

La physique subatomique dans les collèges et les lycées



Union des professeurs
de physique et de chimie

**Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »
Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010**



Collège

Programmes de 2008

Classe de 3^e

Connaissances

- Constituants de l'atome : noyau et électrons.
- Structure lacunaire de la matière.
- Les atomes et les molécules sont électriquement neutres ; l'électron et les ions sont chargés électriquement.

Capacités

- Extraire d'un document (papier, multimédia) les informations relatives aux dimensions de l'atome et du noyau.

Commentaires

- Il n'est pas demandé de donner la composition du noyau.



Collège

Programmes de 2008

Classe de 3^e

Permet d'accéder à

- La conduction du courant dans les métaux
- La formation des ions et la conductivité des solutions ioniques
- L'étude de diverses réactions chimiques en solution aqueuse

Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »
Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010

udppc



Lycée général

Une évolution...

- I. Une montée en puissance : 1966-79*
- II. L' « apogée » de l'enseignement de la physique subatomique : 79-1999*
- III. Déclin relatif des contenus : 2000-2009*



Lycée général - I

1902

Etude des rayons X

1942

Physique classique

Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »
Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010

udppc



Lycée général - I

1966 *Math-Elem devient les terminales C et D*

| Seconde | Première | Terminale |
|---------|----------|---|
| | | <ul style="list-style-type: none">• Effet photoélectrique, photons, rayons X• Noyau atomique, radioactivité, relation d'Einstein |



Lycée général - I

1979 *Commission Lagarrigue*

| Seconde C | Première C | Terminale C/D/E |
|---|------------|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Atome : électrons, noyaux (protons et neutrons) | | <ul style="list-style-type: none">• Mouvement d'une particule dans un champ électrique et magnétique uniforme• Particules de grande énergie (masse, énergie, quantité de mouvement)• Le photon : effet photo-électrique, effet Compton, transitions électroniques dans l'atome• Association onde-particule, boîte 1D• Noyau, réactions nucléaires spontanées et provoquées |



Lycée général - II

1981-82 *La seconde devient indifférenciée, 1^e S*

1987-89 *Allégements de programme*

| Seconde | Première S | Terminale C/D/E |
|---|------------|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Atome : électrons, noyaux (protons et neutrons) | | <ul style="list-style-type: none">• Mouvement d'une particule dans un champ électrique et magnétique uniforme• Particules de grande énergie• Niveaux d'énergie• Noyau, réactions nucléaires spontanées et provoquées <p><i>Plus d'effet photoélectrique</i> <i>Plus d'effet Compton</i></p> |



