

Formulaire de Physique III - IV

FRANÇOIS BOCHATAY
Avec la précieuse aide de
Christina Hauenstein et Yann Randin

EPFL
Section Informatique
deuxième année

1 juillet 2004

EMAIL : `francois.bochatay@epfl.ch`

Résumé

Ce document est un formulaire basé sur la matière abordée dans le cours de Physique III et IV donné par le Prof. Deveaud-Plédran aux étudiants d'informatique de deuxième année à l'EPFL. Son contenu est donc très fortement inspiré par le polycopié et les séries d'exercices de ce cours, et se veut être un formulaire aussi exhaustif et général que possible.

Bien évidemment, ce document ne saurait être considéré comme une référence absolue. Il peut très bien contenir des erreurs, et je ne saurais être tenu pour responsable d'un quelconque désagrément provoqué directement ou indirectement par l'usage de ce document.

Ce document est distribué sous licence FDL (<http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>). Vous pouvez donc le distribuer, le modifier, ou en extraire une partie pourvu que vous conserviez la licence FDL et les références à l'auteur d'origine.

Table des matières

1 Électricité	9
1.1 Loi de Coulomb	9
1.2 Champ électrique	9
1.2.1 Travail fourni par un champ électrique	9
1.3 Potentiel électrique	9
1.3.1 Relations avec le travail et le champ électrique	9
1.4 Théorème de Gauss	9
1.5 Dipôle électrique	9
1.5.1 Définitions	9
1.5.1.1 Moment dipolaire	9
1.5.1.2 Moment de force dipolaire	10
1.5.2 Champ électrique d'un dipôle	10
1.5.3 Champ électrique créé par un dipôle	10
1.5.4 Potentiel dû à un dipôle	10
1.6 Condensateurs	10
1.6.1 Capacité	10
1.6.2 Champ électrique et potentiel	10
1.6.3 Énergie stockée dans un condensateur	10
1.6.4 Condensateur plan	10
1.6.5 Condensateur sphérique	10
1.6.6 Condensateur cylindrique	11
1.7 Diélectriques	11
1.7.1 Polarisation	11
1.7.1.1 Influence du diélectrique sur un condensateur	11
1.7.2 Théorème de Gauss pour les diélectriques	11
1.8 Courant électrique	11
1.8.1 Loi d'Ohm	11
1.8.2 Résistivité et conductivité	11
1.8.3 Densité de courant	11
1.8.3.1 Vitesse de dérive	11
1.8.4 Puissance électrique	12
1.9 Circuits	12
1.9.1 Lois de Kirshoff	12
1.9.1.1 Loi des noeuds	12
1.9.1.2 Loi des mailles	12
1.9.2 Circuits à courant continu	12
1.9.2.1 Résistances	12
Loi	12
En série	12
En parallèle	12
1.9.2.2 Condensateurs	12
Lois	12
En série	12
En parallèle	12
1.9.2.3 Inductances	12
Loi	12
Établissement du courant	13
Chute du courant	13
1.9.3 Circuit à courant alternatifs	13

1.9.3.1	Source	13
1.9.3.2	Comportement d'une résistance	13
	Courant et déphasage	13
	Impédance	13
1.9.3.3	Comportement d'un condensateur	13
	Courant et déphasage	13
	Impédance	13
1.9.3.4	Comportement d'une inductance	13
	Courant et déphasage	13
	Impédance	13
1.9.3.5	Représentation de Fresnel	13
	Courant ou tension total	14
	Déphasage total	14
	Impédance	14
	Résonance	14
2	Magnétisme	15
2.1	Champ et Forces magnétiques	15
2.1.1	Champ magnétique	15
2.1.2	Force magnétique	15
2.1.3	Force de Lorentz	15
2.1.4	Boucle de courant	15
	Moment dipolaire magnétique	15
	Moment de force	15
2.2	Théorème d'Ampère	15
2.3	Loi de Biot et Savart	16
2.4	Champs magnétiques classiques	16
2.4.1	Fil rectiligne	16
2.4.2	Solénoïde	16
2.5	Perméabilité magnétique	16
2.6	Généralisation du théorème d'Ampère	16
2.6.1	Vecteur aimantation	16
2.6.2	Vecteur excitation magnétique	16
2.6.3	Formule généralisée du théorème d'Ampère	16
2.7	Induction électromagnétique	17
2.7.1	Flux magnétique	17
2.7.2	Loi de Faraday	17
2.7.3	Champ électrique induit	17
2.7.4	Transformateurs	17
2.7.5	Induction mutuelle	17
2.7.5.1	Force électromotrice induite	17
2.7.6	Auto-induction	17
2.7.6.1	Force électromotrice induite	17
2.7.7	Énergie emmagasinée dans un champ magnétique	17
2.8	Équations de Maxwell	18
3	Fluides	19
3.1	Masse volumique et densité	19
3.2	Pression	19
3.2.1	Définition	19
3.2.2	Pression à l'intérieur d'un fluide	19
	Solution générale	19
3.2.3	Pression atmosphérique et manométrique	19
	Atmosphère	19
	Manomètre	19
3.2.4	Principe de Pascal	19
3.2.5	Principe d'Archimède	19
3.2.6	Tension superficielle	20

3.2.6.1	Définition	20
3.2.6.2	Travail	20
3.2.7	Capillarité	20
3.2.8	Fluide incompressible	20
3.2.9	Équation de Bernoulli	20
4	Ondes	21
4.1	Définitions	21
4.2	Équation d'onde	21
4.3	Son	21
4.3.1	Caractéristiques	21
Vitesse		21
Perception du son		21
Fréquence fondamentale et harmoniques		21
4.3.2	Représentation mathématique	21
Onde de déplacement		21
Onde de pression		22
4.3.2.1	Vitesse	22
Dans un gaz		22
Dans un solide		22
4.3.3	Intensité du son	22
4.3.4	Sources sonores	22
Instruments à corde		22
Instruments à vent		22
4.3.5	Battements	22
4.3.6	Effet Doppler	22
4.4	Nature ondulatoire de la lumière	23
4.4.1	Définitions	23
4.4.2	Interférence	23
4.4.2.1	Double fente de Young	23
Intensité de la figure de d'interférence		23
4.4.3	Interférence dans les couches minces	23
4.4.3.1	Pellicule entouré d'un même milieu	23
4.4.3.2	Pellicule entouré de milieu différents	23
4.4.4	Anneaux de Newton	23
4.5	La diffraction	24
4.5.1	Diffraction par une fente unique	24
Intensité de la figure de diffraction		24
4.5.2	Diffraction par une double fente	24
Intensité de la figure de diffraction		24
4.5.3	Séparation : critère de Rayleigh	24
4.5.3.1	Résolution	24
4.5.4	Fentes multiples : réseau de diffraction	24
4.5.4.1	Diagrammes de phaseurs pour les fentes multiples	24
4.5.4.2	Pouvoir de résolution d'un réseau de diffraction	25
4.6	Polarisation	25
4.6.1	Polariseur	25
4.6.2	Biréfringence	25
4.6.3	Polarisation par réflexion	25
4.6.3.1	Type de polarisation	25
Polarisation TE		25
Polarisation TM		25
4.6.3.2	Équations de Fresnel	25
4.6.3.3	Angle de Brewster	25
5	Optique	26
5.1	Définitions	26
5.1.1	Focale	26

