

## *Table des matières*

### *I. Espace, temps, mouvement*

1. L'existence de l'univers définit « l'espace».....	1
2. L'évolution de l'univers définit « le temps ».....	4
3. Relativité des mouvements.....	8

### *II. La dynamique Newtonienne*

1. L'équation fondamentale .....	13
2. L'unité de masse.....	15
3. Le moment cinétique.....	15
4. Covariance des lois physiques.....	16
5. Travail, énergie.....	16

### *III. Les collisions*

1. Qu'est-ce qu'un choc ?.....	19
2. Conservation de la quantité de mouvement.....	20
3. Conservation de l'énergie totale.....	20
4. Collisions élastiques.....	21
5. Collisions inélastiques.....	23
6. Conclusion.....	24

### *IV. Pesanteur et gravitation universelle*

<b>1. La portée de l'équation fondamentale de la dynamique.....</b>	<b>25</b>
<b>2. La pesanteur.....</b>	<b>26</b>
2.1. L'accélération de la pesanteur.....	26
2.2. L'énergie potentielle de pesanteur.....	27
<b>3. Les forces mécaniques.....</b>	<b>28</b>
3.1. Généralités.....	28
3.2. Les forces de liaison.....	28
3.3. Les forces de rappel.....	30
3.4. Les forces de frottement.....	31
<b>4. La gravitation universelle.....</b>	<b>33</b>
4.1. Le champ de gravitation.....	33
4.2. Le champ de gravitation créé par une distribution d'objets ponctuels.....	35
4.3. Le théorème de Gauss.....	38
4.4. La pesanteur : manifestation des forces de la gravitation.....	39
4.5. L'énergie potentielle associée aux forces de gravitation.....	40
4.6. Propriété fondamentale des champs de gravitation.....	41
4.7. L'énergie d'interaction stockée dans le champ de gravitation.....	42
<b>5. Le système solaire.....</b>	<b>45</b>
5.1. Mise en évidence de la rotation de la terre.....	46
5.2. Caractéristique des trajectoires des planètes (lois de Kepler).....	48

### *V. L'interaction électrique*

<b>1. La découverte de l'électricité.....</b>	<b>57</b>
<b>2. Une deuxième interaction naturelle.....</b>	<b>57</b>
2.1. Les charges électriques et la force de Coulomb.....	57
2.2. Le champ électrique et le théorème de Gauss.....	59
2.3. Le potentiel électrique.....	63
2.4. L'énergie d'interaction électrique.....	63
<b>3. Exemple de calculs du champ électrique.....</b>	<b>68</b>
3.1. Méthode d'intégration directe du champ.....	68
3.2. Méthode du potentiel.....	71
3.3. Utilisation du théorème de Gauss.....	73
3.4. Résolution de l'équation de Poisson.....	76
3.5. Méthode générale d'intégration de l'équation de Poisson.....	80

<b>4. L'électrocinétique</b> .....	80
4.1. Isolants et conducteurs.....	80
4.2. Courant et densité de courant.....	82
4.3. Conservation du courant.....	84
4.4. La loi d'Ohm et la résistivité des conducteurs.....	86
<b>5. Les circuits électriques</b> .....	90
5.1. Symboles et conventions de signe.....	91
5.2. Exemple : générateurs opposés.....	91
5.3. Les théorèmes de Thévenin et de Norton.....	92

## *VI. Les phénomènes magnétiques*

<b>1. Le champ magnétique</b> .....	93
1.1. La loi de Laplace.....	93
1.2. La force de Lorentz.....	94
<b>2. Propriété fondamentale du champ magnétique</b> .....	98
<b>3. Peut-on créer des champs magnétiques ?</b> .....	100
3.1. La loi de Biot et Savart.....	100
3.2. Expression générale du champ magnétique.....	102
3.3. Définition de l'ampère, valeur conventionnelle de $\mu_0$ .....	102
3.4. Champ magnétique créé sur l'axe d'une spire conductrice.....	104
3.5. Le solénoïde de longueur finie.....	104
<b>4. Le potentiel vecteur et le théorème d'Ampère</b> .....	105
4.1. Démonstration du théorème d'Ampère.....	105
4.2. Utilisation du théorème d'Ampère.....	107
4.3. Le potentiel vecteur.....	110
<b>5. Moment magnétique associé à une boucle de courant</b> .....	111
<b>6. Conclusion</b> .....	114