Lycée général - II

1989 *Ouvrages scolaires*

| PROGRAMME | | Term C/E - SEP89 |
|---|--|------------------|
| A – MÉCANIQUE | | |
| I. Cinématique | Vecteurs vitesse et accélération d'un point dans un repère donné. Cas du mouvement circulaire uniforme. | |
| II. Dynamique | II.1. Mouvement du centre d'inertie d'un solide. Relation $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{\Sigma}\vec{f}$ dans un repère galiléen. II.2. L'interaction gravitationnelle. Mouvement circulaire des satellites. II.3. Mouvement d'une particule soumise à une force \vec{f} constante. II.4. Le pendule élastique; équation différentielle du mouvement d'un oscillateur harmonique non amorti. Fréquence propre. Conservation de l'énergie. Amortissement d'un oscillateur. | |
| B – ÉLECTROMAGNÉTISME | | |
| I. Le champ magnétique | I.1. Mise en évidence expérimentale du champ magnétique. Spectres magnétiques. Vecteur champ magnétique \vec{B} . Champ magnétique créé par un solénoïde. I.2. Étude expérimentale de la trajectoire d'une particule chargée dans un champ magnétique uniforme : force subie, relation $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$. I.3. Action d'un champ magnétique sur un circuit parcouru par un courant; loi de Laplace. | |
| II. Induction électromagnétique | II.1. Induction électromagnétique : mise en évidence expérimentale; loi de Lenz; f.é.m. d'induction. II.2. Auto-induction : mise en évidence expérimentale : f.é.m. d'auto-induction; auto-inductance. Énergie emmagasinée par une bobine. | |
| III. Oscillations électriques | III.1. Circuits oscillants; a) Équation différentielle d'un circuit LC. Fréquence propre. Conservation de l'énergie; b) Entretien des oscillations à l'aide d'un circuit LC série à l'aide d'un circuit intégré linéaire. III.2. Génération de signaux périodiques. Multivibrateur astable de type RC, à inverseurs logiques. III.3. Circuits en régime sinusoïdal forcé; a) Oscillations forcées en régime sinusoïdal d'un circuit R.L.C. série, impédance. Résonance d'intensité, bande passante, facteur de qualité; b) Intensité et tensions efficaces. Puissance, facteur de puissance. | |
| C – OPTIQUE | | |
| I. Lentilles minces | I.1. Lentilles minces convergentes et divergentes. Position et grandeur de l'image. Vergence. I.2. Principe de l'objectif photographique. | |
| II. Dispersion de la lumière par un prisme; diffraction par un réseau | | |
| D – PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE | | |
| I. Particules de grande énergie | Les particules de grande énergie : expression de leur quantité de mouvement, de leur énergie totale et de leur énergie cinétique. Masse et énergie. Cas particulier du photon. Vérification expérimentales. | |
| II. Niveaux d'énergie atomiques | Spectres de raies d'émission et d'absorption. Existence de niveaux d'énergie discrets dans un atome. Relation $E_2 - E_1 = h\nu$. | |
| III. Noyau atomique | III.1. Composition du noyau; les nucléons, énergie de liaison. III.2. Réactions nucléaires spontanées : loi de décroissance d'un nucléide radioactif; radioactivités α , β^- , β^+ ; émission γ . Absorption des rayonnements. III.3. Réactions nucléaires provoquées : fission et fusion. | |

Physique - Terminale C, Hatier, 1989

Colloque SFP « L'enseignement de la physique subatomique »
Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010

udppc



Lycée général - II

1989 *Ouvrages scolaires*

D – PHYSIQUE ATOMIQUE ET NUCLÉAIRE

- I. Particules de grande énergie Les particules de grande énergie : expression de leur quantité de mouvement, de leur énergie totale et de leur énergie cinétique. Masse et énergie. Cas particulier du photon. Vérification expérimentales.
- II. Niveaux d'énergie atomiques Spectres de raies d'émission et d'absorption. Existence de niveaux d'énergie discrets dans un atome. Relation $E_2 - E_1 = h\nu$.
- III. Noyau atomique
- III.1. Composition du noyau; les nucléons, énergie de liaison.
 - III.2. Réactions nucléaires spontanées : loi de décroissance d'un nucléide radioactif; radioactivités α , β^- , β^+ ; émission γ . Absorption des rayonnements.
 - III.3. Réactions nucléaires provoquées : fission et fusion.

Physique - Terminale C, Hatier, 1989



Lycée général - II

PARTICULES DE GRANDE ÉNERGIE

I – Insuffisance de la mécanique classique

- 1 Choc de particules*
- 2 Expérience de Bertozzi*

II – Les postulats de la relativité

III – Dynamique relativiste

- 1 Lois de conservation*
- 2 Quantité de mouvement*
- 3 Énergie*
- 4 Unités*

IV – Invariant relativiste

V – Domaines de la mécanique relativiste

- 1 La mécanique classique, limite de la mécanique relativiste aux faibles vitesses*
- 2 Très grandes vitesses*

VI – Comment distinguer un objet relativiste d'un objet non relativiste

- 1 Exemples (comète, électron, proton)*
- 2 Conclusion*

VII – Principe d'équivalence masse-énergie

- 1 A l'échelle microscopique*
- 2 A l'échelle macroscopique*



4 Unités

a) Unités du Système International

m s'exprime en kg; v en $m \cdot s^{-1}$; $c = 3 \times 10^8 m \cdot s^{-1}$; p s'exprime en $kg \cdot m \cdot s^{-1}$; E et E_c en J.

b) Autres unités

– **Énergie** : en physique des particules, les unités sont l'électron-volt de symbole eV et ses multiples, en particulier le mégaelectron-volt de symbole MeV.