5.1.2	Loi de Snell Descartes	26
5.1.3	Réflexion interne totale	26
	Fibre optique	26
5.2	Miroirs	26
5.2.1	Grandissement de l'image	26
5.2.2	Convention de signes	26
5.3	Dioptries	27
5.3.1	Conventions	27
5.3.2	Équation de base	27
5.3.3	Grandissement de l'image	27
5.3.4	Convention de signes	27
5.4	Lentilles	27
5.4.1	Conventions	27
5.4.2	Convergence et équation de base	27
5.4.3	Distance focale	27
5.4.4	Grandissement de l'image	27
5.4.5	Convention de signes	28
5.4.6	Association de lentilles minces	28
5.4.7	Loupe	28
5.4.8	Télescopes et microscopes	28
5.4.9	Télescopes	28
5.4.10	Microscope	28
6	Relativité restreinte	29
6.1	Postulats d'Einstein	29
6.2	Temps et longueur propre	29
6.3	Dilatation du temps	29
6.4	Contraction des longueurs	29
6.5	Transformation de Lorentz	29
6.6	Conservation de l'intervalle	30
6.7	Masse et quantité de mouvement relativiste	30
6.8	La masse et l'énergie	30
7	Mécanique quantique	31
7.1	Théorie des quanta	31
7.1.1	Le photon	31
7.1.2	Effet Compton	31
7.1.3	Modèle de Bohr	31
7.1.3.1	Niveaux d'énergie	31
	Énergie totale d'un électron	31
	Orbites possibles	31
	Rayon de Bohr	31
7.1.3.2	Émission de photon	32
7.1.4	Hypothèse de de Broglie	32
7.2	Mécanique quantique	32
7.2.1	Principe d'incertitude de Heisenberg	32
7.2.1.1	Précision de la position et de la quantité de mouvement	32
7.2.1.2	Précision de l'énergie	32
7.2.2	Équation de Schrödinger	32
7.2.2.1	Indépendante du temps	32
7.2.2.2	Dépendante du temps	32
7.2.3	Particules libres	32
	Fonction d'onde	32
	Énergie totale de la particule	32
7.2.4	Particules dans un puits de potentiel	32
7.2.4.1	Potentiel infini	33

Équation de Schrödinger	33
Niveaux d'énergie possibles	33
Solution	33
Probabilité de trouver la particule entre x_1 et x_2	33
7.2.4.2 Potentiel fini	33
Équation de Schrödinger	33
Solutions	33
7.2.5 Effet tunnel à travers une barrière de potentiel	33
7.3 Mécanique quantique des atomes	33
7.3.1 État quantique	33
7.3.1.1 Principe d'exclusion de Pauli	34
7.3.2 Moments	34
7.3.2.1 Moment angulaire	34
7.3.2.2 Moment angulaire de spin	34
7.3.2.3 Moment magnétique	34
7.3.2.4 Moment angulaire total	34
7.3.3 Atome d'hydrogène	34
Équation de Schrödinger	34
Énergie possibles de l'atome d'hydrogène	34
7.3.3.1 Fonctions d'onde de l'atome d'hydrogène	34
État 1s	34
État 2s	35
État 2p	35
7.4 Les molécules et les solides	35
7.4.1 Énergie moléculaire	35
7.4.1.1 Énergie de rotation moléculaire	35
7.4.1.2 Énergie de vibration moléculaire	35
7.4.1.3 Énergie totale	35
7.4.2 Liaison dans les solides	35
7.4.2.1 Énergie électrostatique	35
7.4.2.2 Énergie potentielle	35
7.4.3 Théorie des électrons libres dans les métaux	36
7.4.3.1 Densité d'état	36
7.4.3.2 Énergie de Fermi	36
7.4.3.3 Énergie moyenne par électron	36
7.4.3.4 Fonction de probabilité de Fermi-Dirac	36
8 Radioactivité et énergie nucléaire	37
8.1 Énergie totale de liaison	37
8.2 Désintégration	37
8.2.1 Temps de la désintégration et demi-vie	37
Annexe A. Outils mathématiques	38
A.1 Trigonométrie	38
A.1.1 Identités	38
A.1.2 Périodicité	38
A.1.3 Valeurs courantes	38
A.2 Logarithmes	39
A.3 Vecteurs	39
A.4 Dérivées	39
A.5 Intégrales	40
Annexe B. Constantes et unités	41
B.1 Constantes	41
B.2 Unités	41
Index	42

Chapitre 1

Électricité

1.1 Loi de Coulomb

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|Q_1 Q_2|}{r^2} \qquad \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cong 9,0 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 \text{C}^{-2} \qquad [N]$$

1.2 Champ électrique

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad [\text{Vm}^{-1}]$$

1.2.1 Travail fourni par un champ électrique

$$W_{E_{ab}} = -qV_{ba} \qquad W = q \int_a^b \vec{E} \, d\vec{r} \qquad [J]$$

1.3 Potentiel électrique

$$V_a = \frac{U_a}{q} \qquad [V] = [JC^{-1}]$$

1.3.1 Relations avec le travail et le champ électrique

$$V_{ba} = V_b - V_a = -\frac{W_{E_{ab}}}{q} \qquad V_{ba} = -\int_a^b \vec{E} \, d\vec{r}$$

1.4 Théorème de Gauss

$$\oint \vec{E} \, d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

1.5 Dipôle électrique

1.5.1 Définitions

Un dipôle est composé de deux charges égales et opposées éloignées entre elles par d'une distance l .

1.5.1.1 Moment dipolaire

$$\vec{p} = Q\vec{l}$$

1.5.1.2 Moment de force dipolaire

$$\vec{\tau} = \vec{p} \times \vec{E} \qquad \tau = pE \sin \theta$$

où θ est l'angle entre les lignes de champ de \vec{E} est l'axe du dipôle

1.5.2 Champ électrique d'un dipôle

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 l^2}$$

1.5.3 Champ électrique créé par un dipôle

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p}{\left(r^2 + \frac{l^2}{4}\right)^{\frac{3}{2}}} \qquad \text{Sir} \gg l \Rightarrow \qquad E \cong \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{p}{r^3}$$

1.5.4 Potentiel dû à un dipôle

$$V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2}$$

où θ est l'angle entre l'axe du dipôle et l'axe reliant le centre du dipôle au point P

1.6 Condensateurs

1.6.1 Capacité

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \qquad [F]$$

1.6.2 Champ électrique et potentiel

Le champ électrique est constant entre les deux plaques du condensateur, et nul à l'extérieur. Le potentiel est donc donné par $V = Ed$.

1.6.3 Énergie stockée dans un condensateur

$$U = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} QV \qquad [J]$$

1.6.4 Condensateur plan

Soit A l'aire des plaques du condensateur et d leur éloignement

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \qquad E = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$$

1.6.5 Condensateur sphérique

Soit r la distance entre le centre de la sphère et le point P , et $R_1 < R_2$ les rayons des sphères.

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} \qquad E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

1.6.6 Condensateur cylindrique

Soit r la distance entre l'axe du cylindre et le point P , h la longueur du cylindre, et $R_1 < R_2$ les rayons des cylindres.

$$C = 2\pi\epsilon_0 \frac{h}{\ln \frac{R_2}{R_1}} \qquad E = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0 r h}$$

1.7 Diélectriques

Soit κ la constante diélectrique de l'isolant, ϵ la permittivité du milieu et χ est appelé susceptibilité du diélectrique

$$C = \kappa\epsilon_0 \frac{A}{d} \qquad \kappa\epsilon_0 = \epsilon \qquad \chi = \kappa - 1$$

1.7.1 Polarisation

Soit N le nombre moyen de dipôles, q leur charge élémentaire et δ la séparation moyenne des charges du dipôle.

$$P = Nq\delta = \sigma_{\text{pol}} \qquad \vec{P} = \chi\epsilon_0 \vec{E}$$

1.7.1.1 Influence du diélectrique sur un condensateur

$$E = \frac{\sigma_{\text{libre}} - \sigma_{\text{pol}}}{\epsilon_0} = E_{\text{libre}} \cdot \frac{1}{\kappa} \qquad C = \kappa C_{\text{libre}}$$

1.7.2 Théorème de Gauss pour les diélectriques

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\epsilon}$$

1.8 Courant électrique

$$I = \frac{dQ}{dt} \qquad [A] = [Cs^{-1}]$$

1.8.1 Loi d'Ohm

$$U = RI$$

1.8.2 Résistivité et conductivité

La résistivité ρ est le rapport entre la résistance et la taille du fil, elle est donnée en Ωm . La conductivité σ , et l'inverse de la résistivité.

$$R = \rho \frac{L}{A} \qquad \sigma = \frac{1}{\rho}$$

1.8.3 Densité de courant

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{A} \qquad \text{pour } j \text{ uniforme : } I = jA$$

1.8.3.1 Vitesse de dérive

$$v_d = \frac{j}{en} \qquad \text{où } e \text{ est la charge de l'électron et } n \text{ le nombre d'atomes}$$

1.8.4 Puissance électrique

$$P = RI^2$$

1.9 Circuits

1.9.1 Lois de Kirshoff

1.9.1.1 Loi des noeuds

$$\sum I = 0$$

La somme de tous les courants qui pénètrent dans un noeud du circuit doit égaler la somme de tous les courants qui en sortent.

