



La physique subatomique dans les classes préparatoires aux grandes écoles (C.P.G.E.) et dans le premier cycle universitaire (Licence)

Par Arnaud Le Padellec, commission 'Enseignement' de la Société Française de Physique

DEFINITIONS

Physique subatomique: physique de la matière de taille inférieure à un atome

Périmètre considéré dans le cadre de cet exposé: élargi aux physique quantique (domaine des petits ‘objets’) et relativité restreinte (lien entre masse / énergie \Rightarrow particules)

C.P.G.E – filières scientifiques

- elles sélectionnent sur dossier après le baccalauréat et préparent en 2 ans les étudiants aux concours des écoles d'ingénieurs, des écoles normales supérieures, des écoles nationales agronomiques ou vétérinaires.

- un total de **1182 classes** dont 202 M.P.S.I, 208 PCSI, 55 MP*, 139 MP, 67 PC* et 105 PC, dans 238 lycées publics + 38 privés,

- ~ **41800 étudiants** – chiffres UPS rentrée 2009 (public / privé, 1^{ère} + 2^{ème} année + Adaptation Technicien Supérieur - A.T.S., filière réservée aux étudiants titulaires d'un D.U.T. ou d'un B.T.S. pour une formation d'un an) ⇒ filière MP 35 %, et filière PC 32%

- Ratio 1^{ère} année / 2^{ème} année: 1,02

- Elles offrent **sept voies en première année**

M.P.S.I. : mathématiques physique, sciences de l'ingénieur, P.C.S.I. : physique, chimie, sciences de l'ingénieur, P.T.S.I. : physique technologie, sciences de l'ingénieur, B.C.P.S.T. : biologie chimie physique et sciences de la Terre, T.S.I. : technologie et sciences industrielles, T.P.C. : technologie et physique chimie, T.B. : technologie et biologie

et **huit voies en seconde année** (avec ou sans *)

M.P. : mathématiques, physique, P.C. : physique, chimie, P.S.I. : physique sciences de l'ingénieur, P.T. : physique technologie, B.C.P.S.T., T.S.I., T.P.C., T.B.

LES PROGRAMMES DE PHYSIQUE

1^{ère} année

MPSI:

PREMIÈRE PARTIE: mécanique du point, électrocinétique, formation des images optiques et travaux pratiques

DEUXIEME PARTIE: électrocinétique - circuits linéaires en régime sinusoïdal forcé, mécanique, thermodynamique, électromagnétisme (électrostatique, mouvement des particules chargées dans les champs E et B, magnétostatique) et travaux pratiques

PCSI:

PREMIÈRE PARTIE: mécanique du point, électrocinétique et formation des images optiques (approche expérimentale)

DEUXIEME PARTIE: électrocinétique - circuits linéaires en régime sinusoïdal forcé, mécanique, thermodynamique, électromagnétisme (électrostatique, mouvement des particules chargées dans les champs E et B, magnétostatique), TP-COURS/ instrumentation électrique au laboratoire et TP-COURS/ réalisation de fonctions élémentaires

2^{nde} année

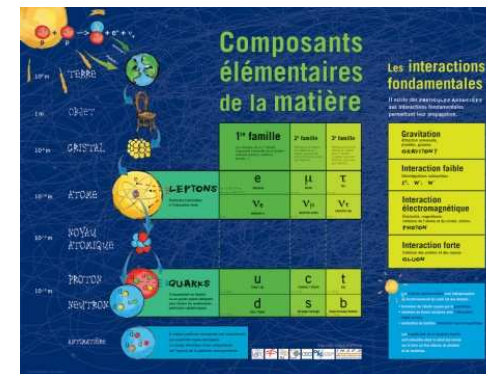
MP: Mécanique (Mécanique des systèmes, mécanique du solide), électrocinétique, électromagnétisme (électrostatique, équations de Maxwell, énergie EM, propagation et rayonnement, compléments de magnétostatique, induction électromagnétique), optique (Optique ondulatoire), thermodynamique / transferts thermiques, travaux pratiques