– **Masse** : d'après la relation : $E_0 = m c^2$,

$m c^2$ peut s'exprimer en MeV, donc la masse m peut s'exprimer en MeV/c^2 :

$$1 \text{ MeV}/c^2 = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 10^6}{(3 \times 10^8)^2} = 1,78 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

– **Quantité de mouvement** : la quantité de mouvement est homogène à une énergie divisée par une vitesse, elle peut donc s'exprimer en MeV/c :

$$1 \text{ MeV}/c = \frac{1,6 \times 10^{-19} \times 10^6}{3 \times 10^8} = 5,33 \times 10^{-22} \text{ kg} \cdot m \cdot s^{-1}.$$

IV. INVARIANT RELATIVISTE

Cherchons une relation entre l'énergie E d'une particule de masse m et la valeur p de sa quantité de mouvement, dans un référentiel où elle est en mouvement.

Dans ce référentiel :

• son énergie a pour expression : $E = \gamma m c^2$ (1)

• la valeur de sa quantité de mouvement est : $p = \gamma m v$ (2)

avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ soit $\gamma^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

ce qui peut s'écrire : $\gamma^2 - \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} = 1$ (3)

D'après (1) $\gamma = \frac{E}{m c^2}$ soit $\gamma^2 = \frac{E^2}{m^2 c^4}$

D'après (2) $\gamma v = \frac{p}{m}$ soit $\gamma^2 v^2 = \frac{p^2}{m^2}$

L'électron-volt est l'augmentation d'énergie cinétique classique d'un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Les multiples sont :

- le keV; 1 keV = 10^3 eV
- le MeV; 1 MeV = 10^6 eV
- le GeV; 1 GeV = 10^9 eV

Unités de la mécanique des particules :

- Énergie :
1 MeV = $1,6 \times 10^{-13}$ J
- Masse :
1 MeV/ c^2 = $1,78 \times 10^{-30}$ kg
- Quantité de mouvement :
1 MeV/ c = $5,33 \times 10^{-22}$ kg . m . s⁻¹.

| ÉNERGIE DE MASSE DE QUELQUES PARTICULES | |
|---|--------|
| | MeV |
| hypéron Ω | 1680 |
| hypéron Ξ | 1315 |
| hypéron Σ | 1190 |
| hypéron Λ | 1115 |
| neutron n | 939,55 |
| proton p | 938,25 |
| antiproton | 938,25 |
| kaon k^0 | 497,9 |
| kaon k^\pm | 493,7 |
| pion π^\pm | 139,6 |
| pion π^0 | 135,0 |
| muon μ^\pm | 105,6 |
| électron e^- | 0,511 |
| positron e^+ | 0,511 |
| neutrino | 0 |
| photon γ | 0 |

d'où en remplaçant γ^2 et $\gamma^2 v^2$ dans (3) :

$$\frac{E^2}{m^2 c^4} - \frac{p^2}{m^2 c^2} = 1$$

soit

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

Pour la particule, $m^2 c^4$ est une constante.

La relation $E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$ est vérifiée dans tous les référentiels galiléens, nous dirons qu'elle constitue un **invariant relativiste**.

Si la particule est au repos dans la référentiel considéré, sa quantité de mouvement p est nulle, nous retrouvons l'expression de l'énergie au repos de la particule :

$$E_0 = m c^2$$

Remarque : Certaines particules comme le photon, le neutrino et l'antineutrino ont une masse nulle (voir chapitres 20 et 21). Dans ce cas la relation précédente s'écrit :

$$E^2 - p^2 c^2 = 0 \text{ soit } E = p c$$

V. DOMAINE DE LA MÉCANIQUE RELATIVISTE

1 La mécanique classique, limite de la mécanique relativiste aux faibles vitesses

La mécanique classique et la mécanique relativiste sont-elles compatibles?

