

# **FÍSICA**

**Elementos fundamentales**

**Tomo 2**

**Campo electromagnético**

**Campo gravitatorio**

**Mario Guerra  
Juan Correa  
Ismael Núñez  
Juan Miguel Scaron**

**EDITORIAL REVERTÉ**



# FÍSICA

Elementos fundamentales

Tomo II

Campo electromagnético  
Campo gravitatorio

Mario Guerra  
Juan Correa  
Ismael Núñez  
Juan Miguel Scaron

Profesores de Física



EDITORIAL  
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · México

*Título de la obra:*

**FÍSICA: Elementos fundamentales**

**Tomo II: Campo electromagnético. Campo gravitatorio**

Copyright © Mario Guerra, Juan Correa, Ismael Núñez y Juan Miguel Scaron

*Edición en español:*

© Editorial Reverté, S. A.

Edición en papel, 1985:

ISBN 978-84-291-4309-6

Edición e-book (PDF), 2023:

ISBN 978-84-291-9072-4

**Propiedad de:**

**EDITORIAL REVERTÉ, S. A.**

Loreto, 13-15. Local B

Tel: (34) 93 419 33 36

08029 Barcelona. España

reverte@reverte.com

reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, queda rigurosamente prohibida, salvo excepción prevista en la ley. Asimismo queda prohibida la distribución de ejemplares mediante alquiler o préstamo público, la comunicación pública y la transformación de cualquier parte de esta publicación (incluido el diseño de la cubierta) sin la previa autorización de los titulares de la propiedad intelectual y de la Editorial. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual (Art. 270 y siguientes del Código Penal). El Centro Español de Derechos Reprográficos (CEDRO) vela por el respeto a los citados derechos.

# 975

# Prólogo

*El presente tomo está referido a los conceptos de Campo Electromagnético y Gravitatorio, como partes complementarias de los planteamientos iniciados en el tomo I. Se analizan aquí, con el mismo espíritu analítico del primer volumen, los conceptos básicos que fundamentan las ideas de esos temas, en un enfoque inductivo-operacional.*

*La filosofía general, entonces, no difiere de la vista en el tomo I, para lo cual se utiliza en la parte A el bagaje de conocimientos ya adquiridos sobre Relatividad Especial, como un medio de sintetizar poderosamente el modelo. En este sentido, el planteamiento que sigue difiere de lo que habitualmente se hace a nivel elemental, que consiste en presentar los campos  $\vec{E}$  y  $\vec{B}$  en forma independiente. La introducción del Principio de Relatividad permite dar una imagen física concreta y adecuada del campo magnético como un efecto relativista de las cargas móviles, con lo cual el modelo gana en solidez y plantea una importante reducción de su base de supuestos.*

*La parte B se dedica a un examen elemental del Campo Gravitatorio Clásico, y se hace una mención al Principio de Equivalencia, con lo cual se abren perspectivas para un futuro tomo que se refiera a aspectos de la Relativización de la Gravitación.*

*Deseamos profundamente, que el análisis de fundamentos que sigue sea de utilidad para docentes y alumnos, y contribuya a afianzar el panorama de estos temas, en el amplísimo campo de la disciplina.*

M. R. GUERRA — J. R. CORREA



# Índice analítico

## PARTE A

### CAPÍTULO 1

|                                                                                 |          |
|---------------------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Carga eléctrica</b> .....                                                    | <b>1</b> |
| Introducción .....                                                              | 1        |
| A. Experiencias fundamentales .....                                             | 1        |
| I. El electroscope .....                                                        | 3        |
| II. Comportamiento de los cuerpos frotados .....                                | 3        |
| III. La carga eléctrica como magnitud .....                                     | 4        |
| a) Los estados de electrización constituyen un orden .....                      | 8        |
| b) Calibración del electroscope: el electrómetro .....                          | 13       |
| c) Regla de composición de las cargas eléctricas .....                          | 15       |
| B. Los principios fundamentales .....                                           | 19       |
| I. Simetría .....                                                               | 19       |
| II. Conservación local .....                                                    | 23       |
| III. Anticonjugación de la carga eléctrica - Principio de Dirac-Rosenfeld ..... | 26       |
| IV. Cuantificación de la carga .....                                            | 28       |
| V. Invarianza .....                                                             | 30       |
| C. La generación de excesos de carga por inducción .....                        | 32       |