## *VII. Phénomènes d'induction. Equations de Maxwell. Ondes électromagnétiques*

<b>1. La loi de Lenz</b> .....	115
<b>2. Les équations de Maxwell</b> .....	117

<b>3. Les équations de propagation</b> .....	120
3.1. La jauge de Lorentz.....	120
3.2. Les potentiels retardés.....	122
<b>4. L'énergie magnétique</b> .....	123
<b>5. Propagation libre des champs : les ondes électromagnétiques</b> .....	126
5.1. Les ondes électromagnétiques	126
5.2. Propagation de l'énergie électromagnétique	127
<b>6. Interférences et diffraction</b> .....	129
6.1. Les interférences : principe de base.....	129
6.2. Réalisation expérimentale.....	130
6.3. Les phénomènes de diffraction.....	132

## *VIII. Systèmes à $N$ corps. Mécanique analytique*

<b>1. Généralisation des lois de la mécanique au cas des systèmes à <math>N</math> particules</b> .....	137
1.1. Eléments cinétiques d'un système de $N$ points matériels.....	137
1.2. Dynamique des systèmes de $N$ points matériels.....	139
<b>2. Les degrés de liberté</b> .....	142
<b>3. Le formalisme de la mécanique analytique</b> .....	144
3.1. Les équations de Lagrange dans le cas des forces conservatives....	144
3.2. Le principe de moindre action.....	147
3.3. Impulsions généralisées, variables cycliques.....	149
3.4. Le lagrangien associé aux pseudo-forces .....	150
3.5. Le lagrangien associé aux forces électromagnétiques.....	151
3.6. Forces dissipatives, fonction de Rayleigh.....	152
<b>4. Les lois de conservation</b> .....	153
4.1. L'énergie.....	153
4.2. L'impulsion.....	154
4.3. Le moment cinétique.....	154
<b>5. Applications des équations de Lagrange</b> .....	155
<b>6. Le formalisme d'Hamilton</b> .....	162
6.1. Les équations d'Hamilton.....	162
6.2. Evolution des grandeurs mécaniques, crochets de Poisson.....	163
6.3. Intérêt du formalisme d'Hamilton.....	164

## *IX. La relativité*

<b>1. L'éther existe-t-il ?</b> .....	165
1.1. L'expérience de Michelson -Morley.....	167
1.2. La transformation de Lorentz-Poincaré.....	168
<b>2. L'espace de Minkowski à 4 dimensions</b> .....	173
2.1. L'invariant relativiste.....	173
2.2. Diagrammes de Minkowski.....	175
<b>3. La dynamique relativiste</b> .....	177
3.1. L'équation fondamentale de la dynamique relativiste.....	177
3.2. L'énergie cinétique. Equivalence masse énergie.....	179
<b>4. L'électromagnétisme et la relativité restreinte</b> .....	180
<b>5. Les quadrivecteurs</b> .....	183
<b>6. Gravitation et relativité générale</b> .....	188
6.1. Le principe d'équivalence.....	188
6.2. Déviation des photons dans un champ de gravitation.....	189
6.3. Le décalage vers le rouge gravitationnel.....	190
6.4. Les équations d'Einstein.....	191
6.5. La métrique de Schwarzschild.....	194
6.6. Quelques conséquences de la métrique de Schwarzschild	196
<b>7. Conclusion</b> .....	202

## *X. La physique quantique*

<b>1. Les faits questions</b> .....	203
<b>2. Les points faibles de la mécanique classique</b> .....	208
<b>3. Le cadre mathématique de la mécanique quantique</b> .....	210
<b>4. Le commutateur de base de la physique quantique, inégalités d'Heisenberg</b> .....	216
<b>5. La représentation d'Heisenberg</b> .....	218
5.1. Les opérateurs dans la représentation Q.....	218
5.2. Les opérateurs dans la représentation P.....	219
5.3. Equations d'évolutions dans la représentation d'Heisenberg.....	221
5.4. La deuxième inégalité d'Heisenberg.....	223