1.9.1.2 Loi des mailles

$$\sum V = 0$$

Dans un circuit, la somme algébrique des variations de potentiel le long d'un parcours fermé quelconque doit être nulle.

Pour les sources, V aura le signe de la première borne rencontrée lors du parcours. Pour les résistances comme pour les capacités, V sera négatif si l'on parcourt la boucle dans le sens opposé au sens du courant.

1.9.2 Circuits à courant continu

1.9.2.1 Résistances

Loi

$$V = RI$$

En série

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

En parallèle

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = V \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

1.9.2.2 Condensateurs

Lois

$$V = \frac{Q}{C}$$

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

En série

$$V = \frac{Q}{C} = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

En parallèle

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = (C_1 + C_2 + C_3)V$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

1.9.2.3 Inductances

Loi

$$V = -L \frac{dI}{dt}$$

Une inductance s'oppose à la variation du courant. Elle va donc ralentir son établissement comme sa chute.

Établissement du courant

Soit V la tension aux bornes de l'inductance et R sa résistance interne. Le courant va s'établir suivant l'équation

$$I = \frac{V}{R} \left(1 - \exp^{-t \frac{R}{L}} \right)$$

Chute du courant

Soit I_0 le courant présent avant la chute, et R la résistance interne de l'inductance. Lorsque plus aucun courant ne circule, l'inductance empêche ce dernier tomber brutalement à 0 suivant l'équation

$$I = I_0 \exp^{-t \frac{R}{L}}$$

1.9.3 Circuit à courant alternatifs

Les lois des différents composants pour le courant continu sont également valables ici.

1.9.3.1 Source

La tension ainsi que le courant évoluent dans le temps

$$V = V_0 \sin(\omega t) \qquad I = I_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

De plus, on a la notion d'efficacité (rms)

$$V_{\text{eff}} = \frac{V_0}{\sqrt{2}} \qquad I_{\text{eff}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

1.9.3.2 Comportement d'une résistance

Courant et déphasage

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_0}{R} \sin(\omega t) \qquad \varphi = 0$$

Impédance

$$X_R = R$$

1.9.3.3 Comportement d'un condensateur

Courant et déphasage

$$I = \frac{dQ}{dt} = \omega C \varepsilon_0 \cos(\omega t) \qquad \varphi = + \frac{\pi}{2}$$

Impédance

$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

1.9.3.4 Comportement d'une inductance

Courant et déphasage

$$I = - \frac{V_0}{\omega L} \cos(\omega t) \qquad \varphi = - \frac{\pi}{2}$$

Impédance

$$X_L = \omega L$$

1.9.3.5 Représentation de Fresnel

Lorsque ces différents composants sont combinés, il faut faire appel à la représentation vectorielle de Fresnel pour résoudre le circuit.

On utilise un repère x, y pour représenter les courants ou les tensions par des vecteurs. Les longueurs des vecteurs sont données par les valeurs maximales des courants ou des tensions. On prend comme référence (axe x) V_0 si l'on travaille sur les courants et I_0 si l'on travaille sur les tensions.

Courant ou tension total

En réalisant la somme vectorielle de ces vecteurs, on trouve la valeur totale du courant ou de la tension pour le circuit.

Déphasage total

L'angle formé entre notre référence et la somme vectorielle de nos vecteurs donne le déphasage total du circuit.

Impédance

Pour trouver l'impédance totale du circuit, il faut partir des relations suivantes.

$$V_0 = I_0 Z \qquad V = XI$$

Le principe est d'exprimer V_0 ou I_0 par notre somme vectorielle avec le théorème de Pythagore, d'exprimer chaque tension ou courant en fonction de l'impédance du composant, puis d'extraire respectivement I_0 ou V_0 . On trouve ainsi la valeur de Z qui est l'impédance totale de notre circuit.

Résonance

La **fréquence de résonance** est la fréquence d'alimentation du circuit pour laquelle le courant efficace est maximal. Inversement, la **fréquence d'anti-résonance** est la fréquence d'alimentation du circuit pour laquelle le courant efficace est minimal. Pour la trouver, on étudie la relation suivante en fonction de ω .

$$I_{\text{eff}} = \frac{V_{\text{eff}}}{Z}$$

Par exemple, pour un circuit RCL, on a

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{L\omega}\right)^2}} \qquad I_{\text{eff}} = V_{\text{eff}} \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega C - \frac{1}{L\omega}\right)^2}$$

D'où on ne peut tirer que la fréquence d'anti-résonance

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \qquad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Chapitre 2

Magnétisme

2.1 Champ et Forces magnétiques

2.1.1 Champ magnétique

$$\vec{B} \quad [T]$$

2.1.2 Force magnétique

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad \vec{F} = I \vec{l} \times \vec{B}$$

2.1.3 Force de Lorentz

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$

2.1.4 Boucle de courant

Moment dipolaire magnétique

$$\vec{\mu} = NI \vec{A}$$

Moment de force

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

2.2 Théorème d'Ampère

Le champ magnétique créé par un circuit parcouru par un courant I est donné par

$$\oint \vec{B} \, d\vec{l} = \mu_0 I_{\text{enf}}$$

où I_{enf} le courant enfermé dans la surface et $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm A}^{-1}$ est la **perméabilité du vide**. C'est l'équivalent pour le magnétisme du théorème de Gauss.

2.3 Loi de Biot et Savart

Le champ magnétique créé par un circuit quelconque parcouru par un courant I est donné par

$$\vec{B} = \int \frac{\mu_0 I d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi r^2}$$

où \vec{r} est le vecteur unitaire entre l'élément de circuit et le point P.

2.4 Champs magnétiques classiques

2.4.1 Fil rectiligne

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

où r est la distance du point au fil.

2.4.2 Solénoïde

Si les spires sont suffisamment serrées, le champ est uniforme à l'intérieur, négligeable à l'extérieur, et vaut

$$B = \mu_0 n I$$

où n est le nombre de spires par mètre.

2.5 Perméabilité magnétique

La perméabilité magnétique μ et la perméabilité relative κ_m sont données par

$$\mu = \kappa_m \mu_0 \qquad \kappa_m = \frac{B}{B_0}$$

Ainsi, le champ magnétique créé par un matériau magnétique à l'intérieur d'un solénoïde est donné par

$$B = \kappa_m \mu_0 n I = \mu n I$$

où \vec{B}_0 est le champ produit par le passage du courant dans le solénoïde.

2.6 Généralisation du théorème d'Ampère

2.6.1 Vecteur aimantation

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}}{V}$$

où $\vec{\mu}$ est le moment magnétique induit et V le volume.

2.6.2 Vecteur excitation magnétique

$$\vec{H} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{M}}{\mu_0}$$

2.6.3 Formule généralisée du théorème d'Ampère

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = I$$

2.7 Induction électromagnétique

2.7.1 Flux magnétique

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad [W] = [T][m^{-2}]$$

2.7.2 Loi de Faraday

La force électromotrice induite par la variation du flux du champ magnétique est donnée par

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

où N est le nombre de spires de la bobine de détection.

2.7.3 Champ électrique induit

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

2.7.4 Transformateurs

Soit V_p la tension appliquée (primaire) et V_s la tension produite (secondaire) et N_s, N_p le nombre de spires respectives des bobines. On a alors

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad V_p I_p = V_s I_s$$

2.7.5 Induction mutuelle

L'induction mutuelle régit l'influence mutuelle d'une bobine sur une autre.

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} \quad [H] = [Vs A^{-1}]$$

2.7.5.1 Force électromotrice induite

$$\varepsilon_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \quad \varepsilon_2 = -M \frac{dI_1}{dt}$$

2.7.6 Auto-induction

L'auto-induction est la réaction d'une bobine à l'influence d'une autre bobine.

