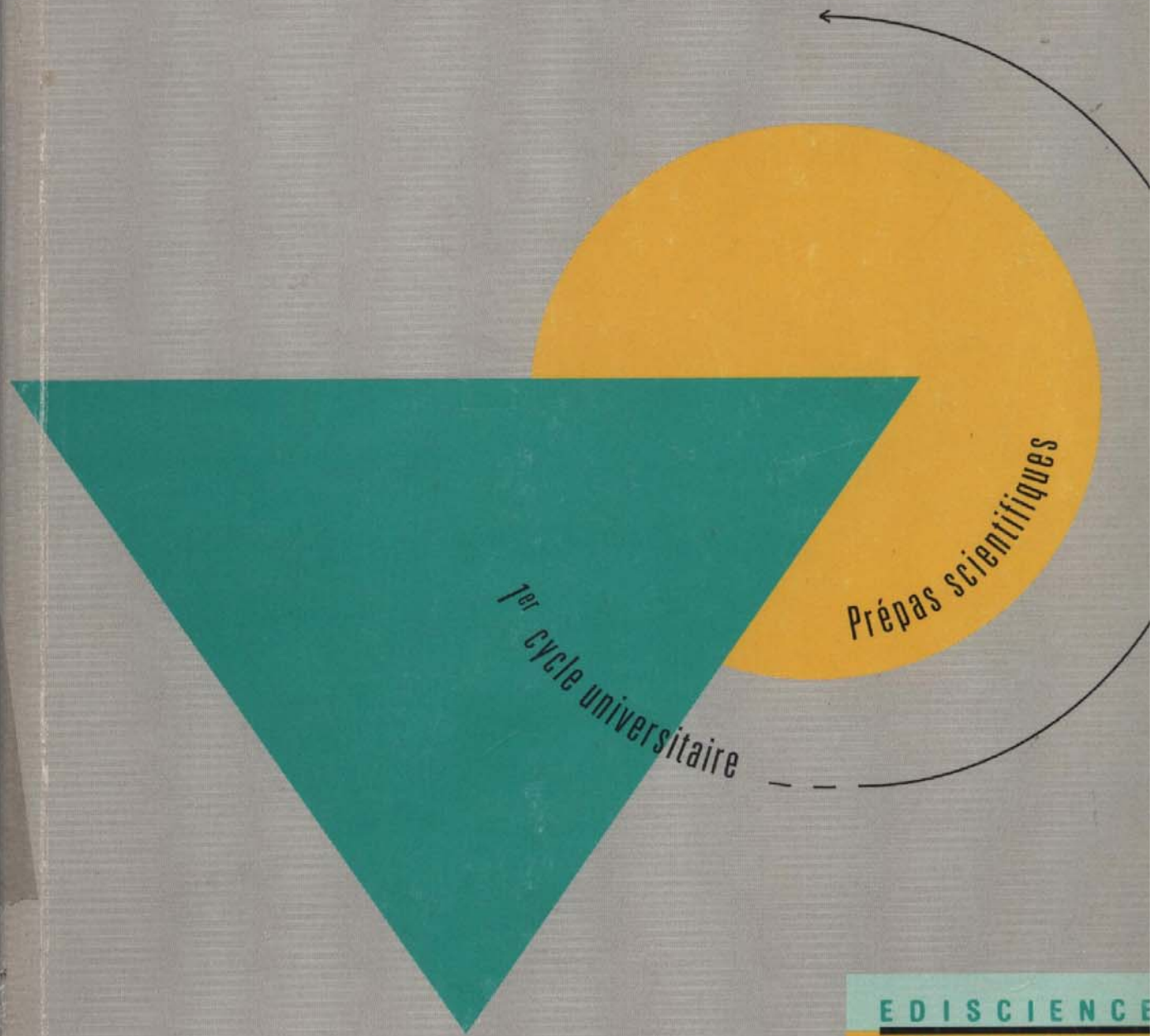


# RELATIVITÉ

PROBLÈMES RÉSOLUS

2<sup>e</sup> édition

Hubert Lumbroso



EDISCIENCE  
internationale



# Table des matières

## CINÉMATIQUE RELATIVISTE

### Chapitre 1. Espace et temps relativistes. Vitesse et accélération

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Rappels de cours</b> .....                                                   | 3  |
| I. Postulats. Transformation de Galilée et de Lorentz .....                     | 3  |
| II. Contraction des longueurs et dilatation des durées .....                    | 5  |
| III. Loi de composition des vitesses relativistes .....                         | 6  |
| IV. Quadri vecteur espace-temps et quadri vecteur vitesse .....                 | 7  |
| <b>Problèmes du chapitre 1</b> .....                                            | 9  |
| <b>A. Transformations de Lorentz :</b>                                          |    |
| <b>contraction des longueurs et dilatation des durées</b>                       |    |
| 1. Transformation des coordonnées d'événements. Durées propre et impropre ..... | 9  |
| 2. Masse volumique et forme apparente d'une sphère .....                        | 12 |
| 3. Durée de vie des mésons et loi de désintégration .....                       | 14 |
| 4. Etablissement des formules de transformation espace-temps de Lorentz .....   | 16 |
| 5. Diagrammes espace-temps : longueurs, durées, intervalle d'univers ..         | 19 |
| 6. Longueurs d'images par enregistrement photographique .....                   | 22 |
| 7. Chute relativiste d'une règle .....                                          | 25 |
| 8. Croisement de deux fusées. Condition de simultanéité d'événements            | 29 |
| <b>B. Composition des vitesses relativistes</b>                                 |    |
| 9. Transformation des vitesses. Invariance de $c$ .....                         | 33 |
| 10. Vitesse relative de deux particules .....                                   | 36 |
| 11. Mouvement uniforme relativiste sur une route inclinée .....                 | 38 |
| 12. Formules générales de Lorentz. Composition des vitesses. Application        | 41 |
| 13. Double transformation de Lorentz et loi des vitesses .....                  | 45 |
| 14. Cinématique d'un ensemble de particules .....                               | 48 |
| 15. Expérience de Fizeau. Indice d'un liquide dispersif .....                   | 51 |
| <b>C. Composition des accélérations relativistes</b>                            |    |
| 16. Formules de transformation des accélérations. Applications .....            | 55 |
| 17. Mouvement accéléré d'une fusée. Rajeunissement de l'astronaute ...          | 58 |



**D. Onde et photon : aberrations et lois de répartition**

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| 18. Aberration des étoiles .....                                | 62 |
| 19. Loi de répartition spatiale des photons. Applications ..... | 64 |
| 20. Radar et miroir mobile. Diagramme espace-temps .....        | 67 |

**DYNAMIQUE RELATIVISTE**

|                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Chapitre 2. Quantité de mouvement et énergie. Effet Doppler.<br/>Chocs relativistes et désintégration</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Rappels de cours</b> .....                                                                   | 73  |
