

Cosmologie et relativité générale

Activités pour les élèves du Secondaire II

Alice Gasparini, Andreas Müller

- Série 1 : Grandeurs
 - Série 2 : Expansion
 - Série 3 : Principe d'équivalence
 - Série 4 : Courbure
 - Série 5 : Lentilles gravitationnelles
 - Série 6 : Trous noirs
 - Série 7 : Equations cosmologiques
 - Série 8 : Chronologie du Big Bang
 - Série 9 : Ondes gravitationnelles
-
- Activité expérimentale 1 : L'effet Doppler cosmologique
 - Activité expérimentale 2 : La courbure du cône



SwissMAP

The Mathematics of Physics
National Centre of Competence in Research



**UNIVERSITÉ
DE GENÈVE**

©Terms of use

You are free to copy and redistribute the present material, as well as to adapt it and or build upon it in any medium or format under the following terms:

- You must give appropriate credit, provide a link to the original, and indicate if changes were made.
- You may not use the material for commercial purposes.
- If you adapt the material or build on, you must distribute your contribution under the same condition as this original

Suggested citation:

A. Gasparini (UniGE, SwissMAP) et A. Müller (UniGE, Didactique de la Physique)

Cosmologie et relativité générale : activités pour les élèves du Secondaire II,

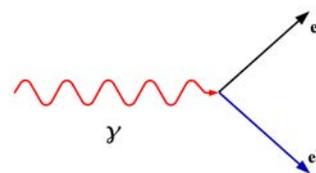
Série 8 : Chronologie du Big Bang

(NCCR SwissMAP/Education, Genève 2016) ; <http://www.nccr-swissmap.ch/education>

Série 8 : Chronologie du Big Bang

Exercice 1 : Production de paires

- a) Déterminer l'énergie minimale E d'un photon (la particule associée à une onde électromagnétique) pour qu'il puisse être converti en
- une paire électron/positron ($E_{e/po}$);
 - une paire proton/antiproton ($E_{pr/la}$).

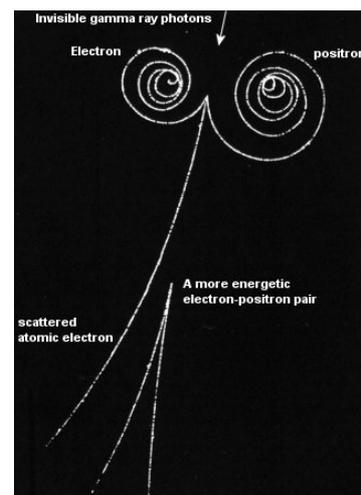


- b) Ces valeurs sont-elles en accord avec les fourchettes d'énergies correspondantes à l'époque des annihilations des particules respectives données dans la théorie ? Sait-on pourquoi les paires de particules/antiparticules ne se sont pas complètement annihilées (aujourd'hui on observe des protons et des électrons mais pas d'antiparticules)?

- c) En sachant que la relation entre l'énergie d'un photon E et la longueur d'onde associée λ est

$$E = hc/\lambda,$$

calculer la longueur d'onde correspondante aux énergies minimales pour produire chaque paire de particules trouvées au point a). Dans chaque cas, déterminer de quel type de radiation il s'agit.



Crédit : <https://universe-review.ca/F15-particle02.htm>

N. B. La longueur d'onde associée à l'énergie de masse d'une particule, divisée par 2π s'appelle **longueur d'onde de De Broglie** de la particule, et est très utilisée en physique des particules $\tilde{\lambda} = \lambda/2\pi$.

- d) Pourquoi, même si son énergie le permettait, un photon ne peut pas être converti en paire proton – neutron ?