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad [H] = [Vs A^{-1}]$$

2.7.6.1 Force électromotrice induite

$$\varepsilon = -N \frac{dI_2}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

2.7.7 Énergie emmagasinée dans un champ magnétique

Travail nécessaire pour faire passer le courant de 0 à I vaut

$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

ce qui correspond à l'énergie emmagasinée par une bobine dans lequel circule un courant I .

La densité d'énergie est donnée par

$$u = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

2.8 Équations de Maxwell

$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$	$\Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$
$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$	$\Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$	$\Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	$\Leftrightarrow \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

Chapitre 3

Fluides

3.1 Masse volumique et densité

La densité est exactement égale à la masse volumique.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

3.2 Pression

3.2.1 Définition

$$P = \frac{F}{A} \quad \left[\frac{N}{\text{m}^2} = \text{Pa} \right]$$

3.2.2 Pression à l'intérieur d'un fluide

En fonction de la hauteur y

$$\frac{dP}{dy} = -\rho g$$

Solution générale

$$\int_{P_1}^{P_2} dP = - \int_{y_1}^{y_2} \rho g dy$$

3.2.3 Pression atmosphérique et manométrique

Atmosphère

$$1 \text{ atm} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Nm}^{-2} = 1.013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

Manomètre

Pour connaître la pression absolue P , il faut additionner la pression atmosphérique P_a à celle fournie par le manomètre P_m

$$P = P_m + P_a$$

3.2.4 Principe de Pascal

La pression appliquée à un fluide en vase clos augmente celle de tout le fluide de la même quantité.

$$P_1 = P_2 \Rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

3.2.5 Principe d'Archimède

La force de poussée vers le haut exercée sur un corps immergé dans un fluide est égale au poids du fluide déplacé

$$F_p = \rho_{\text{fluide}} g V = m_{\text{fluide}} g$$

La **fraction immergée** d'un objet est donnée par le rapport $\frac{\rho_{\text{obj}}}{\rho_{\text{fluide}}}$.

3.2.6 Tension superficielle

3.2.6.1 Définition

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad L \text{ est la longueur}$$

3.2.6.2 Travail

$$\gamma = \frac{W}{\Delta A}$$

3.2.7 Capillarité

La différence de niveau est donnée par

$$h = \frac{2\gamma \cos \varphi}{\rho g r} \quad \text{où } \varphi \text{ est l'angle de raccordement}$$

3.2.8 Fluide incompressible

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

3.2.9 Équation de Bernoulli

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho g y = \text{constante}$$

Chapitre 4

Ondes

4.1 Définitions

Soient v la **vitesse de l'onde**, T sa **période**, λ la **longueur d'onde** et f sa **fréquence**:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f \qquad f = \frac{1}{T}$$

Soient ω la **fréquence angulaire**, k le **nombre d'onde** et v la vitesse de l'onde:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \qquad v = \frac{\omega}{k}$$

4.2 Équation d'onde

$$\frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2}$$

4.3 Son

4.3.1 Caractéristiques

Vitesse

La vitesse du son dépend du matériau dans lequel il se propage selon la loi

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

où B est le module de compressibilité volumique. Voici les vitesses les plus utiles

Matériau	Vitesse (m/s)
Air	343
Eau	1440
Verre	4500

Perception du son

L'être humain perçoit les sons dans la bande de fréquence 20 - 20'000 Hz.

Fréquence fondamentale et harmoniques

La fréquence fondamentale est la première fréquence à laquelle le dispositif entre en résonance. Les multiples entiers de la fréquence fondamentale sont appelés harmoniques.

4.3.2 Représentation mathématique

Le son peut être représenté aussi bien comme un onde de déplacement que comme une onde de pression.

Onde de déplacement

$$D = D_M \sin(kx - \omega t) \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \text{ et } \omega = 2\pi f$$

Onde de pression

$$p = -p_M \cos(kx - \omega t)$$

On notera le déphasage de $\frac{\pi}{2}$ de l'onde de pression par rapport à l'onde de déplacement.

4.3.2.1 Vitesse

Dans un gaz

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

Dans un solide

$$v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \qquad Y = -\frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta l}{l}} \text{ (module de Young)}$$

4.3.3 Intensité du son

L'intensité du son est définie comme l'énergie transportée par unité de temps par unité de section et est mesurée en décibel. L'intensité β d'un son est donnée par

$$\beta(\text{dB}) = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \qquad I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$$

4.3.4 Sources sonores

Le son émis par un instrument de musique est déterminé par la fréquence fondamentale. La fréquence fondamentale est fonction de la longueur du dispositif, que ce soit une corde ou un tube.

Instruments à corde

$$L = \frac{\lambda}{2} \qquad f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}$$

Instruments à vent

Si le tube est ouvert d'un côté, les harmoniques sont données par:

$$L = (2n+1)\frac{\lambda}{4} \qquad f = (2n+1)\frac{v}{4L}$$

Si le tube est ouvert des deux côtés, les harmoniques sont données par:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \qquad f = n\frac{v}{2L}$$

4.3.5 Battements

Le phénomène de battement est l'interférence de deux ondes sonores de même amplitude et de fréquences légèrement différentes.

Soit deux ondes sonores

$$D_1 = D_M \sin(2\pi f_1 t) \qquad D_2 = D_M \sin(2\pi f_2 t)$$

Le déplacement résultant est

$$D = \left[2D_M \cos\left(2\pi \frac{f_1 - f_2}{2} t\right) \right] \sin\left(2\pi \frac{f_1 + f_2}{2} t\right)$$

4.3.6 Effet Doppler

Dans le cas général, la fréquence perçue est donnée par

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right)$$

où v est la vitesse de l'onde sonore, v_o la vitesse de l'observateur (+ s'il se rapproche et - s'il s'éloigne) et v_s est la vitesse de la source (- si elle se rapproche et + si elle s'éloigne).

ATTENTION: les notions de vitesse et de rapprochement ou d'éloignement sont relatives à un référentiel donné.

4.4 Nature ondulatoire de la lumière

4.4.1 Définitions

Longueur d'onde $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$
 $f = \text{const} :$

$$e = \frac{\lambda}{f}$$

$$\lambda_n = \frac{c}{n \cdot f}$$

Spectre visible: $400 \text{ nm} \leq \lambda \leq 800 \text{ nm}$

4.4.2 Interférence

4.4.2.1 Double fente de Young

d est la distance entre les 2 centres des fentes.

Position des franges brillantes : $d \sin \theta = m \lambda, m = 0, 1, 2, \dots$

Position des franges sombres : $d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, m = 0, 1, 2, \dots$

Distance entre 2 minima : $D \sin \theta = m \lambda$ où D est la largeur de la fente.

Intensité de la figure de d'interférence

$$I_\theta = I_0 \cdot \left[\cos \left(\frac{\pi d y}{\lambda l} \right) \right]^2 \quad [y \ll l, d \ll l]$$

où I_0 est l'intensité au centre de l'écran.

4.4.3 Interférence dans les couches minces

Distance parcourue dans la couche : l

Indice de réfraction de la couche mince : n

4.4.3.1 Pellicule entouré d'un même milieu

Interférence constructive : $nl = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$

Interférence destructive : $nl = m \lambda$

4.4.3.2 Pellicule entouré de milieu différents

Interférence constructive : $nl = m \lambda$

Interférence destructive : $nl = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$

$g \equiv kn \cdot 2d = \frac{2\pi \cdot 2d}{\lambda} = k_0 \cdot 2d$ où $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ est le nombre d'onde

4.4.4 Anneaux de Newton

Interférence constructive : $2nl = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda$

Interférence destructive : $2nl = m \lambda$

4.5 La diffraction

4.5.1 Diffraction par une fente unique

Minima : $D \sin \theta = m\lambda$, $m = 1, 2, \dots$

Maxima : $D \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$, $m = 0, 1, 2, \dots$

D est la largeur de la fente, θ angle entre le rayon et la \perp à l'écran

Intensité de la figure de diffraction

$$I_{\theta} = I_0 \left(\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} \right)^2 \qquad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} D \sin \theta$$

où I_0 est l'intensité quand $\theta = 0$ et β est la différence de phase entre les ondes des limites supérieures et inférieures de la fente.

Minimal quand $I_{\theta} = 0$.