PC: Mécanique des fluides, électromagnétisme, physique des ondes, optique ondulatoire, diffusion de particules / diffusion thermique, thermodynamique, mécanique du solide, TP-Cours/ interférométrie à deux ondes : l'interféromètre de Michelson, TP-Cours/ spectroscopie à réseau, TP-Cours/ polarisation de la lumière, TP-Cours/ multivibrateur astable et TP

LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE ... **non présente explicitement !**

En sup'

- en introduction à la mécanique, ses 'limites' sont mentionnées côtés physique quantique et mécanique relativiste,
- les interactions fondamentales sont explicitement abordées mais se limitent dans leur développement à la gravitation et l'électromagnétisme (affichage assez généralisé du poster 'particules élémentaires' LAL 2005),



- dans la partie électromagnétisme - mouvement des particules chargées dans les champs E et B, il est possible de mentionner les accélérateurs de particules,
- dans le cadre de l'enseignement de chimie, mention est faite de la quantification des niveaux d'énergie dans l'atome d'hydrogène

MAIS dispositifs 'Travail d'Initiative Personnel Encadré – **TIPE**' et 'Analyse de document scientifique – **ADS**' qui offrent de nombreuses occasions d'ouvertures sur ces sujets (LHC, énergie nucléaire, réactions nucléaires, etc...)

MAIS également les Préparations aux Olympiades Internationales de Physique - IPhO, dans le cadre du dispositif 'Sciences à l'Ecole' !

- IPhO \Rightarrow concours international de très haut niveau, ouvert aux élèves ayant terminé leurs études secondaires, en fin d'études secondaires non scolarisés en université mais âgés de moins de 20 ans \Rightarrow CPGE scientifiques de première année, i.e., les sup !

- Sélection en plusieurs étapes.

\Rightarrow durant les deux premiers trimestres, les candidats bénéficient d'une préparation encadrée par des professeurs de classes préparatoires sous forme de compléments de cours dispensés dans des centres régionaux (Besançon, Brest, Cherbourg, Douai, Lille, Limoges, Montpellier, Mulhouse, Nantes, Neuilly-sur-Seine, Paris, Reims, Rennes, Sceaux, Toulouse et Versailles).

\Rightarrow au cours du mois de mai, et après une présélection nationale, les candidats retenus suivent à l'ENS Cachan, une semaine intensive de perfectionnement expérimental.

Pour le bloc PHYSIQUE SUBATOMIQUE+PHYSIQUE QUANTIQUE+RELATIVITE:

Ondes électromagnétiques : corps noir, loi de Stefan-Boltzmann

Physique quantique : effet photoélectrique, énergie et quantité de mouvement d'un photon, longueur d'onde de Broglie, principe d'incertitude de Heisenberg

Relativité restreinte : principe de relativité, composition des vitesses, effet Doppler relativiste, équation du mouvement relativiste, quantité de mouvement, énergie, relation masse-énergie, conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement.

LA PHYSIQUE SUBATOMIQUE ... **non présente explicitement !**

En spé'

- diffusion de particules en MP, PC et PSI, avec bilan de particules, loi phénoménologique de Fick et équation de la diffusion \Rightarrow peut être appliquée aux neutrons et aux réacteurs nucléaires,
- thermodynamique / machines thermiques: cycle avec changements d'état, calcul de rendement \Rightarrow peut être appliqué au fonctionnement d'une centrale nucléaire,
- RMN en PC – chimie uniquement, avec principe de la spectroscopie RMN du proton, notion de déplacement chimique du proton, couplage spin-spin,
- corps noir en MP uniquement, avec rayonnement d'équilibre thermique, loi de Planck, loi du déplacement de Wien, loi de Stefan, et étendue spectrale du rayonnement d'équilibre à une température donnée

Evolution des programmes de physique de sup' entre 1995 et 2003 sur le domaine étudié (au sens très large !)

MPSI: suppression en mécanique des chocs de particules et simulations de trajectoires (C et TP) ,

PCSI: suppression des collisions élastique mais en TP, ajout du mouvement d'une charge dans les champs E et B,

Evolution des programmes de physique de spé' entre 1996 et 2004 sur le domaine étudié (au sens très large !)