Exercice 2 : Energie potentielle électrique

- a) Au chapitre 6 nous avons obtenu la formule de l'énergie potentielle *gravitationnelle* d'un système de deux masses sphériques, m_1 et m_2 , dont les centres sont situés à une distance r . Réécrire cette formule. Quel est le signe de cette énergie ?
- b) En s'inspirant de l'analogie entre la loi de gravitation universelle et la loi de Coulomb, écrire une formule semblable à celle écrite au point a) donnant l'énergie potentielle *électrique* de deux charges q_1 et q_2 , dont les centres sont à une distance r . Quel est le signe de cette énergie ?
- c) Utiliser la formule écrite au point b) et les données dans l'Annexe A du pour calculer l'énergie potentielle électrique d'un proton et un électron dans un atome d'hydrogène.
- d) Sans faire de calculs, déterminer quelle serait cette énergie si au lieu d'avoir un système proton – électron, on avait un système proton – proton, à la même distance.

Exercice 3 : Température à la recombinaison

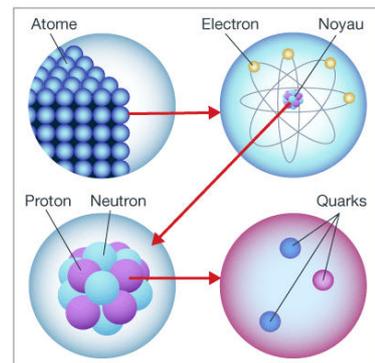
Imaginons d'avoir un plasma (un gaz formé par de particules chargées) de protons et d'électrons.

- Expliquer ce que signifie qu'un ensemble d'un grand nombre de particules est en *équilibre thermique*, et pourquoi l'univers primordial peut être considéré comme un plasma en équilibre thermique.
- En utilisant la relation entre la température et l'énergie moyenne des particules d'un plasma (Annexe E) et le résultat du point c) de l'exercice 2, calculer la température minimale qu'un plasma doit avoir pour que les atomes soient ionisés.
- À quelle époque de l'histoire thermique de l'univers cette température correspond?

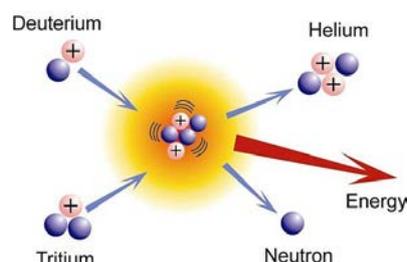
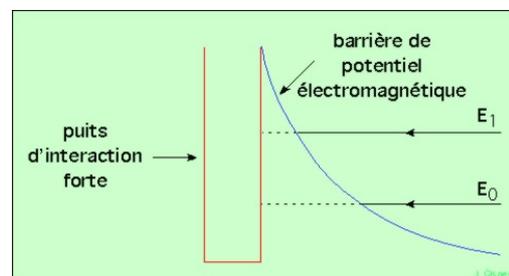
Exercice 4 : Interaction forte

L'interaction forte (Annexe F) est une parmi les 4 interactions fondamentales de la nature. Elle n'affecte pas directement notre vie quotidienne car elle ne devient significative – puis dominante – qu'à partir de très petites échelles de distances, de l'ordre de 10^{-15} m (1fm).

- Quel(s) objet(s) connaissez-vous à cette échelle ?
- Sur quelles particules l'interaction forte agit-elle ?
- Est-ce que les atomes seraient stables, s'il n'existait pas l'interaction forte ?
- Calculer l'ordre de grandeur (ODG) de l'énergie potentielle électrique de deux protons qui se rapprochent jusqu'à la distance où l'interaction forte devient plus grande que celle électrique, soit environ 10^{-15} m.



L'ODG trouvé au point d) correspond à l'énergie minimale que des protons devraient avoir pour fusionner et former un noyau d'hélium (on parle de **fusion nucléaire**), s'ils étaient de particules classiques (sans tenir compte des effets quantiques). En d'autres mots, la fusion nucléaire est un processus « difficile » à des températures ordinaires, car il faut fournir une très grande énergie aux protons pour leur permettre de vaincre la **barrière coulombienne** de l'énergie potentielle électrique, qui a la tendance à repousser deux charges du même signe. Mais, une fois passée cette barrière, la fusion nucléaire libère énormément d'énergie, car le puits d'énergie potentielle (qui devient négative) de l'interaction forte, à une l'échelle de $1\text{fm} = 10^{-15}$ m, est très profond.