Examinons le cas où la vitesse d'une particule est faible devant celle de la lumière :

$$\frac{v}{c} \ll 1 \quad \beta \ll 1$$

• La quantité de mouvement d'un objet de masse m animé d'une vitesse \vec{v} , devient :

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v} = m \vec{v} \left(1 + \frac{v^2}{2 c^2} \right)$$

Si $v \rightarrow 0$, alors $\frac{v^2}{2 c^2} \ll 1$. On retrouve l'expression de la quantité de mouvement en mécanique classique :

$$\vec{p} = m \vec{v}$$

L'écart relatif entre les valeurs relativiste et classique est :

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{p_r - p_{cl}}{p_{cl}} = \frac{v^2}{2 c^2}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = (1 - \beta^2)^{-1/2} \approx 1 + \frac{\beta^2}{2} = 1 + \frac{v^2}{2 c^2}$$

Invariant relativiste
L'énergie et la quantité de mouvement d'une particule relativiste de masse m sont liées par la relation vérifiée dans tous les référentiels :

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4$$

Rappels mathématiques :
Soit ϵ , un nombre positif petit devant 1 :

$$(1 + \epsilon)^n \approx 1 + n \epsilon \quad n \in \mathbb{Q}$$

Lycée général - II

CHOCs DE PARTICULES

I – Principe

II – Analyse d'un cliché

1 Signe de la charge

2 Détermination des quantités de mouvement

3 Mesure des rayons de courbure

III – Lois de conservation (charge, p , énergie totale, nombre baryonique)

IV – Etude d'un choc élastique proton-proton

1 Observation du cliché

2 Conservation de la quantité de mouvement

3 Conservation de l'énergie

V – Etude d'un choc inélastique proton-proton

1 Observation du cliché

2 Conservation de la quantité de mouvement

3 Nature de la particule créée

4 Conservation de l'énergie



13

Dans une chambre à bulles un antiproton \bar{p} de quantité de mouvement p_1 telle que $p_1 = 1\,500\text{ MeV}/c$ rencontre en A un proton p initialement immobile. Des bulles marquent les trajectoires des particules possédant une charge électrique :

C_1 : trajectoire de \bar{p} avant le choc.
 C_3 et C_4 : trajectoires des particules issues du choc.
 C_1, C_3, C_4 sont dans un même plan; les directions respectives des tangentes en A et les rayons de courbure sont indiqués sur la figure g.

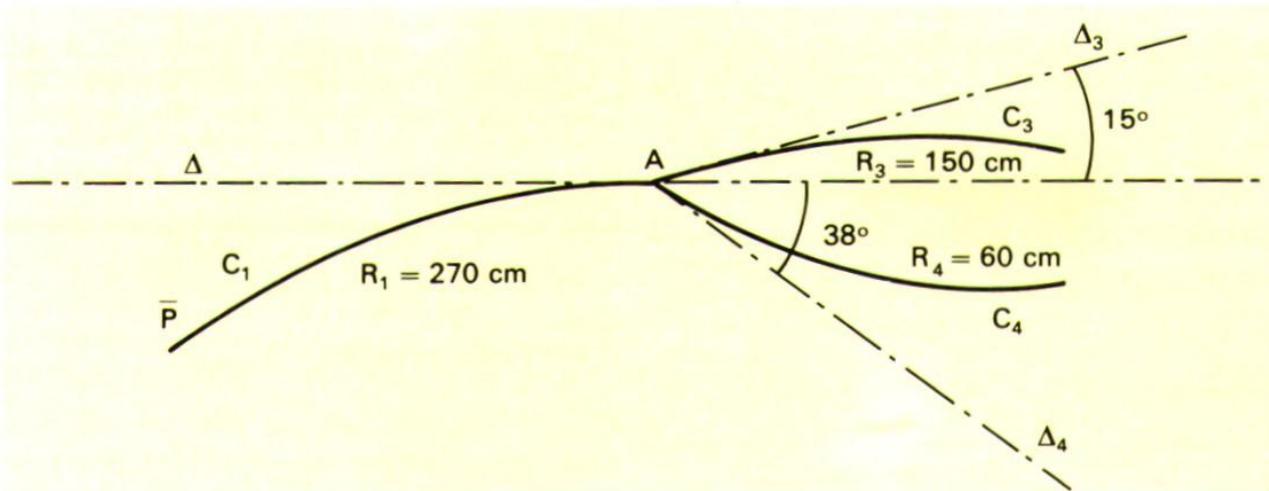


fig. g.

A₂ 1. Sachant que l'antiproton est une particule de charge négative, déterminer par sa direction, son sens et sa valeur, le vecteur champ magnétique supposé uniforme existant dans la chambre à bulles.