4.5.2 Diffraction par une double fente

d est la distance entre les fentes

Amplitude de l'onde E_{θ} et l'amplitude résultante à un angle θ $E_{\theta 0}$:

$$E_{\theta} = E_0 \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} \qquad E_{\theta 0} = 2E_0 \cdot \frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} \cdot \cos \frac{\varphi}{2}$$

où

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot D \sin \theta \qquad \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot d \sin \theta$$

Intensité de la figure de diffraction

$$I_{\theta} = I_0 \cdot \left(\frac{\sin \frac{\beta}{2}}{\frac{\beta}{2}} \right)^2 \cdot \left(\cos \frac{\varphi}{2} \right)^2$$

4.5.3 Séparation : critère de Rayleigh

Deux objets sont à la limite de séparation s'ils sont à une distance angulaire donnée par:

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{D}$$

4.5.3.1 Résolution

En posant D le diamètre de l'instrument récepteur (oeil, télescope) et soit d la distance entre l'objet et l'instrument récepteur, la résolution maximale h de l'instrument est donnée par le critère de Rayleigh à l'aide de la relation $h = d \cdot \tan \theta$. h est alors la distance minimale nécessaire entre deux points pour pouvoir les distinguer.

4.5.4 Fentes multiples : réseau de diffraction

Différence de chemin optique entre deux fentes: $\Delta l = d \sin \theta$

Maxima principaux : $\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$

d est la distance entre les fentes

4.5.4.1 Diagrammes de phaseurs pour les fentes multiples

$$\frac{\delta}{2\pi} = \frac{d \sin(\theta)}{\lambda} \qquad \delta = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta$$

$\Delta\theta_0$ est la position angulaire du premier minimum (à côté du pic $\theta = 0$)

$$\frac{\delta}{2\pi} = \frac{\Delta l}{\lambda} = \frac{d \sin(\Delta\theta_0)}{\lambda} \Rightarrow \sin \Delta\theta_0 = \frac{\lambda}{Nd}$$

Pour les angles petits : $\Delta\theta_0 = \frac{\lambda}{Nd}$, $\Delta\theta_m = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta_m}$

$\Delta\theta_m$ est la demi-largeur du pic d'ordre m où θ_m est la position angulaire du $m^{\text{ième}}$ sommet.

4.5.4.2 Pouvoir de résolution d'un réseau de diffraction

Dispersion angulaire : $\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta}$

$\Delta Q = \frac{\lambda}{N \alpha \cos \theta}$ où N est le nombre de traits

Séparation résoluble minimale entre 2 longueurs d'onde : $\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda}{nm}$

Pouvoir de résolution d'un réseau :

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = Nm \qquad \Delta\lambda = \frac{\lambda}{R}$$

4.6 Polarisation

4.6.1 Polariseur

Un polariseur ne laisse passer que la portion d'onde lumineuse polarisée dans le même sens que son axe. Il permet donc de polariser la lumière non-polarisée dans un sens précis (donné par son axe), ou de déterminer la direction de polarisation si la lumière est polarisée.

L'intensité lumineuse transmise est donnée par l'équation de Malus:

$$I = \begin{cases} I_0 \cos^2 \theta & \text{si la lumière incidente est polarisée} \\ I_0/2 & \text{sinon} \end{cases}$$

4.6.2 Biréfringence

La biréfringence est la propriété qu'ont certains cristaux à propager la lumière avec deux indices de réfractions différents selon la polarisation de la lumière incidente. Si l'on place un tel cristal de manière à ce que les deux composantes de la lumière incidente soient en direction de ses axes optiques, elles se propageront à des vitesses différentes déterminées par les indices de réfraction.

Pour une épaisseur d du cristal, on aura ainsi un retard R , appelé **retard d'onde**, donné par

$$R = (n_2 - n_1)k_0 d = 2\pi(n_2 - n_1) \frac{d}{\lambda_0}$$

Si $R = n\frac{\pi}{2}$, la lumière sortant du cristal sera **polarisée circulairement**; si $R = n\pi$, la lumière sortant du cristal sera **polarisée orthogonalement** $\forall n \in \mathbb{N}$.

4.6.3 Polarisation par réflexion

4.6.3.1 Type de polarisation

Polarisation TE

L'onde est polarisée perpendiculairement au plan d'incidence

Polarisation TM

L'onde est polarisée dans le plan d'incidence

4.6.3.2 Équations de Fresnel

R = coefficient de réflexion

$$T = 1 - R$$

En polarisation TE :

$$R = \left| \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right|^2$$

En polarisation TM :

$$R = \left| \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right|^2$$

4.6.3.3 Angle de Brewster

$$\tan \theta_B = \frac{n_2}{n_1}$$

Chapitre 5

Optique

5.1 Définitions

Indice de réfraction : $n = \frac{c}{v}$; pour l'air, $n = 1$
 Distance de l'objet au dispositif : d_o
 Distance du dispositif à l'image : d_i
 Rayon de courbure du dispositif : R

5.1.1 Focale

$$\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o} = \frac{1}{f}$$

5.1.2 Loi de Snell Descartes

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad \theta_1 = \text{angle d'incidence}, \theta_2 = \text{angle de réfraction}$$

5.1.3 Réflexion interne totale

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1} \quad n_2 < n_1$$

Fibre optique

Fraction de lumière guidée par une fibre optique : $\frac{\tan^2(\theta_c)}{\tan^2(\theta)}$

5.2 Miroirs

Miroir convexe : image toujours à l'endroit et virtuelle $f < 0, d_i < 0$

Miroir concave : si $d_o > f$ image réelle ; si $d_o < f$ image virtuelle ; autrement pas d'image

5.2.1 Grandissement de l'image

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$$

5.2.2 Convention de signes

	+	-
d_i	côté réfléchissant / image réelle	derrière le miroir / image virtuelle
d_o	côté réfléchissant / objet réel	derrière le miroir / objet virtuel
r	côté réfléchissant / concave	derrière le miroir / convexe
f	côté réfléchissant / convergent	derrière le miroir / divergent
m	image à l'endroit	image à l'envers
h_i	au dessus de l'axe	au dessous de l'axe
h_o	"	"

5.3 Dioptries

5.3.1 Conventions

- n_1 désigne l'indice de réfraction du milieu dans lequel se trouve l'objet
- n_2 désigne l'indice de réfraction de l'autre milieu

5.3.2 Équation de base

$$\frac{n_1}{d_o} + \frac{n_2}{d_i} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

5.3.3 Grandissement de l'image

$$m = -\frac{n_1 d_i}{n_2 d_o}$$

5.3.4 Convention de signes

	+	-
d_i	convexe / image réelle	concave / image virtuelle
d_o	concave / objet réel	convexe / objet virtuel
r	convexe	concave
f	convergent	divergent
m	image à l'endroit	image à l'envers
h_i	au dessus de l'axe	au dessous de l'axe
h_o	"	"

5.4 Lentilles

5.4.1 Conventions

- n_1 désigne l'indice de réfraction du milieu dans lequel se trouve la lentille
- n_2 désigne l'indice de réfraction du matériau dans lequel est fait la lentille

5.4.2 Convergence et équation de base

$$C = (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \qquad \frac{n_1}{d_i} + \frac{n_1}{d_o} = C$$

Signes de d_i : négatif si l'image est du même côté du dioptré que l'objet et positif autrement

5.4.3 Distance focale

$$\frac{1}{f} = \frac{(n_2 - n_1)}{n_1} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \underset{\text{dans l'air}}{=} (n_2 - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_o}$$

Cette équation est aussi appelée **équation du lunetier**.