### CAPÍTULO 2

|                                                                                              |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Una descripción de la interacción entre cargas. Ley de Coulomb</b> .....                  | <b>35</b> |
| Introducción .....                                                                           | 35        |
| A. La ley de Coulomb (1736-1806) .....                                                       | 35        |
| I. Una experiencia fundamental. Inducción de la ley para medios isótropos y homogéneos ..... | 35        |
| B. Examen de la ley de Coulomb .....                                                         | 41        |
| I. La dependencia de la carga .....                                                          | 41        |
| II. La ley de Coulomb y la medición de la carga eléctrica .....                              | 42        |
| III. El problema del exponente en la ley de Coulomb .....                                    | 44        |
| IV. Los principios de superposición e independencia para las fuerzas coulombianas .....      | 45        |
| V. La ley de Coulomb y la acción a distancia .....                                           | 48        |
| VI. Las características físicas de la interacción .....                                      | 49        |
| 1. La ley de Coulomb y la homogeneidad e isotropía del espacio .....                         | 49        |
| 2. Descripción de la interacción en un campo de interacción .....                            | 50        |
| C. ¿Es completa la ley de Coulomb? Comentarios finales y aplicaciones directas .....         | 53        |

|                                                                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>CAPÍTULO 3</b>                                                                                         |           |
| <b>Otra descripción de la interacción entre cargas en reposo y en vacío . . . . .</b>                     | <b>67</b> |
| Introducción . . . . .                                                                                    | 67        |
| A. La noción de campo eléctrico para cargas en reposo . . . . .                                           | 70        |
| I. Definición del concepto . . . . .                                                                      | 70        |
| II. Determinación del campo eléctrico en algunas distribuciones particulares                              | 73        |
| a) Campo de una carga puntual . . . . .                                                                   | 73        |
| b) Campo de un alambre recto, de gran longitud cargado homogéneamente . . . . .                           | 76        |
| c) Campo de un anillo uniformemente cargado en puntos de su eje ortogonal de simetría . . . . .           | 78        |
| III. El principio de superposición . . . . .                                                              | 78        |
| Campo eléctrico de un dipolo . . . . .                                                                    | 80        |
| IV. Representaciones esquemáticas del campo eléctrico . . . . .                                           | 82        |
| a) Diagrama de vectores . . . . .                                                                         | 82        |
| b) Diagrama de líneas de campo . . . . .                                                                  | 82        |
| V. La descripción en términos de campo eléctrico y de causalidad . . . . .                                | 85        |
| B. Ley de Gauss . . . . .                                                                                 | 89        |
| I. La noción de flujo de campo $\vec{E}$ . . . . .                                                        | 90        |
| II. Ley de Gauss para cargas puntuales . . . . .                                                          | 93        |
| a) Enunciado de la ley . . . . .                                                                          | 94        |
| b) Primera generalización . . . . .                                                                       | 96        |
| c) Segunda generalización . . . . .                                                                       | 97        |
| d) Tercera generalización . . . . .                                                                       | 98        |
| e) Cuarta generalización . . . . .                                                                        | 100       |
| III. El teorema de Earnshaw . . . . .                                                                     | 103       |
| IV. Ley de Gauss para distribuciones de carga . . . . .                                                   | 104       |
| a) Distribuciones continuas de carga . . . . .                                                            | 104       |
| b) Aplicaciones concretas . . . . .                                                                       | 105       |
| V. Algunas propiedades de los cuerpos metálicos macizos o con cavidades                                   | 111       |
| a) La carga electrostática de un cuerpo metálico se distribuye por su superficie . . . . .                | 112       |
| b) Un razonamiento físicamente erróneo . . . . .                                                          | 113       |
| c) Campo eléctrico en puntos cercanos a un cuerpo metálico cargado                                        | 114       |
| VI. Una precisión sobre el Principio de Superposición para campos eléctricos                              | 115       |
| VII. El problema de Neumann - Teorema de unicidad . . . . .                                               | 116       |
| C. Potencial electrostático . . . . .                                                                     | 119       |
| I. La circulación del campo eléctrico en un camino cerrado . . . . .                                      | 119       |
| II. Independencia del camino - Función potencial electrostático . . . . .                                 | 123       |
| III. Gradiente de potencial . . . . .                                                                     | 133       |
| IV. Potencial eléctrico de un alambre muy largo de carga uniforme . . . . .                               | 135       |
| V. Campo eléctrico y potencial en el interior de un cuerpo metálico . . . . .                             | 138       |
| VI. El teorema de unicidad (problema de Neumann). Blindaje electrostático                                 | 141       |
| a) El teorema de unicidad . . . . .                                                                       | 141       |
| b) Blindaje electrostático. Efecto de apantallamiento . . . . .                                           | 142       |
| VII. Aplicaciones de interés . . . . .                                                                    | 145       |
| a) Potencial de una esfera hueca con carga uniforme superficial . . . . .                                 | 145       |
| b) Potencial de una distribución esférica de carga con densidad uniforme                                  | 146       |
| c) Potencial creado por una distribución superficial cilíndrica de carga                                  | 147       |
| VIII. Relación entre cargas y potenciales en un sistema de cuerpos electrizados y en equilibrio . . . . . | 148       |
| a) La linealidad entre cargas y potenciales respecto a una envoltura . . . . .                            | 148       |
| b) Propiedades de los coeficientes de capacidad . . . . .                                                 | 150       |