PC: suppression en mécanique des chocs

LICENCES

- Pas de programme national au sens de celui des prépas !
- **TOTAL PHYSIQUE: ~ 12560 étudiants** en France Métropolitaine + DOM-TOM en 2009-2010 – source ministère (Physique ~ 5290 étudiants, PRO Physique ~ 915 étudiants, Physique - chimie ~ 6355 étudiants)
- La licence se prépare en 3 ans après le baccalauréat, à l'université.
 - ⇒ la première année est assez généraliste (nouvelles technologies, langues, méthodologie, expression écrite et orale...).
 - ⇒ la deuxième année de licence constitue l'étape d'entrée dans la spécialisation disciplinaire.
 - ⇒ la troisième année de licence : c'est l'année de finalisation du projet d'études sur la base de l'affermissement des connaissances disciplinaires et des compétences acquises.

... pas de programme national mais des préconisations de l'ex 'Mission Scientifique, Technique et Pédagogique – MSTP' – rôle d'évaluation, d'expertise et de prospective au ministère (D. Bideau *et al*)
en collaboration avec la Société Française de Physique !

http://www2.enseignementsup-recherche.gouv.fr/mstp/physique_licence_sfp_mstp.pdf

L1 (165 heures) : Optique géométrique (60 heures ; S1 ou S2) , mécanique I (forces, champs, énergies, 60 heures ; S1 ou S2) , thermodynamique I (fondamentaux , 45 heures ; S2)

L2 (255 heures) : **physique quantique I (mécanique quantique, 60 heures ; S3 ou S4)**, thermodynamique II (applications , 45 heures ; S3 ou S4), mécanique II (statique et dynamique du solide et des fluides, 60 heures ; S3 ou S4) , électromagnétisme (90 heures ; S3 ou S4)

L3 (315 heures) : **relativité (30 heures ; S5 ou S6)**, **physique quantique II (mécanique ondulatoire, 60 heures ; S5 ou S6)**, thermodynamique III (thermodynamique statistique, 60 heures ; S5 ou S6), mécanique III (physique des milieux continus, 45 heures ; S5 ou S6), physique de la matière (30 heures ; S5 ou S6), **physique subatomique (30 heures ; S5 ou S6)** et optique ondulatoire et cristallographie (60 heures ; S5 ou S6)

⇒ Concrètement, qu'en est-il dans les ~ **40** universités scientifiques françaises ?

Panel (représentatif !?) de 13 universités scientifiques: Amiens, Angers, Brest, Cergy-Pontoise, Dijon, Lille1, Montpellier 2, Paris 6, Paris 7, Paris 11, Rennes 1, Strasbourg 1 et Toulouse 3

PHYSIQUE QUANTIQUE

Physique Quantique I : Mécanique Quantique (60 heures : S3 ou S4)

- L'émergence des concepts quantiques : le rayonnement du corps noir et la loi de Planck ; l'effet photoélectrique et les photons ; les spectres atomiques et le modèle de Bohr ; le laser.
- Le domaine quantique : les expériences de diffraction et d'interférences (lumière, électrons, neutrons, atomes froids,...) ; relation de De Broglie ; l'action caractéristique \hbar ; les inégalités de Heisenberg.
- Amplitudes de probabilités et formalisme de Dirac : l'exemple de la polarisation de la lumière ; formalisme de Dirac (limité aux systèmes 2D) ; règles de calcul sur les amplitudes de probabilités ; une application en astrophysique : l'expérience Hanbury-Brown et Twiss.
- Le spin 1/2 : l'expérience de Stern-Gerlach ; application du formalisme de Dirac au spin 1/2 ; cryptographie quantique.
- Evolution temporelle : équation d'évolution ; opérateur d'évolution ; états stationnaires ; inégalité de Heisenberg temporelle ; point de vue de Schrödinger et de Heisenberg.
- De la mécanique quantique à la mécanique ondulatoire : espaces de Hilbert fini et infini ; opérateurs linéaires ; décomposition spectrale ; produit tensoriel, vecteurs d'états et grandeurs physiques, ...
- *Etats intriqués : système de deux spins 1/2 ; inégalités de Bell ; interférences et états intriqués ; information quantique.*