5.4.4 Grandissement de l'image

$$m = \frac{h_i}{h_o} = -\frac{d_i}{d_o}$$

5.4.5 Convention de signes

	+	-
d_i	convexe / image réelle	concave / image virtuelle
d_o	concave / objet réel	convexe / objet virtuel
r	convexe	concave
f	convergent	divergent
m	image à l'endroit	image à l'envers
h_i	au dessus de l'axe	au dessous de l'axe
h_o	"	"

5.4.6 Association de lentilles minces

$$C = C_1 + C_2 = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \qquad m = m_1 \cdot m_2$$

5.4.7 Loupe

Grossissement angulaire (=puissance de grossissement):

- oeil regardant en un point proche N (=25 cm) : $M = 1 + \frac{N}{f}$
- oeil regardant à l'infini : $M = \frac{N}{f}$

$$\frac{1}{d_o} = \frac{1}{f} - \frac{1}{d_i} = \frac{1}{f} - \frac{1}{N} \qquad d_o = \frac{Nf}{f+N} (d_o < f)$$

5.4.8 Télescopes et microscopes

Microscope : normalement $d = \theta f$

Limite de séparation : $LS = d = \theta f = \frac{1,22\lambda f}{D} = \frac{0,61\lambda}{\sin \alpha}$ où α est l'ouverture angulaire

Objectif à immersion : $LS = \frac{0,61\lambda}{n \sin \alpha}$

Ouverture numérique : $ON = n \cdot \sin \alpha$

5.4.9 Télescopes

L'image finale est à l'envers, et se forme entre l'objectif et l'oculaire.

$$M = - \frac{f_{\text{obj}}}{f_{\text{ocul}}} \qquad L = f_{\text{obj}} + f_{\text{ocul}}$$

Les télescopes terrestres ont une lentille de champ entre l'objectif et l'oculaire pour permettre d'avoir une image finale à l'endroit qui se formera entre l'objectif et la lentille de champ.

5.4.10 Microscope

L'image finale est à l'envers, et se situe derrière l'objet.

$$M_{\text{ocul}} = \frac{N}{f_{\text{ocul}}} \qquad M_{\text{obj}} = \frac{(l - f_{\text{ocul}})}{d_o} \qquad M = M_{\text{ocul}} \cdot M_{\text{obj}} \cong \frac{N \cdot l}{f_{\text{ocul}} \cdot f_{\text{obj}}}$$

où d_o est la distance objet-objectif et l la longueur du tube.

Chapitre 6

Relativité restreinte

On pose

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

6.1 Postulats d'Einstein

1. Les lois de la physique ont la même forme dans tous les systèmes inertiels
2. La lumière se propage dans le vide à une vitesse constante finie c , indépendante de la vitesse de la source ou de l'observateur

6.2 Temps et longueur propre

Le **temps propre** est un intervalle de temps correspondant à deux événements qui se produisent au même endroit dans le référentiel inertiel dans lequel l'intervalle est mesuré.

La **longueur propre** est la longueur mesurée de l'objet au repos dans un référentiel inertiel.

6.3 Dilatation du temps

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t_{\text{propre}}$$

6.4 Contraction des longueurs

$$l_{\text{propre}} = \gamma \cdot l$$

La contraction des longueurs n'a lieu que dans le sens de déplacement

6.5 Transformation de Lorentz

Soit deux référentiels, dont l'un (x, y, z, t) se déplace par rapport à l'autre (x_0, y_0, z_0, t_0) selon l'axe x à une vitesse v proche de c .

On a ainsi les relations suivantes

Dans le référentiel (x_0, y_0, z_0, t_0)	Dans le référentiel (x, y, z, t)
$x_0 = \gamma(x + vt)$	$x = \gamma(x_0 - vt_0)$
$y_0 = y$	$y = y_0$
$z_0 = z$	$z = z_0$
$t_0 = \gamma\left(t + \frac{vx}{c^2}\right)$	$t = \gamma\left(t_0 - \frac{vx_0}{c^2}\right)$

Tableau 6.1.

On peut tirer de ces relations les transformations relativistes des vitesses

Vitesse dans le référentiel (x_0, y_0, z_0, t_0)	Vitesse dans le référentiel (x, y, z, t)
$u_{0x} = \frac{u_x + v}{1 + \frac{v u_x}{c^2}}$	$u_x = \frac{u_{0x} - v}{1 - \frac{v u_{0x}}{c^2}}$
$u_{0y} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{u_y}{1 + \frac{v u_y}{c^2}}$	$u_y = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{u_{0y}}{1 - \frac{v u_{0y}}{c^2}}$
$u_{0z} = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{u_z}{1 + \frac{v u_z}{c^2}}$	$u_z = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{u_{0z}}{1 - \frac{v u_z}{c^2}}$

Tableau 6.2.

6.6 Conservation de l'intervalle

Dans l'espace relativiste, l'intervalle tel que définit ci-dessous est conservée.

$$I = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2 = \text{Cste}$$

6.7 Masse et quantité de mouvement relativiste

$$m = \gamma m_0$$

$$\vec{p} = m(v) \vec{v} = \gamma m_0 \vec{v}$$

6.8 La masse et l'énergie

L'énergie cinétique d'un corps à grande vitesse est donnée par

$$K = m c^2 - m_0 c^2$$

Einstein définit $m_0 c^2$ comme l'énergie au repos du corps, et écrit son énergie totale comme la somme de son énergie au repos et de son énergie cinétique

$$E = m_0 c^2 + K = m c^2$$

Ce que nous dit la théorie de la relativité est que l'augmentation de la masse correspond à une augmentation de l'énergie. La masse est une forme d'énergie.

Chapitre 7

Mécanique quantique

7.1 Théorie des quanta

7.1.1 Le photon

Le photon est le quantum d'énergie lumineuse de longueur d'onde λ défini par

$$E = hf = \frac{hc}{\lambda} \qquad h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

Sa quantité de mouvement est donnée par

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

7.1.2 Effet Compton

Un photon de longueur d'onde λ entre en collision avec un électron au repos. L'électron est projeté avec un angle θ tandis qu'un photon de longueur d'onde λ' est diffusé avec un angle φ .

La conservation de l'énergie s'écrit

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) m_0 c^2$$

et la longueur d'onde du photon diffusé est

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos \varphi)$$

7.1.3 Modèle de Bohr

Les électrons ont des orbites bien définies autour du noyau. Chaque orbite correspond à un niveau d'énergie de l'électron.

7.1.3.1 Niveaux d'énergie

Les niveaux d'énergie possibles sont donnés par la condition

$$L = n \frac{h}{2\pi} = m v r_n \qquad n = 1, 2, 3, \dots$$

Énergie totale d'un électron

$$E_n = \frac{1}{2} m v_n^2 - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Ze^2}{r_n} = -\frac{1}{n^2} \cdot \frac{Z^2 e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} \qquad n = 1, 2, 3, \dots$$

Orbites possibles

$$r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m Z e^2}$$

Rayon de Bohr

Le rayon de Bohr et la plus petite orbite possible: $n = 1$ et $Z = 1$ (hydrogène)

$$r_1 = 0.0529 \text{ nm}$$

7.1.3.2 Émission de photon

Lorsqu'un électron « saute » d'un niveau d'énergie à un autre, il émet un photon avec une énergie et une longueur d'onde

$$hf = E_i - E_j \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{hc}{E_i - E_j} = \left(\frac{Z^2 e^4 m}{8 \epsilon_0^2 h^3 c} \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \right)^{-1}$$

7.1.4 Hypothèse de de Broglie

Toute particule de masse m se déplaçant à la vitesse v a la longueur d'onde

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Les seules ondes qui subsistent sont celles qui vérifient

$$2\pi r_n = n\lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

7.2 Mécanique quantique

7.2.1 Principe d'incertitude de Heisenberg

7.2.1.1 Précision de la position et de la quantité de mouvement

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} = \hbar \quad \hbar = 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

7.2.1.2 Précision de l'énergie

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

7.2.2 Équation de Schrödinger

7.2.2.1 Indépendante du temps

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} + U(x)\psi(x) = E\psi(x) \quad \int \psi^2 dV = 1$$

7.2.2.2 Dépendante du temps

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} + U(x)\psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial t}$$

7.2.3 Particules libres

Fonction d'onde

$$\psi = A \sin(kx) + B \cos(kx) \quad k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

Énergie totale de la particule

$$E = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{p^2}{2m} \quad \Rightarrow \quad k = \frac{p}{\hbar} = \frac{h}{\lambda \hbar} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Ce qui prouve que la fonction d'onde est celle d'une onde sinusoïdale.

7.2.4 Particules dans un puits de potentiel

Soit U_0 la hauteur du puits et L sa largeur.