|                                                                                                                                      |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| D. Trabajo electrostático - Energía de formación .....                                                                               | 154        |
| I. Trabajo electrostático .....                                                                                                      | 154        |
| a) La definición .....                                                                                                               | 154        |
| b) El teorema de la energía .....                                                                                                    | 155        |
| II. Energía de formación de una configuración de cargas puntuales ....                                                               | 157        |
| <b>CAPÍTULO 4</b>                                                                                                                    |            |
| <b>Campo eléctrico de cargas móviles .....</b>                                                                                       | <b>169</b> |
| Introducción .....                                                                                                                   | 169        |
| A. Medición de la carga eléctrica móvil .....                                                                                        | 172        |
| I. Ampliación del concepto de campo eléctrico .....                                                                                  | 172        |
| II. Principio de superposición para cargas móviles .....                                                                             | 174        |
| III. Definición de la medida de una carga en movimiento. Ley de Gauss para<br>cargas móviles .....                                   | 175        |
| IV. Otras consideraciones .....                                                                                                      | 179        |
| B. Campo eléctrico en diversas situaciones .....                                                                                     | 180        |
| I. Campo eléctrico de una carga puntual móvil .....                                                                                  | 184        |
| II. Campo creado por una placa plana uniformemente cargada .....                                                                     | 190        |
| III. Acción del campo electrostático de una distribución estacionaria sobre<br>una carga móvil .....                                 | 193        |
| IV. La interacción de una carga móvil con una distribución móvil .....                                                               | 195        |
| <b>CAPÍTULO 5</b>                                                                                                                    |            |
| <b>El campo magnético .....</b>                                                                                                      | <b>207</b> |
| Introducción .....                                                                                                                   | 207        |
| A. Definición del campo magnético. La ley de Lorentz .....                                                                           | 208        |
| I. Definición de campo magnético .....                                                                                               | 208        |
| II. Propiedades de $\vec{B}$ .....                                                                                                   | 212        |
| a) ¿El campo $\vec{B}$ se representa por un vector? .....                                                                            | 212        |
| b) Los principios de superposición e independencia .....                                                                             | 214        |
| B. La transformación relativista de los campos. Campo electromagnético ....                                                          | 218        |
| I. La transformación relativista de los campos .....                                                                                 | 218        |
| II. El campo electromagnético .....                                                                                                  | 224        |
| III. Campos de una carga puntual en movimiento. Ley de Biot .....                                                                    | 226        |
| IV. Algunas conclusiones de importancia .....                                                                                        | 232        |
| a) Un examen de las cantidades $(E^2 - c^2 B^2)$ y $(\vec{E} \cdot \vec{B})$ .....                                                   | 232        |
| b) Generalización de la transformación del campo electromagnético ...                                                                | 233        |
| c) El campo electromagnético de una línea de cargas móviles ....                                                                     | 233        |
| d) Interacción de dos corrientes paralelas elementales. Orden relativista<br>de los efectos magnéticos frente a los eléctricos ..... | 236        |
| V. Interacción entre dos corrientes paralelas y rectilíneas. Definición del<br>amperio internacional .....                           | 237        |
| C. La ley de Ampère. Primera versión para corrientes estacionarias .....                                                             | 239        |
| I. La ley de Ampère para una corriente rectilínea y constante. Generaliza-<br>ción a unas corrientes rectilíneas .....               | 240        |
| II. Precisiones sobre la ley de Ampère .....                                                                                         | 246        |
| a) Generalización de la ley de Ampère .....                                                                                          | 246        |
| b) Aplicaciones de la ley de Ampère .....                                                                                            | 248        |
| III. ¿Una violación del principio de Relatividad? .....                                                                              | 255        |
| IV. ¿Hay puntos fuente o sumidero de campo magnético? .....                                                                          | 256        |
| V. Un problema interesante .....                                                                                                     | 258        |
| VI. Trabajo mecánico realizado sobre una espira recorrida por corriente<br>por un campo magnético .....                              | 259        |