Quel est le signe de la charge des particules issues du choc? (On admettra que la valeur absolue de la charge de chaque particule est égale à celle de la charge élémentaire $e = 1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$.)

C₁ 2. Montrer que le choc antiproton, proton, produit nécessairement au moins une particule non chargée que l'on supposera être la seule ne laissant pas de trace, et dont on représentera la quantité de mouvement \vec{p}_5 .

Échelle des quantités de mouvement : 200 MeV/c seront représentés sur le graphique par une longueur de 1 cm.

C₁ 3. Pour vérifier la loi de conservation de l'énergie totale on envisage les deux hypothèses suivantes :
 Première hypothèse :

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{p} + \pi^+ + n$$

Deuxième hypothèse :

$$\bar{p} + p \rightarrow \bar{p} + p + \pi^0$$

Laquelle de ces deux hypothèses est la plus vraisemblable?
 On donne :

Masse du proton (m_p) = masse de l'antiproton ($m_{\bar{p}}$) telles que $m_p c^2 = m_{\bar{p}} c^2 = 938\text{ MeV}$;

Masse du méson π^+ (m_{π^+}) : $m_{\pi^+} c^2 = 140\text{ MeV}$;

Masse du méson π^0 (m_{π^0}) : $m_{\pi^0} c^2 = 135\text{ MeV}$;

Masse du neutron n (m_n) : $m_n c^2 = 939\text{ MeV}$;

Célérité de la lumière $c = 3 \times 10^8\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

D'après baccalauréat

Lycée général - III

1993-95 *Filière S avec spécialités en terminale*

| Seconde | Première S | Terminale S |
|---|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Atome : électrons, noyaux (protons et neutrons) | <ul style="list-style-type: none">• Energie nucléaire, radioactivité, fission, fusion• Centrale nucléaire, protection de l'environnement | <ul style="list-style-type: none">• Le photon, spectres d'émission et d'absorption |



Lycée général - III

2000-02 *Même structure, nouveaux programmes*

<ftp://trf.education.gouv.fr/pub/edutel/bo/2001/hs4/physchim.pdf>

| Seconde | Première S | Terminale S |
|---|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Spectres et application à l'astrophysique• Répartition des électrons en différentes couches appelées K, L, M ; cas des éléments 1 à 18 | <ul style="list-style-type: none">• Interactions fondamentales | <ul style="list-style-type: none">• Décroissance radioactive• Equivalence masse-énergie, fission, fusion• Quantification des échanges d'énergie <p><i>Le mouvement d'une particule dans E et B a disparu</i></p> |



Lycée général - III

2010-12 Réforme « Chatel » ; nouveau lycée

| Seconde | Première S | Terminale S |
|---|---|-------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Spectres et application à l'astrophysique• Répartition des électrons en différentes couches appelées K, L, M ; cas des éléments 1 à 18 | <ul style="list-style-type: none">• Particules élémentaires : électron, neutron, proton. Charge élémentaire• Interactions fondamentales• Cohésion du noyau et stabilité• Radioactivité naturelle et artificielle. Activité. Réactions de fission et de fusion• Découverte du neutrino dans la désintégration β | <i>Patienter jusqu'en mars 2011</i> |



Conclusion

Déclin relatif des contenus, mais...



Union des professeurs
de physique et de chimie

Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »

Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010



Conclusion

Déclin relatif des contenus, mais...

Répartition sur les 3 années de lycée, donc...



Union des professeurs
de physique et de chimie

Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »

Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010



Conclusion

Déclin relatif des contenus, mais
Répartition sur les 3 années de lycée, donc
Au final, des notions pour davantage d'élèves et...

 Union des professeurs
de physique et de chimie

Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »
Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010



Conclusion

Déclin relatif des contenus, mais...

Répartition sur les 3 années de lycée, donc...

Au final, des notions pour davantage d'élèves et...

Un vrai approfondissement en T^{ale} S en 2012 ?



Union des professeurs
de physique et de chimie

Colloque SFP « *L'enseignement de la physique subatomique* »

Conservatoire National des Arts et Métiers, Paris, 18-19 nov 2010

