- a. Dans l'expérience des fentes d'Young, distinguer les « phases » du voyage d'un électron jusqu'au dispositif détecteur.

Chaque électron **part du canon comme une particule**, mais **devient une « onde de possibilité »** et passe par les deux fentes en interférant avec lui même, puis tape le détecteur derrière les fentes **comme une particule**.

- b. Pourquoi les physiciens ayant effectué cette expérience ont-ils envoyé les électrons un après l'autre jusqu'au détecteur ?

Le fait de regarder modifie le comportement de l'électron et ce dernier se comporte alors comme une petite bille. Bienvenu dans le monde quantique !

- c. Quelles sont les propriétés différenciant un photon d'un électron ?

Le photon est un quantum d'énergie ayant :

- une masse nulle
- une charge nulle
- une vitesse égale à c dans le vide

L'électron est une particule possédant une masse, une charge électrique

- d. En quoi cette expérience montre le caractère probabiliste des phénomènes quantiques ?

Mathématiquement, l'électron peut passer par la fente de gauche, la fente de droite, les deux ou même par aucune.

Exercice – Protons énergétiques (5,5 points)

Des protons énergétiques sont des protons animés d'une grande vitesse.

Le but de cet exercice est d'exploiter des documents relatifs à deux exemples de l'action de protons énergétiques sur la matière : le rayonnement cosmique et la protonthérapie.

Données :

Charge électrique du proton :	$e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.
Masse du proton :	$m_p = 1,673 \times 10^{-27} \text{ kg}$.
Mégaélectron-volt :	$1 \text{ MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$.
Vitesse de la lumière dans le vide :	$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$.
Constante de Planck :	$h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ J.s}$.

1. Le proton

Document 1

Les interactions dans le noyau

Dans un noyau atomique, trois interactions fondamentales sont mises en jeu entre les nucléons (protons et neutrons) : l'interaction gravitationnelle, l'interaction électrique et l'interaction nucléaire forte.

L'interaction gravitationnelle est attractive ; dans un noyau, elle est nettement plus faible que l'interaction électrique répulsive entre protons. C'est l'interaction nucléaire forte qui assure la cohésion du noyau atomique.

Document 2

Les quarks constitutifs du proton

Le proton est composé de trois particules : deux quarks up et un quark down. Les quarks sont des particules élémentaires qui portent une fraction de la charge électrique du proton. La charge du quark down est $-\frac{e}{3}$.

1.1. L'interaction forte est-elle attractive ou répulsive ? Est-elle plus ou moins intense que l'interaction électrique ? Justifier vos réponses à l'aide du document 1.

1.2. Déterminer la charge électrique d'un quark up en l'exprimant sous la forme d'une fraction de la charge e du proton.

2. Les protons cosmiques

Document 3

Rayonnement cosmique

La Terre est arrosée par une pluie de particules, nommée rayonnement cosmique. Ce phénomène est le résultat de l'arrivée de particules énergétiques (provenant du Soleil, de la Galaxie et plus globalement de tout l'Univers) dans la haute atmosphère terrestre. Ces particules, principalement des protons (87%) entrent en collision avec les noyaux des molécules de l'atmosphère.

Les produits de ces collisions primaires heurtent à leur tour d'autres noyaux produisant ainsi une gerbe de particules secondaires. Certaines parviennent jusqu'au sol, d'autres sont absorbées par l'atmosphère, et d'autres encore induisent de nouvelles réactions qui donneront naissance à des particules tertiaires, etc.

Une seule particule cosmique très énergétique peut générer une gerbe contenant plusieurs milliards de particules (voir **figure 1**). Plusieurs types de particules atteignent le sol. Parmi ces particules on trouve les muons.