|                                                                                                                        |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| VII. Consecuencias de la ley de Lorentz .....                                                                          | 261        |
| a) El principio de interacción entre dos cargas móviles .....                                                          | 261        |
| b) El trabajo mecánico de la fuerza de Lorentz .....                                                                   | 263        |
| <b>CAPÍTULO 6</b>                                                                                                      |            |
| <b>Elementos de electrocinética (1.ª parte) .....</b>                                                                  | <b>265</b> |
| Introducción .....                                                                                                     | 265        |
| A. Vector densidad de corriente .....                                                                                  | 266        |
| I. Definición del vector $\vec{J}$ . Concepto de intensidad de corriente .....                                         | 266        |
| II. Concepto de divergencia .....                                                                                      | 269        |
| a) Definición .....                                                                                                    | 269        |
| b) Significado físico de la divergencia .....                                                                          | 270        |
| c) La divergencia del campo electrostático $\vec{E}$ .....                                                             | 271        |
| d) La divergencia del campo magnético $\vec{B}$ .....                                                                  | 272        |
| B. La ecuación de continuidad .....                                                                                    | 273        |
| I. Deducción de la ecuación .....                                                                                      | 273        |
| II. Caso particular. Corrientes estacionarias .....                                                                    | 274        |
| III. Cambio de sistema de referencia $\vec{J}$ . El cuadvectores densidad de corriente, densidad cúbica de carga ..... | 274        |
| C. Concepto de fuerza electromotriz .....                                                                              | 279        |
| I. Examen del movimiento uniforme de una barra cargada en un campo magnético .....                                     | 280        |
| a) Concepto de campo electromotor .....                                                                                | 280        |
| b) Concepto de fuerza electromotriz - Generador abierto estacionario .....                                             | 281        |
| c) ¿Cómo se interpreta la fuerza electromotriz? .....                                                                  | 282        |
| II. Generador cerrado y estacionario .....                                                                             | 285        |
| III. Las diferencias de potenciales en bornes .....                                                                    | 288        |
| D. Ley de Ohm - Primera versión .....                                                                                  | 292        |
| I. La magnitud intensidad de corriente .....                                                                           | 293        |
| Regla de la igualdad de dos intensidades de corriente .....                                                            | 293        |
| II. Inducciones a las leyes de Joule y Ohm .....                                                                       | 295        |
| a) Ley de Joule .....                                                                                                  | 295        |
| b) Ley de Ohm .....                                                                                                    | 298        |
| c) El generador óhmico .....                                                                                           | 299        |
| <b>CAPÍTULO 7</b>                                                                                                      |            |
| <b>La ley de Faraday .....</b>                                                                                         | <b>303</b> |
| Introducción .....                                                                                                     | 303        |
| A. Algunos datos históricos .....                                                                                      | 304        |
| I. El experimento de Oersted .....                                                                                     | 304        |
| II. Antes del descubrimiento de Faraday .....                                                                          | 305        |
| III. Esquema del trabajo de Faraday en el tema inducción .....                                                         | 307        |
| IV. Una interpretación fundamental .....                                                                               | 308        |
| B. Las experiencias básicas .....                                                                                      | 310        |
| I. ¿Cómo lograr una corriente transitoria? .....                                                                       | 310        |
| II. Algunas conclusiones experimentales .....                                                                          | 311        |
| C. Ley de Faraday-Lenz .....                                                                                           | 316        |
| I. La ley de Faraday .....                                                                                             | 316        |
| II. La ley de Lenz .....                                                                                               | 322        |
| a) Los hechos experimentales .....                                                                                     | 323        |
| b) ¿Qué significa la ley de Lenz? .....                                                                                | 323        |
| III. La ley de Faraday-Lenz .....                                                                                      | 326        |
| a) ¿Cómo se expresa la ley de Faraday? .....                                                                           | 326        |

|                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------|-----|
| b) ¿Tiene excepciones la ley de Faraday en términos de flujo? . . . . . | 328 |
| c) ¿Es una invariante relativista la ley de Faraday-Lenz? . . . . .     | 331 |