| I. Quantité de mouvement et énergie d'une particule libre .....                                 | 73  |
| II. Quadri-vecteur impulsion-énergie. Relations fondamentales .....                             | 74  |
| III. Ondes : aberrations et effet Doppler. Quadri-vecteur onde .....                            | 76  |
| IV. Chocs relativistes élastique et inélastique. Utilisation du référentiel barycentrique ..... | 78  |
| V. Changement de référentiel. Relations fondamentales .....                                     | 80  |
| <b>Problèmes du chapitre 2</b> .....                                                            | 82  |
| <b>A. Vitesse et énergie relativistes</b>                                                       |     |
| 1. Relations relativistes entre $m$ , $p$ , $T$ et $v$ . Applications .....                     | 82  |
| 2. Système de $N$ particules relativistes et référentiel barycentrique .....                    | 84  |
| <b>B. Impulsion et énergie du photon. Effet Doppler</b>                                         |     |
| 3. Effet Doppler et expansion de l'univers .....                                                | 88  |
| 4. Contrôle de la vitesse et de la position d'une fusée par signaux radar .....                 | 93  |
| 5. Réflexion oblique sur un miroir mobile. Double effet Doppler .....                           | 96  |
| 6. Durée d'un partielle. Effet Doppler et repérage d'une fusée .....                            | 100 |
| 7. Vecteur d'onde quadridimensionnel. Effet Doppler et raies stellaires .....                   | 105 |
| 8. Voyageur de Langevin. Paradoxe des jumeaux .....                                             | 109 |
| <b>C. Diffusion et chocs élastiques relativistes.</b>                                           |     |
| <b>Effet Compton</b>                                                                            |     |
| 9. Diffusion élastique symétrique de deux protons .....                                         | 112 |
| 10. Diffusion élastique dans le référentiel barycentrique .....                                 | 114 |
| 11. Choc élastique : référentiels de Breit et référentiel barycentrique .....                   | 119 |
| 12. Effet Compton et pic de rétrodiffusion .....                                                | 123 |
| 13. Diffusion élastique Compton. Sensibilité d'un analyseur .....                               | 127 |
| 14. Diffusion élastique Compton avec cible en mouvement .....                                   | 132 |



**D. Chocs inélastiques relativistes. Seuil de réaction**

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15. Production d'antiprotons. Energie disponible. Anneaux de stockage                                 | 137 |
| 16. Seuils de la réaction $p^+ + p^+ \rightarrow \pi^+ + {}^2_1H$ avec cible au repos ou en mouvement | 139 |
| 17. Conditions de production de mésons $K^0$ d'énergie et de direction données                        | 143 |
| 18. Spectre d'énergie de neutrons et cône d'émission                                                  | 148 |
| 19. Facteur $Q$ d'une réaction de fusion. Défaut de masse                                             | 152 |
| 20. Effet Cherenkov. Longueur d'onde minimale                                                         | 154 |