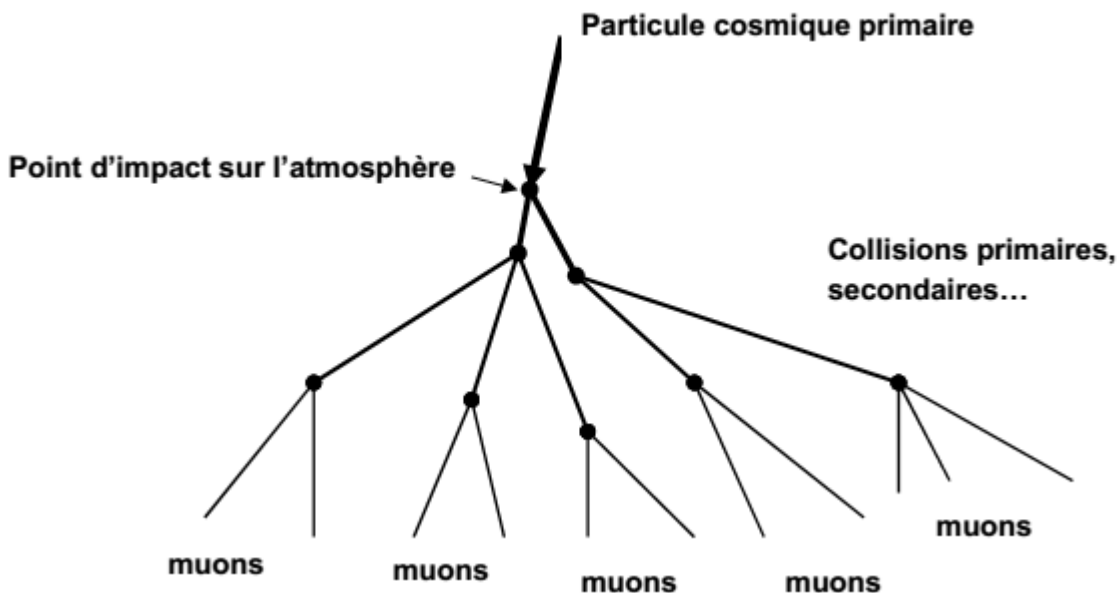


Figure 1 : Représentation simplifiée des gerbes issues de rayonnements cosmiques

Document 4

Rayons cosmiques relativistes

On peut appliquer avec une bonne approximation les lois de la mécanique classique, à toute particule animée d'une vitesse inférieure à 10% de la célérité de la lumière dans le vide, et utiliser l'expression de l'énergie cinétique $E_c = \frac{m.v^2}{2}$. Lorsqu'on est dans cette situation, la particule est dite « classique ». Dans le cas contraire, la particule est dite « relativiste ».

Par exemple, les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques sont relativistes. Ils sont d'origine extrasolaire et leur énergie cinétique est typiquement comprise entre 100 MeV et 10 GeV.

2.1. Calculer, en joule puis en mégaelectron-volt, l'énergie cinétique d'un proton animé d'une vitesse égale à 10% de la célérité c de la lumière dans le vide.

2.2. Justifier par un argument quantitatif la phrase du document 4 : « ...les protons les plus énergétiques des rayons cosmiques sont relativistes. »

2.3. D'après la théorie de la dualité onde-corpuscule, que l'on doit au scientifique Louis de Broglie, on associe une onde de matière au proton.

2.3.1. Calculer la valeur de la quantité de mouvement p d'un proton dont la vitesse vaut 10% de c .

2.3.2. En déduire la valeur de la longueur d'onde λ associée.

EXERCICE 1 : Protons énergétiques (5,5 points)

1. Le proton

1.1. (0,25+0,25 pt) L'interaction nucléaire forte doit compenser l'interaction électrique répulsive entre protons de manière à « assurer la cohésion du noyau atomique » (Cf. doc.1). Donc elle est attractive et plus intense que l'interaction électrique.

1.2. (0,5 pt) La charge d'un proton est $+e$. Il contient un quark down de charge $-e/3$ et deux quarks up (de charge Q) : $e = -\frac{e}{3} + 2Q$

$$2Q = e + \frac{e}{3} = \frac{4}{3}e$$

$$Q = \frac{2}{3}e$$

2. Les protons cosmiques

2.1. (0,5 pt) $E_c = \frac{m.v^2}{2}$

$$E_c = \frac{1,673 \times 10^{-27} \times \left(\frac{10}{100} \times 3,00 \times 10^8 \right)^2}{2} = 7,5 \times 10^{-13} \text{ J (on conserve 2 chiffres significatifs comme 10\%)}$$

$$E_c(\text{MeV}) = \frac{E_c(\text{J})}{1,602 \times 10^{-13}} = 4,7 \text{ MeV}$$

2.2. (0,5 pt) Les protons classiques les plus rapides ont une énergie de 4,70 MeV. Les protons cosmiques ont une énergie nettement supérieure (comprise entre 100 MeV et 10 GeV); ils possèdent une vitesse bien plus grande et sont donc relativistes.

2.3.1. (0,5 pt) $p = m v$

$$p = 1,673 \times 10^{-27} \times \frac{10}{100} \times 3,00 \times 10^8 = 5,0 \times 10^{-20} \text{ kg.m.s}^{-1}$$

2.3.2. (0,5 pt) $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v}$

$$\lambda = \frac{6,62 \times 10^{-34}}{1,673 \times 10^{-27} \times \frac{10}{100} \times 3,00 \times 10^8} = 1,3 \times 10^{-14} \text{ m}$$