## CAPÍTULO 8

|                                                                                                                                        |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Examen elemental de las ecuaciones de Maxwell en el vacío . . . . .</b>                                                             | <b>333</b> |
| Introducción . . . . .                                                                                                                 | 333        |
| A. ¿Es completo el sistema de leyes M? . . . . .                                                                                       | 336        |
| B. La solución de Maxwell. La ley de Maxwell-Ampère . . . . .                                                                          | 342        |
| I. Corrientes de desplazamiento . . . . .                                                                                              | 342        |
| II. Solución de Maxwell a las situaciones 1 y 2 . . . . .                                                                              | 344        |
| III. La ley de Maxwell-Ampère . . . . .                                                                                                | 346        |
| C. Expresión local de la ley de Maxwell-Ampère . . . . .                                                                               | 348        |
| I. Definición de rotacional - Campos irrotacionales . . . . .                                                                          | 349        |
| II. El teorema de Stokes (1819-1903) . . . . .                                                                                         | 350        |
| III. La expresión local de la ley de Maxwell-Ampère . . . . .                                                                          | 352        |
| D. Expresión local de la ley de Faraday-Lenz . . . . .                                                                                 | 355        |
| I. Un planteamiento analógico . . . . .                                                                                                | 355        |
| II. Una consideración física . . . . .                                                                                                 | 359        |
| a) Examen de flujo de campo $\vec{B}$ a través de una esfera fija . . . . .                                                            | 359        |
| b) Examen del flujo de campo $\vec{B}$ a través de una esfera que se traslada y/o deforma . . . . .                                    | 360        |
| E. Forma local de las ecuaciones de Maxwell en el vacío . . . . .                                                                      | 363        |
| I. ¿Son completas las ecuaciones de Maxwell? . . . . .                                                                                 | 363        |
| II. Las expresiones de la divergencia y el rotacional en cartesianas . . . . .                                                         | 365        |
| III. Las ecuaciones de Maxwell y los estados estacionarios . . . . .                                                                   | 367        |
| a) Cuestiones generales . . . . .                                                                                                      | 367        |
| b) ¿Determinan las ecuaciones de Maxwell los campos $\vec{E}$ y $\vec{B}$ ? . . . .                                                    | 369        |
| IV. Las ecuaciones de Maxwell y los estados no estacionarios. Potenciales retardados . . . . .                                         | 371        |
| V. Nuevas precisiones sobre la ley de Maxwell-Faraday . . . . .                                                                        | 375        |
| a) Corrientes inducidas y relatividad . . . . .                                                                                        | 375        |
| F. Energía electromagnética. Vector de Poynting . . . . .                                                                              | 376        |
| I. Definición del vector de Poynting . . . . .                                                                                         | 376        |
| II. Noción de densidad espacial de energía electromagnética . . . . .                                                                  | 378        |
| III. Energía radiante . . . . .                                                                                                        | 382        |
| G. La invarianza relativista de las ecuaciones de Maxwell . . . . .                                                                    | 383        |
| I. ¿La invarianza relativista de las ecuaciones de Maxwell está implícita o no en las ecuaciones de transformación de campo? . . . . . | 384        |
| II. Transformación del rotacional y la divergencia de un referencial inercial a otro . . . . .                                         | 385        |
| a) Invarianza de la ley de Maxwell-Faraday . . . . .                                                                                   | 386        |
| b) Invariaciones de la ley de Maxwell-Ampère . . . . .                                                                                 | 388        |
| c) Invarianza de la ley de Gauss para el campo eléctrico . . . . .                                                                     | 391        |
| d) Invarianza de la ley de Gauss para el campo magnético . . . . .                                                                     | 393        |

## PARTE B

### CAPÍTULO 1

|                                                                |            |
|----------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Los conceptos de masa inercial y gravitatoria . . . . .</b> | <b>397</b> |
| Introducción . . . . .                                         | 397        |
| A. Las «experiencias» básicas . . . . .                        | 398        |
| I. Graduación de un resorte . . . . .                          | 398        |