7.2.4.1 Potentiel infini

Équation de Schrödinger

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{2mE}{\hbar^2} \psi = 0$$

Niveaux d'énergie possibles

$$E_n = n^2 \frac{\hbar^2}{8mL^2} \quad n = 1, 2, \dots$$

Solution

$$\psi_n = \sqrt{\frac{2}{L}} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right)$$

Probabilité de trouver la particule entre x_1 et x_2

$$P = \int_{x_1}^{x_2} \psi(x)^2 = \left[\frac{x}{L} - \frac{1}{2\pi n} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \right]_{x_1}^{x_2}$$

7.2.4.2 Potentiel fini

On définit

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}}$$

Équation de Schrödinger

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \begin{cases} -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi & 0 < x < L \\ \kappa^2 \psi & x < 0 \text{ et } x > L \end{cases}$$

Solutions

$$\psi = \begin{cases} Ce^{\kappa x} & x < 0 \\ A \sin(kx) + B \cos(kx) & 0 < x < L \\ De^{-\kappa x} & x > L \end{cases}$$

Avec $C = B$ et $\kappa C = kA$.

7.2.5 Effet tunnel à travers une barrière de potentiel

Soit U_0 la hauteur de la barrière de potentiel, L sa largeur.

Le **coefficient de transmission** est

$$T \cong e^{-2\kappa L} \quad \kappa = \sqrt{\frac{2m(U_0 - E)}{\hbar^2}}$$

7.3 Mécanique quantique des atomes

7.3.1 État quantique

L'état d'un électron dans un atome est décrit par les nombres suivants

Nombre quantique	Symbole	Valeurs possibles
principal	n	$1, 2, 3, \dots$
orbital	l	$0, 1, \dots, n-1$
magnétique	m_l	$-l, -l+1, \dots, l-1, l$
spin	m_s	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

Tableau 7.1.

Les valeurs de l sont notées par les symboles suivants

Valeur de l	Symbole
0	s
1	p
2	d
3	f
4	g
5	h

Tableau 7.2.

7.3.1.1 Principe d'exclusion de Pauli

Deux électrons dans un atome ne peuvent pas occuper le même état quantique.

7.3.2 Moments

7.3.2.1 Moment angulaire

$$L = \sqrt{l(l+1)} \cdot \hbar \qquad L_z = m_l \cdot \hbar$$

7.3.2.2 Moment angulaire de spin

$$S = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$$

7.3.2.3 Moment magnétique

$$\vec{\mu} = -\frac{e}{2m} \vec{L} \qquad \mu_z = m_l \cdot \mu_B$$

où $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m}$ est le **magnéton de Bohr**

7.3.2.4 Moment angulaire total

$$J = \sqrt{j(j+1)} \cdot \hbar \qquad \vec{j} = \vec{l} + \vec{s}$$

Pour l'hydrogène, on a $j = l \pm \frac{1}{2}$.

7.3.3 Atome d'hydrogène

Équation de Schrödinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \cdot \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} \psi = E\psi$$

Énergie possibles de l'atome d'hydrogène

$$E_n = - \left(\frac{mk^2e^4}{2\hbar^2} \right) \cdot \frac{1}{n^2} = - \frac{13,6eV}{n^2}$$

où $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$

7.3.3.1 Fonctions d'onde de l'atome d'hydrogène

Pour chaque état de l'électron, on donne la fonction d'onde est la **densité de probabilité radiale** définie par $P_r = |\psi(r)|^2 \cdot 4\pi r^2$. r_1 est le rayon de Bohr (7.1.3.1).

État 1s

$$\psi_{100} = \sqrt{\frac{1}{\pi r_1^3}} e^{-\frac{r}{r_1}} \qquad P_r = 4 \cdot \frac{r^2}{r_1^3} e^{-\frac{2r}{r_1}}$$

État 2s

$$\psi_{200} = \frac{1}{\sqrt{32\pi r_1^3}} \left(2 - \frac{r}{r_1}\right) e^{-\frac{r}{2r_1}} \quad P_r = \frac{r^2}{8r_1^3} \left(2 - \frac{r}{r_1}\right)^2 e^{-\frac{r}{r_1}}$$

État 2p

$$\psi_{210} = \frac{1}{\sqrt{32\pi r_1^3}} \frac{r}{r_1} e^{-\frac{r}{2r_1}} \cos \theta$$

$$\psi_{21+1} = \frac{1}{\sqrt{64\pi r_1^3}} \frac{r}{r_1} e^{-\frac{r}{2r_1}} (\sin \theta) e^{i\varphi} \quad \psi_{21-1} = \frac{1}{\sqrt{32\pi r_1^3}} \frac{r}{r_1} e^{-\frac{r}{2r_1}} (\sin \theta) e^{-i\varphi}$$

7.4 Les molécules et les solides

Énergie potentielle liée à l'interaction répulsive entre charges de même signe :

$$u = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{1,2}} \quad u = -\frac{A}{r^m} + \frac{B}{r^n} \text{ (atomes lourds)}$$

7.4.1 Énergie moléculaire (molécule diatomique)**7.4.1.1 Énergie de rotation moléculaire**

Nombre quantique du moment angulaire de rotation : J

Moment angulaire : $I\omega = \sqrt{J(J+1)}\hbar$; $J = 0, 1, 2, \dots$

Masse réduite : $\mu = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$

Moment d'inertie : $I = \mu r^2 = \mu(r_1 + r_2)^2$

$$E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} I \omega^2 = \frac{(I\omega)^2}{2I} = J(J+1) \frac{\hbar^2}{2I} \quad J = 0, 1, \dots$$

7.4.1.2 Énergie de vibration moléculaire

Approximation harmonique

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

où k est la constante de rappel et μ la masse réduite

$$E_{\text{vib}} = \left(v + \frac{1}{2}\right) h f$$

où $v = 0, 1, \dots$ est le nombre quantique de vibration

7.4.1.3 Énergie totale

$$\Delta E = \Delta E_{\text{rot}} + \Delta E_{\text{vib}}$$

7.4.2 Liaison dans les solides**7.4.2.1 Énergie électrostatique**

$$u = -\frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r}$$

où α est la constant de Madelung

7.4.2.2 Énergie potentielle

$$u = -\frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \frac{B}{r^m}$$

A l'équilibre :

$$u = u_0 = -\frac{\alpha}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_0} \left(1 - \frac{1}{m}\right)$$

où r_0 est la distance à l'équilibre

7.4.3 Théorie des électrons libres dans les métaux

7.4.3.1 Densité d'état

$$\rho(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{3/2}}{h^3} E^{1/2}$$

7.4.3.2 Énergie de Fermi

$$E_f = \frac{h^2}{8m_e} \left(\frac{3N}{\pi V} \right)^{2/3}$$

où N est le nombre d'électrons disponibles par unité de volume

7.4.3.3 Énergie moyenne par électron

$$\bar{E} = \frac{3}{5} E_f$$

7.4.3.4 Fonction de probabilité de Fermi-Dirac

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$$

Si $T = 0$:

$$f(E) = \begin{cases} 1 & \text{si } E < E_f \\ 0 & \text{si } E > E_f \end{cases}$$

Si $T \neq 0$, le nombre d'électrons à une énergie déterminée est donnée par

$$n_0(E) = g(E) f(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m_e^{3/2}}{h^3} \frac{E^{1/2}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)}$$

Chapitre 8

Radioactivité et énergie nucléaire

8.1 Énergie totale de liaison

La masse d'un noyau est toujours inférieure à celle des nucléons le composant. La différence de masse représente l'énergie totale de liaison qui est l'énergie libérée lors de la création du noyau, ou à l'inverse, l'énergie qu'il faut fournir pour le séparer. Cette énergie est donnée par la fameuse relation d'Einstein entre la masse et l'énergie (6.8).

8.2 Désintégration

Il y a trois type de désintégration:

1. désintégration alpha:
La réaction produit deux noyaux
2. désintégration bêta:
La réaction produit un noyau et un électron
3. désintégration gamma:
La réaction produit un photon très énergétique

8.2.1 Temps de la désintégration et demi-vie

Soit un échantillon de N_0 noyaux radioactifs.