<b>6. La représentation de Schrödinger</b> .....	224
<b>7. La mécanique ondulatoire</b> .....	225
7.1. L'équation de Schrödinger.....	225
7.2. Valeurs moyennes en mécanique ondulatoire.....	227
<b>8. Les apports du formalisme</b> .....	228
8.1. Les systèmes conservatifs : loi de Planck/Einstein.....	228
8.2. La particule libre : loi de Louis de Broglie.....	230
8.3. Influence d'une discontinuité de potentiel.....	232
8.4. Barrière de potentiel, l'effet tunnel.....	234
8.5. Le puits de potentiel de profondeur finie (états liés).....	236
8.6. Le puits de potentiel infini.....	239
8.7. L'oscillateur harmonique à une dimension.....	240
8.8 L'atome d'hydrogène.....	246
<b>9. Perturbations</b> .....	248
9.1. Les méthodes approchées de résolution de l'équation de Schrödinger indépendante du temps.....	248
9.2. Les probabilités de transition : la règle d'or de Fermi.....	250
<b>10. Observables compatibles avec l'hamiltonien</b> .....	253
10.1. Le moment cinétique.....	253
10.2. Le moment cinétique classique et le moment magnétique.....	254
10.3. Les opérateurs quantiques liés au moment cinétique.....	255
10.4. Le spin : une nouvelle grandeur adhoc.....	259
10.5 Le spin des particules et le principe de Pauli.....	264
<b>11. La mécanique quantique relativiste</b> .....	266
11.1 . Spineurs et équation de Dirac.....	267
11.2. La limite classique de l'équation de Dirac.....	270
11.3. Le spin des particules.....	271

## *XI. Kit de survie en mathématiques*

<b>1. Introduction</b> .....	273
<b>2. Espace et systèmes de coordonnées</b> .....	273
<b>3. Vecteurs</b> .....	274

3.1. Définition.....	274
3.2. Addition de vecteurs.....	274
3.3. Multiplication d'un vecteur par un scalaire.....	275
3.4. Repérage d'un point au moyen de vecteurs.....	275
3.5. Produit scalaire de deux vecteurs.....	275
3.6. Le produit vectoriel.....	277
<b>4. Dérivées de fonctions.....</b>	<b>278</b>
4.1. Définition.....	278
4.2. La fonction constante.....	279
4.4. La fonction quadratique.....	279
4.5. La fonction élévation de $x$ à la puissance $n$ .....	280
4.6. Somme de fonctions.....	280
4.7. Produit de fonctions.....	280
4.8. Rapport de deux fonctions.....	281
4.9. Dérivées d'ordre $n$ .....	281
4.10. Dérivées de fonctions composées.....	281
4.11. Les fonctions trigonométriques.....	282
<b>5. Développement en série et fonctions spéciales.....</b>	<b>283</b>
5.1. Le développement de MacLaurin.....	283
5.2. Développements limités.....	284
5.3. La fonction exponentielle.....	284
5.4. La fonction logarithme.....	285
5.5. Primitives.....	286
<b>6. Les nombres complexes.....</b>	<b>286</b>
<b>7. Les intégrales.....</b>	<b>289</b>
7.1. L'intégrale simple.....	289
7.2. L'intégrale double.....	291
7.3. Intégrales triples.....	295
7.4. Intégrales diverses.....	296
<b>8. Différentielles et opérateurs différentiels.....</b>	<b>299</b>
8.1. La différentielle d'une fonction à une seule variable.....	299
8.2. Différentielle d'une fonction à plusieurs variables : le gradient.....	299
8.3. Le gradient d'une fonction dans les différents systèmes de coordonnées.....	301
8.4. La divergence d'un vecteur.....	303
8.5. Le rotationnel d'un vecteur.....	305
8.6. Les laplaciens.....	307
8.7. Différentielles et formes différentielles.....	307
8.8. Les fonctions implicites.....	308
8.9. L'opérateur Nabla.....	309
<b>9. Les équations différentielles.....</b>	<b>310</b>
9.1. Généralités.....	310

9.2 Equation différentielle du premier ordre.....	313
9.3. Equation différentielle linéaire du second degré.....	314
9. 4. Régimes forcés.....	318
<b>10. La transformation de Fourier.....</b>	<b>321</b>
10.1. La fonction de distribution de Dirac.....	321
10.2. La transformation de Fourier.....	323
10.3. Quelques propriétés des transformées de Fourier.....	325
10.4. Produits de convolution, de corrélation.....	325
<b>11. Généralités sur les espaces vectoriels.....</b>	<b>326</b>
<b>12. La géométrie différentielle.....</b>	<b>330</b>
12.1. Vecteurs contravariants et changement de base.....	330
12.2. La dérivation covariante.....	335
12.3. Espaces de Riemann.....	337
<b>Epilogue.....</b>	<b>341</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>345</b>
<b>Index alphabétique.....</b>	<b>347</b>