Physique Quantique II : Mécanique Ondulatoire (60 heures : S5 ou S6)

- Mécanique ondulatoire : diagonalisation de X et P ; fonctions d'ondes ; équations de Schrödinger ; potentiels simples ; potentiel périodique ; généralisation à 3 dimensions.
- L'opérateur moment angulaire : diagonalisation de \mathbf{J}^2 et J_z ; moment orbital ; distributions angulaires des désintégrations ; composition des moments angulaires ; potentiels centraux.
- Symétries, relations de commutation, lois de conservation.
- L'oscillateur harmonique : l'oscillateur harmonique simple ; états cohérents ; introduction aux champs quantifiés ; mouvement dans un champ magnétique constant.
- *Particules identiques : bosons et fermions ; diffusion de particules identiques ; états collectifs.*

Observations à partir du panel:

⇒ modules obligatoires quasiment partout !

⇒ débute généralement en L3 (S5 ou S6) ; L2 assez léger (ex: P6 avec 'Quanta et Relativité', Dijon sous forme d'introduction)

⇒ pas vraiment de distinction entre mécanique quantique et ondulatoire

⇒ thèmes 'contemporains': pas trop traités (ex: cryptographie quantique, inégalités de Bell, états intriqués)

⇒ peu de calculs perturbatifs (stationnaires) !

RELATIVITE

Introduction historique

- Transformation de Galilée – hypothèse de l'éther – expérience de Michelson et Morley
- Principe de relativité d'Einstein

Conséquences : relativité du temps et de l'espace

- Postulats d'Einstein sur la vitesse de la lumière dans le vide
- Transformation spéciale de Lorentz
- Relativité du temps (simultanéité ; temps propre et impropre ; dilatation des durées)
- Relativité des longueurs (contraction ; longueur propre et impropre)
- Applications : durée de vie apparente des muons ; paradoxe des jumeaux ; paradoxe de la barre et de l'ouverture ; effet Doppler – Fizeau ; aberration des étoiles ; GPS

Espace-temps

- Structure métrique et espace de Minkowski ; quadrivecteurs
- Relativité et causalité : cône de lumière ; passé, futur, ailleurs

Dynamique relativiste

- Quadrivecteur énergie – quantité de mouvement : énergie d'une particule au repos ; relation énergie – quantité de mouvement ; application aux particules de masse nulle
- Equivalence masse-énergie
- Force

Illustration en physique des particules élémentaires

- Accélérateurs de particules : linéaire, cyclotron, synchrotron
- Collisions élastique et inélastique ; lois de conservation

Observation à partir du panel:

⇒ modules quasi obligatoires partout, souvent en L2 / S4

⇒ parfois des modules combinés (ex 'Ondes, Relativité et Particules' à Rennes 1, 'Relativité et magnétisme' à Brest, 'Approche Lagrangienne et Relativité' à Paris 7, 'Mécanique analytique et Relativité' à Cergy-Pontoise ou Dijon)

⇒ particulièrement développée dans certains endroits (Lille 1 / Toulouse 3 avec théorie des champs, liens relativité et EM, extension vers relativité générale)

⇒ introduction historique : pas très visible dans les syllabus

⇒ illustrations en physique des particules élémentaires: oui pour collisions, non pour accélérateurs

PHYSIQUE SUBATOMIQUE

Introduction historique

- Découvertes de la radioactivité, du neutron, du neutrino, des quarks.

Le monde élémentaire : des quarks aux noyaux et à l'univers

- Quarks et leptons
- Hadrons, mésons et baryons
- Les interactions fondamentales et les particules d'échange associées
- Les noyaux
- Des particules aux étoiles : nucléosynthèse et cosmologie

Processus nucléaires

- Phénoménologie du noyau
- Formule de masse et modèle de la goutte liquide.
- Radioactivités
- Réactions nucléaires : section efficace, cinématique des réactions, réactions dominantes à basse énergie
- Le cas particulier du soleil.