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| II. Otra propiedad de la materia. La atracción gravitatoria .....        | 400        |
| a) Cualidades del fenómeno .....                                         | 400        |
| b) Examen cuantitativo de la interacción. Masa gravitatoria .....        | 401        |
| c) Propiedades de la masa gravitatoria como magnitud .....               | 404        |
| <br><b>CAPÍTULO 2</b>                                                    |            |
| <b>Campo gravitatorio .....</b>                                          | <b>409</b> |
| Introducción .....                                                       | 409        |
| A. El concepto de campo gravitatorio .....                               | 410        |
| I. Definición .....                                                      | 410        |
| II. El principio de superposición en la descripción clásica .....        | 411        |
| B. El campo de una masa gravitatoria puntual .....                       | 412        |
| I. Las leyes de Kepler .....                                             | 413        |
| II. La masa puntual. Ley universal de Newton .....                       | 415        |
| III. El movimiento de la Luna. Relativización de la gravitación .....    | 417        |
| a) Una propiedad asombrosa .....                                         | 417        |
| b) El supuesto de Newton. El movimiento de caída de la Luna ....         | 418        |
| C. El campo gravitatorio de otras distribuciones .....                   | 419        |
| I. Ley de Gauss .....                                                    | 420        |
| II. Campo gravitatorio de una esfera homogénea y maciza .....            | 420        |
| D. Otras propiedades del campo gravitatorio .....                        | 422        |
| I. Energía potencial gravitatoria de formación .....                     | 422        |
| II. Velocidad de escape .....                                            | 423        |
| III. Un problema interesante .....                                       | 425        |
| a) La partícula se halla a distancia $r < R$ .....                       | 425        |
| <br><b>CAPÍTULO 3</b>                                                    |            |
| <b>El principio de equivalencia .....</b>                                | <b>429</b> |
| Introducción .....                                                       | 429        |
| A. Las fuerzas complementarias en el modelo clásico no relativista ..... | 430        |
| I. La interpretación de Newton. Sus inconvenientes .....                 | 430        |
| II. Crítica de la posición de Newton .....                               | 432        |
| B. El principio de equivalencia .....                                    | 434        |
| I. Examen elemental del mismo .....                                      | 434        |
| II. Consecuencias inmediatas .....                                       | 436        |
| a) Eliminación del campo gravitatorio .....                              | 436        |
| b) El principio de Equivalencia y la geometría física .....              | 437        |
| C. Fuerza gravitatoria y órbita .....                                    | 439        |
| I. Ecuación de la trayectoria .....                                      | 439        |
| II. Examen de la función $r(\theta)$ .....                               | 447        |
| III. Las leyes de Kepler .....                                           | 451        |
| <br><b>Índice alfabético .....</b>                                       | <b>455</b> |

# Parte A

Interacción entre cargas

Campo eléctrico

Campo magnético

Ecuaciones de campo electromagnético



# Capítulo 1

## Carga eléctrica

«Jamás debe afirmarse que las tesis obtenidas por la formulación racional, son las únicas premisas posibles del raciocinio humano.»

[Immanuel Kant (1724-1804)  
«Correspondencia»]

### INTRODUCCIÓN

Actualmente, la Física reconoce cuatro tipos básicos de interacciones. Éstas son ordenables según dos criterios diferentes: *a)* por su intensidad; *b)* por su radio de acción. Eligiendo el primer criterio mencionado, y en orden decreciente, estas interacciones se ordenan así:

1. Interacción nuclear (o fuerte o *piónica*).
2. Interacción electromagnética (o *fotónica*).
3. Interacción débil (o *leptónica*).
4. Interacción gravitatoria (posiblemente *gravitónica*).

Esta ordenación requiere algunas aclaraciones. En primer lugar, si se elige la interacción *nuclear* como unidad de comparación, las restantes quedan asociadas a los órdenes de magnitud  $10^{-2}$ ,  $10^{-14}$  y  $10^{-40}$ , *respectivamente*. En segundo lugar, cada una de las interacciones básicas de la Naturaleza, parece estar asociada a determinado «mecanismo» de funcionamiento, llamado de «intercambio». ¿A qué se refiere esta palabra? Se refiere a que si dos porciones de materia interactúan por alguno de los mecanismos del ordenamiento anterior, existe una *partícula característica* (partícula elemental) de cada uno de ellos, que es intercambiada por las porciones de materia interactuantes.