Exercice 5 : Température associée à la barrière coulombienne

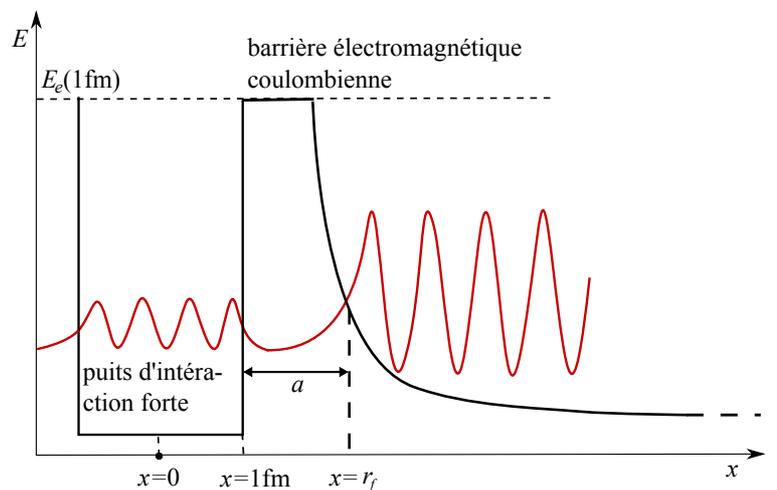
Imaginons d'avoir un plasma de protons (noyaux d'hydrogène). En utilisant la relation entre la température et l'énergie moyenne des particules d'un gaz de protons (Annexe E), calculer la température minimale du plasma primordial pour qu'un nombre significatif de ses protons puisse passer la « barrière coulombienne » (énergétique) trouvée dans l'exercice précédent. Quel est l'ordre de grandeur de cette température ?

Exercice 6 : Température de fusion nucléaire et effet tunnel quantique

En réalité, la fusion nucléaire est possible à des températures plusieurs ODG plus basses que celles obtenues dans l'exercice 5, où nous avons considéré les protons comme de corpuscules qui doivent dépasser un potentiel (comme une balle qui doit passer au delà d'un mur).

Mais dans le monde microscopique subatomique, il n'a pas de sens de considérer les particules comme de corpuscules ponctuels, dont on peut théoriquement connaître la position, la vitesse, l'accélération et l'énergie à un instant arbitrairement précis. En réalité, le concept de « corps matériel », solide, existe seulement à l'échelle macroscopique.

- Lire attentivement l'Annexe G du cours.
- En sachant que la température de fusion à l'intérieur du Soleil est de 15 millions de degrés Kelvin, déterminer quelle est l'énergie des protons qui fusionnent en noyaux d'hélium par effet tunnel.
- Quelle est la distance moyenne r_f entre les protons à cette énergie ?
- En déduire la « taille » de la « barrière coulombienne », la longueur a du dessin ci-contre. Que peut on conclure ?



Exercice 7 : Energie d'unification de la gravitation et l'électromagnétisme

En comparant les forces électromagnétique et gravitationnelle entre un électron et un proton dans un atome d'hydrogène, mais aussi entre la Terre et la Lune (si on pouvait leur arracher tous les électrons), il est possible de constater que l'interaction gravitationnelle est beaucoup plus faible que celle électromagnétique (Série 1, exercice 6).

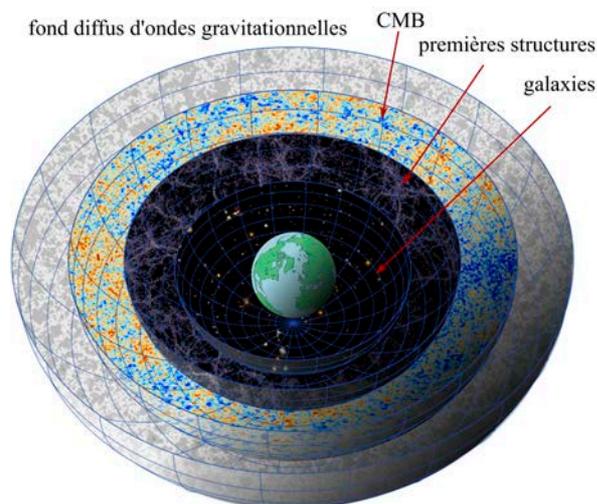
- Supposons maintenant d'avoir deux particules identiques, de même charge $q_1 = q_2 = q$ inconnue, et même masse $m_1 = m_2 = m$, aussi inconnue. Quel doit être le rapport m/q pour que l'interaction gravitationnelle entre ces deux particules soit de même intensité que celle électromagnétique ?
- Quelle doit être la masse m que les particules devraient avoir si leur charge était égale à la charge fondamentale (celle du proton et de l'électron, $q = e = 1,02 \cdot 10^{-19}$ C) pour que l'interaction gravitationnelle et l'interaction électromagnétique entre elles soit de même intensité ?
- À quelle énergie correspond cette masse ? Donner la réponse en J, puis en eV.