Applications

- Interactions rayonnement matière
- Conséquences sur la détection et la protection contre les rayonnements
- Analyse par activation
- Fission et réacteurs à fission
- Fusion et réacteurs à fusion
- Etudes comparatives dans les domaines de l'analyse et de la production d'énergie.

Observation à partir du panel:

⇒ communément enseignée en master, la physique subatomique l'est de façon plus aléatoire en licence !

⇒ la physique subatomique en licence apparaît dans certaines universités comme un module en soi, dans d'autres comme une application des modules de mécanique quantique et relativité

⇒ lieux où la recherche y est adossée (ex: IPM à Montpellier 2)

⇒ pas beaucoup d'introductions historiques, ni d'applications !

⇒ assez qualitatif au niveau L bien que l'on puisse faire du quantitatif sous forme magistrale et/ou applicatives (voir exemples) !

Un exemple qualitatif en TD:

⇒ combinaisons de quarks u et d pour former des baryons de charges $-e$, 0 , e et $2e$, absence de mésons de charge $2e$ ou de baryons de charge à partir des mêmes quarks.

Quelques exemples quantitatifs en TD:

ASTROPHYSIQUE

⇒ production (par les supernovae) et destruction (spectrométrie γ , raie à 1.8 MeV) de l'aluminium ^{26}Al dans la voie lactée: évaluation des luminosité de sources γ , flux de photons au niveau de la Terre, phénomène d'annihilation du positron produit par décroissance de ^{26}Al / raie à 511 keV.

PHYSIQUE NUCLÉAIRE

⇒ modèle de la goutte liquide, calcul du coefficient de répulsion coulombienne, stabilité vis à vis de la désintégration β

⇒ critères énergétiques sur les transitions isobariques, diagrammes et spectres énergétiques des particules β issues de désintégrations

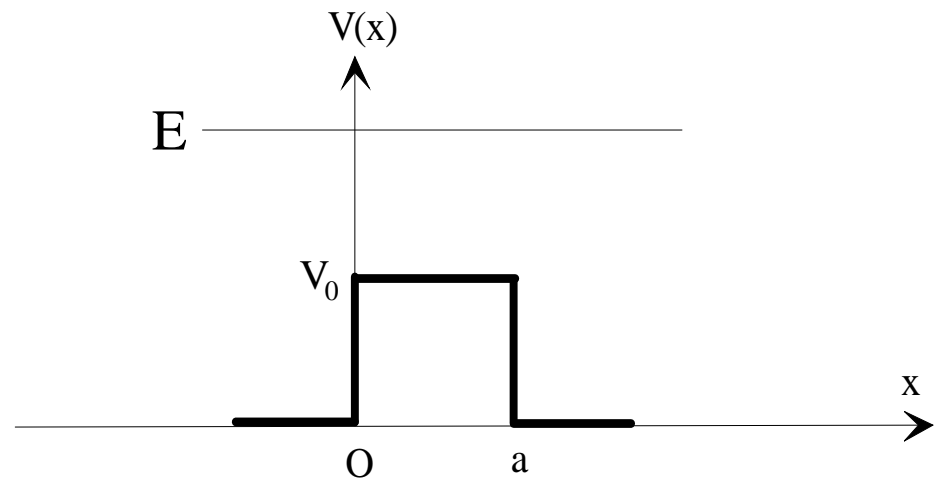
...suite et fin ... combiner la physique quantique et la physique nucléaire avec un modèle simple de désintégration α

Recherche des états stationnaires d'une particule incidente pour une barrière de potentiel (cas $E > V_0$)

Equation de Schrödinger \Rightarrow formes analytiques des fonctions d'onde $\Psi(x)$ dans toutes les régions de l'espace + équations de continuité \Rightarrow coefficients d'amplitudes \Rightarrow coefficient de transmission T en intensité fonction de a , largeur de la barrière (analogie avec l'EM).