**E. Réactions de désintégration**

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 21. Désintégration du méson $\pi^0$ en photons gamma. Angle d'ouverture                    | 158 |
| 22. Transition entre deux états d'un noyau. Processus d'émission et processus d'absorption | 164 |
| 23. Désintégration d'une particule en trois particules                                     | 169 |
| 24. Etude générale d'une désintégration. Diagramme vectoriel                               | 173 |

**F. Réactions de matérialisation et d'annihilation**

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 25. Réaction de matérialisation du photon : seuil et direction d'émission | 179 |
| 26. Réaction d'annihilation électron-positon                              | 184 |

|                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Chapitre 3. Dynamique relativiste.</b><br><b>Mouvement relativiste de charges dans les champs</b><br>$\vec{E}$ et $\vec{B}$ |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Rappels de cours</b>                                                                          | 187 |
| I. Lois fondamentales de la dynamique relativiste                                                | 187 |
| II. Quadri vecteur force. Transformation des forces                                              | 188 |
| III. Transformation du champ électromagnétique $(\vec{E}, \vec{B})$                              | 190 |
| IV. Mouvement de charges dans les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ .<br>Accélérateurs de particules | 191 |
| <b>Problèmes du chapitre 3</b>                                                                   | 193 |

**A. Dynamique relativiste**

|                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Période d'un oscillateur relativiste                                    | 193 |
| 2. Accélérateur linéaire d'électrons                                       | 195 |
| 3. Force centrale. Formule de Binet relativiste. Avance du périégée        | 198 |
| 4. Composantes tangentielle et normale de la force en relativité. Bétatron | 203 |
| 5. Transformation des forces. Applications                                 | 207 |



**B. Electromagnétisme relativiste**

|                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6. Variation du rayon d'un pinceau cylindrique de protons .....          | 212 |
| 7. Transformation des densités de charge et de courant. Application .... | 215 |
| 8. Force d'interaction de deux charges. Action et réaction .....         | 220 |

**C. Transformation des champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$** 

|                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9. Champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ entre les armatures d'un condensateur plan mobile ..             | 224 |
| 10. Transformation des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ . Invariants .....                           | 228 |
| 11. Champs et potentiels d'une charge en mouvement rectiligne uniforme                            | 232 |
| 12. Conditions de parallélisme des champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ dans un référentiel mobile ..... | 237 |
| 13. Champ électromagnétique d'un conducteur rectiligne chargé .....                               | 239 |
| 14. Flux du champ électrique $\vec{E}$ créé par une charge en mouvement .....                     | 244 |

**D. Mouvement relativiste de charge****dans les champs  $\vec{E}$  et  $\vec{B}$  (\*)**

|                                                                                                             |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 15. Mouvement relativiste d'une charge dans un champ magnétique $\vec{B}$ . Applications. ....              | 248 |
| 16. Mouvement relativiste de protons dans un champ électrique $\vec{E}$ uniforme .....                      | 252 |
| 17. Accélérateur circulaire de particules : le synchrotron .....                                            | 256 |
| 18. Stabilité de phase du cyclotron. Le synchrocyclotron .....                                              | 260 |
| 19. Mouvement relativiste d'une charge dans les champs $\vec{E}$ et $\vec{B}$ uniformes et parallèles ..... | 266 |

**2. Système de  $N$  particules relativistes et référentiel barycentrique****B. Impulsion et énergie du photon. Effet Doppler**

|           |     |
|-----------|-----|
| 187. .... | 187 |
| 188. .... | 188 |
| 189. .... | 189 |
| 190. .... | 190 |
| 191. .... | 191 |
| 192. .... | 192 |
| 193. .... | 193 |

**C. Diffusion et chocs élastiques relatifs****A. Dynamique relativiste**

|                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------|-----|
| 9. Diffusion élastique symétrique .....                              | 112 |
| 10. Diffusion élastique dans le référentiel du centre de masse ..... | 114 |
| 11. Accélération d'un oscillateur harmonique .....                   | 119 |
| 12. Accélération d'un oscillateur harmonique .....                   | 123 |
| 13. Accélération d'un oscillateur harmonique .....                   | 127 |
| 14. Accélération d'un oscillateur harmonique .....                   | 132 |

(\*) Les problèmes sur les mouvements de particules chargées dans les champs électrique  $\vec{E}$  et magnétique  $\vec{B}$  en mécanique newtonienne sont traités dans l'ouvrage «Electrostatique et dynamique des particules chargées» (Dunod) du même auteur.



9 782840 741275  
RELATIVE PROBLEMES  
98042  
98009 141098  
0001

1  
4  
X  
3



ISBN 2-84074-127-X  
Code : 21270