- Le **nombre de noyaux désintégrés** après un temps t est donné par

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- L'**activité**, soit le nombre de désintégrations par seconde est donnée par

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

- La **demi-vie** est définie comme

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Annexe A

Outils mathématiques

A.1 Trigonométrie

A.1.1 Identités

$$\sin^2(\theta) + \cos^2(\theta) = 1$$

$$\sin(2\theta) = 2 \sin(\theta) \cos(\theta)$$

$$\cos(2\theta) = \cos^2(\theta) - \sin^2(\theta) = 2 \cos^2(\theta) - 1 = 1 - 2 \sin^2(\theta)$$

$$\tan(2\theta) = \frac{2 \tan(\theta)}{1 - \tan^2(\theta)}$$

$$\sin(\alpha \pm \beta) = \sin(\alpha) \cos(\beta) \pm \cos(\alpha) \sin(\beta)$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos(\alpha) \cos(\beta) \mp \sin(\alpha) \sin(\beta)$$

$$\tan(\alpha \pm \beta) = \frac{\tan(\alpha) \pm \tan(\beta)}{1 \mp \tan(\alpha) \tan(\beta)}$$

$$\sin(\alpha) \pm \sin(\beta) = 2 \sin\left(\frac{\alpha \pm \beta}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha \mp \beta}{2}\right)$$

A.1.2 Périodicité

$$\begin{aligned}
 \sin(2\pi - \theta) &= \sin(\theta) \\
 \cos(2\pi - \theta) &= -\cos(\theta) \\
 \sin(\pi - \theta) &= \cos(\theta) \\
 \cos(\pi - \theta) &= \sin(\theta) \\
 \cos(-\theta) &= \cos(\theta) \\
 \sin(-\theta) &= -\sin(\theta) \\
 \tan(-\theta) &= -\tan(\theta)
 \end{aligned}$$

A.1.3 Valeurs courantes

α	0	$\frac{\pi}{6}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{2}$
$\sin(\alpha)$	0	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	1
$\cos(\alpha)$	1	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$	0
$\tan(\alpha)$	0	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	1	$\sqrt{3}$	—

A.2 Logarithmes

$$\begin{aligned}
 \log(ab) &= \log(a) + \log(b) \\
 \log\left(\frac{a}{b}\right) &= \log(a) - \log(b) \\
 \log(a)^n &= n \cdot \log(a)
 \end{aligned}$$

A.3 Vecteurs

$$\begin{aligned}
 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a_1 + b_1 \\ a_2 + b_2 \\ \vdots \\ a_n + b_n \end{pmatrix} \\
 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} &= a_1 b_1 + a_2 b_2 + \dots + a_n b_n \\
 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} a_2 b_3 - a_3 b_2 \\ a_3 b_1 - a_1 b_3 \\ a_1 b_2 - a_2 b_1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

A.4 Dérivées

$f(x)$	$\frac{df}{dx}$
x^n	$n x^{n-1}$
$\sin(ax)$	$a \cos(ax)$
$\cos(ax)$	$-a \sin(ax)$
$\tan(ax)$	$a \frac{1}{\cos^2(ax)}$
$\ln(ax)$	$\frac{a}{x}$
e^{ax}	$a e^{ax}$

A.5 Intégrales

$f(x)$	$\int f(x) dx$
x^n	$\frac{1}{n+1} x^{n+1}$
$\sin(ax)$	$-\frac{1}{a} \cos(ax)$
$\cos(ax)$	$\frac{1}{a} \sin(ax)$
$\tan(ax)$	$\frac{1}{a} \ln \left \frac{1}{\cos(ax)} \right $
$\frac{1}{x}$	$\ln(x)$
e^{ax}	$\frac{1}{a} e^{ax}$
$\frac{1}{x^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} \tan^{-1} \left(\frac{x}{a} \right)$
$\frac{1}{x^2 - a^2}$	$\begin{cases} \frac{1}{2a} \ln \left \frac{x-a}{x+a} \right & x^2 > a^2 \\ -\frac{1}{2a} \ln \left \frac{x+a}{x-a} \right & x^2 < a^2 \end{cases}$
$\frac{1}{\sqrt{x^2 \pm a^2}}$	$\ln \left x + \sqrt{x^2 \pm a^2} \right $
$\frac{1}{\sqrt[3]{x^2 \pm a^2}}$	$\frac{\pm x}{a^2 \sqrt{x^2 \pm a^2}}$
$\frac{x}{\sqrt[3]{x^2 \pm a^2}}$	$\frac{-1}{\sqrt{x^2 \pm a^2}}$

Annexe B

Constantes et unités

B.1 Constantes

Permittivité électrique	ε_0	$= 8.85 \cdot 10^{12}$	$A s V^{-1} m^{-1}$
Perméabilité du vide	μ_0	$= 4\pi \cdot 10^{-7}$	$T m A^{-1}$
Charge de l'électron	e	$= 1.602 \cdot 10^{-19}$	C
Masse de l'électron	m_e	$= 9.109 \cdot 10^{-31}$	kg
Masse du proton	m_p	$= 1.672 \cdot 10^{-27}$	kg
Masse du neutron	m_n	$= 1.675 \cdot 10^{-27}$	kg
Nombre d'Avogadro	N_A	$= 6.02 \cdot 10^{23}$	mol^{-1}
Vitesse de la lumière	c	$= 2.997 \cdot 10^8$	$m s^{-1}$
Constante de Planck	h	$= 6.626 \cdot 10^{-34}$	$J s$
Constante de Planck (eV)	h	$= 4.135 \cdot 10^{-15}$	$e V s$
Rayon de Bohr	r_1	$= 0.0529$	$n m$

B.2 Unités

Électronvolt	$1 eV$	$= 1.602 \cdot 10^{-19}$	J
Unité de masse atomique	$1 u$	$= 1.6605 \cdot 10^{-27}$	kg

Index

Ampère	15	harmoniques	21
anneaux de Newton	23	Heisenberg, principe d'incertitude	32
Archimède, principe	19	impédance	14
battements	22	incertitude, principe	32
Bernoulli	20	indice de réfraction	26
Biot et Savart	16	inductance	12, 13
biréfringence	25	induction	
Bohr		électromagnétique	17
magnéton de	34	auto-	17
modèle de	31	mutuelle	17
rayon de	31	interférence	23
Brewster, angle de	25	Kirshoff	12
Broglie	32	lentilles	27
capacité	10	logarithmes	39
capillarité	20	longueur propre	29
champ		Lorentz	
électrique	9	force de	15
électrique induit	17	transformation de	29
magnétique	15	loupe	28
Compton	31	lunetier, équation du	27
condensateur	10, 12, 13	Malus, équation de	25
conductivité	11	masse réduite	35
Coulomb	9	masse volumique	19
courant	11	Maxwell	18
boucle de	15	microscope	28
densité de	11	miroir	26
décibel	22	moment	
désintégration		angulaire	34
alpha	37	angulaire de spin	34
bêta	37	angulaire total	34
gamma	37	de force	15
demi-vie	37	de force dipolaire	10
densité	19	dipolaire	9
densité de probabilité radiale	34	dipolaire magnétique	15
Descartes	26	magnétique	34
diélectriques	11	Ohm	11
diffraction	24	onde	
réseau de	24	équation	21
dioptries	27	longueur	21
dipôle		nombre	21
électrique	9	période	21
Doppler	22	vitesse	21
$E = mc^2$	30	Pascal, principe	19
Faraday, loi de	17	perméabilité du vide	15
Fermi		perméabilité magnétique	16
énergie de	36	photon	31
fonction de probabilité	36	polarisation	25
flux magnétique	17	circulaire	25
focale	26	orthogonale	25
force électromotrice	17	TE	25
fréquence	21	TM	25
angulaire	21	potentiel	
fondamentale	21	électrique	9
fréquence de résonance	14	puits de	32
Fresnel, représentation de	13	pression	19
Gauss	9	produit vectoriel	39

puissance électrique	12	source	13
réflexion interne totale	26	télescope	28
résistance	12, 13	temps propre	29
résistivité	11	tension superficielle	20
Rayleigh, critère de	24	transformateurs	17
rayon de courbure	26	travail d'un champ électrique	9
retard d'onde	25	trigonométrie	38
Schrödinger	32	tunnel, effet	33
Snell	26	visible, spectre	23
solénoïde	16	vitesse de dérive	11
son	21	Young, double fente de	23