Cela signifie que si une charge élémentaire possède une énergie (cinétique et/ou de masse) de cet ordre, alors son interaction gravitationnelle est comparable à celle électromagnétique, donc aussi aux interactions nucléaires, puisque – à ces échelles d'énergie – les interactions électrique et nucléaires sont déjà unifiées. Si l'énergie de la particule est plus petite, alors la gravitation est plus faible que les autres interactions. C'est à partir de ce seuil d'énergie que la gravitation se découple du plasma primordial.

- Le résultat obtenu au point c) est-il en accord avec la valeur donnée dans la théorie pour le découplage de la gravitation? Commenter ce résultat.

Nous rappelons qu'au moment du découplage électromagnétique du plasma primordial (380 000 ans après le Big Bang), les ondes correspondantes (électromagnétiques) ont pu s'échapper et voyager librement dans l'espace sous la forme de fond diffus cosmologique (CMB) : à cette époque l'univers est devenu « transparent » aux ondes électromagnétiques. Aujourd'hui, l'analyse de cette radiation fossile (une « photo de l'univers bébé ») nous permet d'extraire des informations de l'univers au moment du découplage (électromagnétique), environ 380 000 ans après le Big Bang.

De la même manière, au moment du découplage gravitationnel, les ondes correspondantes à cette interaction – les ondes gravitationnelles – ont cessé d'interagir avec le plasma primordial et ont pu voyager librement : l'univers est devenu transparent à la radiation gravitationnelle. La détection de ce type d'ondes est difficile, à cause de leur faiblesse (due à la nature même de la gravitation). Mais, pour cette même raison, une détection du fond diffus cosmologique d'ondes gravitationnelles nous permettrait d'établir un portrait de l'univers à l'âge du découplage gravitationnel : $t = 10^{-43}$ s après le Big Bang.



Exercice 8 : Vrai ou faux ?

Justifier chaque réponse.

- 1) La densité d'énergie sous forme de radiation a été dominante pour des redshifts $z < 10$.
- 2) Dans l'équation de Friedmann, actuellement le terme de la constante cosmologique domine l'expansion de l'univers.
- 3) Avec l'expansion, la densité d'énergie des radiations diminue moins rapidement que la densité de matière.
- 4) La densité de l'énergie du vide reste constante malgré l'expansion de l'univers.
- 5) L'univers actuel est rempli de toutes les particules et les antiparticules produites lors du Big Bang.
- 6) La nucléosynthèse primordiale a eu lieu après la recombinaison : des atomes d'hydrogène et/ou deutérium ont fusionné pour donner des atomes avec un nombre atomique plus élevé.
- 7) Lors de la nucléosynthèse primordiale, tous les éléments existants aujourd'hui plus lourds que l'hydrogène ont été produits.
- 8) La plus grande partie de l'hélium présent aujourd'hui dans l'univers a été produit dans les étoiles.
- 9) L'abondance d'hélium observée est une confirmation du modèle du Big Bang.
- 10) Toute la matière, baryonique ou non, s'est découplée du plasma primordial au même temps, après la recombinaison.
- 11) On appelle *âges sombres* l'époque de l'évolution de l'univers où la radiation électromagnétique est négligeable.
- 12) Les premières étoiles formées après le Big Bang étaient beaucoup plus massives que les étoiles qu'on observe actuellement.
- 13) La réionisation a eu lieu après le découplage à cause d'une brève phase de contraction de l'univers.