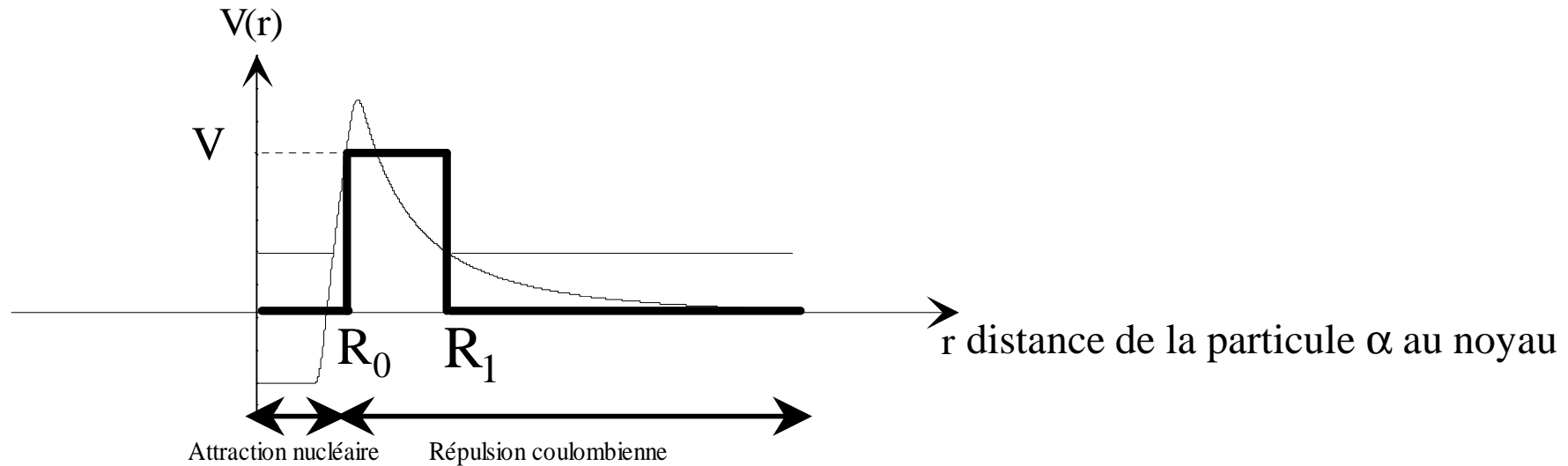
Cas $E < V_0$: extrapolation du coefficient de transmission puis approximation de la barrière épaisse:

$$T \approx 16(1 - E/V_0)E/V_0 \exp\left(-2\sqrt{2mV_0(1 - E/V_0)a/\hbar^2}\right)$$



Calculatoire ... mais possibilité méthode de la matrice de transfert !

Chaque discontinuité (ou dioptre en optique) entre deux milieux consécutifs homogènes peut être décrite par une matrice de réflexion-transmission $[R]$, et la propagation dans les milieux est elle-même associée à une matrice de translation $[T]$ (analogie avec optique et l'électrocinétique).



Le noyau émetteur crée un potentiel d'interaction où préexiste la particule α . Cette dernière, une fois émise (quand $r \rightarrow \infty$, $V_\infty = 0$), possède l'énergie cinétique E , égale à l'énergie totale E qu'elle avait dans le puits.

Hypothèse: la transmission représente la probabilité qu'à la particule α de s'échapper du noyau chaque fois qu'elle frappe la paroi du puits de potentiel aux points R_0 .

Probabilité élémentaire $P(t)dt$ pour que la particule α s'échappe du noyau à l'instant t , dans l'intervalle de temps $dt \approx NT \exp(-NTt)dt$ avec $N = \frac{1}{2R_0} \sqrt{\frac{2E}{m}}$ le nombre de rebonds sur la paroi $R_0 \Rightarrow$ durée de vie moyenne (ou demi-vie) du noyau émetteur.

AN ^{238}U : $E = 5 \text{ MeV}$, $V = 30 \text{ MeV}$, $m = m_{\text{He}}$, $R_0 = 10 \text{ fm}$, $R_1 = 30 \text{ fm} \Rightarrow T_{1/2} = 0,39 \cdot 10^9 \text{ ans} / 4,46 !$

Remerciements

Daniel Bideau - Rennes

Jean Cosléou - Lille

Clément Crastes – Reims

Bruno Jauffroy - Paris

Sophie Rémy - Limoges