● En el caso de la interacción nuclear, las partículas subnucleares interactúan y se mantienen unidas por intercambio de partículas elementales, llamadas genéricamente «piones», las cuales se presentan en *tres* variedades. Estas variedades reciben el nombre de «pión neutro», «pión negativo» y «pión positivo», respectivamente. Por el momento, esto son nombres. Aunque más adelante volveremos sobre esta cuestión, en otro tomo de esta colección, digamos que estas partículas son caracterizables por atributos físicos «normales». Mencionaremos a modo de ejemplo, las masas en reposo de estas partículas responsa-

bles de la interacción nuclear. El pión neutro dispone de una masa en reposo de 264,3 veces la masa en reposo del electrón. Por su lado, los piones positivos y negativos, disponen de masas en reposo iguales entre sí y de valor 273,1 veces la masa en reposo del electrón. ¿Con qué precisión están dados estos datos? En el caso del pión neutro, la medida tiene una precisión de  $3,8 \times 10^{-4}$ ; en el caso de los piones positivo y negativo de  $3,7 \times 10^{-4}$ .

- Las interacciones electromagnéticas, que serán el objeto del análisis de este tomo, responden también a un mecanismo de «interacción de intercambio». Aquí, la partícula responsable se llama «fotón». En el tomo I hemos mencionado a esta partícula elemental como individualidad constituyente de *la luz*. Tiene una notable propiedad: su masa en reposo es nula y en cada medio viaja con velocidad impropia igual a la de la luz en ese medio.

Dentro de la familia de interacciones electromagnéticas, cuyo radio de acción no parece tener límite superior, existe una subfamilia de interés particular, genéricamente llamadas «interacciones electrostáticas» cuyo *límite inferior* de acción se extiende hasta el orden de  $10^{-13}$  m, según muestra la experiencia. Más adelante, volveremos sobre esta cuestión.

- Las llamadas «partículas elementales» se clasifican en ciertas «familias», según criterios a los cuales hemos de referirnos en otro lugar. Una de estas familias se denomina «leptones». Pertenecen a ella los electrones, los neutrinos y los mesones  $\mu$ . Existen algunos fenómenos, en los que estas partículas intervienen, que nuestro estado actual de conocimientos explica atribuyendo los procesos a la participación de una clase especial de fuerzas llamadas «débiles», y que como dijimos son del orden de  $10^{-14}$  veces más débiles que las nucleares. En realidad, con el nombre de «interacción débil» se agrupan muy probablemente *más* de un tipo de interacción (tal vez *dos*). Es una evidencia empírica, que en todos los procesos donde *intervienen* leptones, generalmente de desintegración, el tiempo es muy largo para el fenómeno. «Muy largo» significa por ejemplo del orden de  $10^{-8}$  segundos. Ahora bien: *existen* procesos que *también* se responsabilizan a la intervención de fuerzas débiles y en los cuales NO participan leptones. Un ejemplo de esto es la descomposición de la partícula  $\Lambda^0$  (hiperón) en un protón y un «pion negativo», según el esquema que sigue:



Esta descomposición tiene una vida de  $2,6 \times 10^{-10}$  segundos, que respecto al orden de  $10^{-8}$  segundos, es ANORMALMENTE larga. No obstante, se considera que el proceso (1) responde a la intervención de una *fuerza débil*, aunque el fenómeno NO es de naturaleza leptónica.

- Para finalizar este somero planteamiento, debemos referirnos a la última clase de interacciones conocidas. Se llaman «gravitatorias». Son las interacciones más débiles conocidas. Estas interacciones son *siempre* atractivas y se supone, sin evidencia experimental, que el mecanismo de intercambio está regido por una partícula elemental, llamada «gravitón». De existir, esta partícula deberá tener masa en reposo nula. *En este aspecto* serán análogos a los fotones. Hay otras propiedades, NO descriptibles en términos clásicos, que establecen la diferencia entre fotones y gravitones. A modo de aclaración, diremos que mientras los fotones se suponen que tienen *spin 1*, los gravitones deberán tener *spin 2*.

En lo que sigue nos referiremos a la categoría 2 de fuerzas, del ordenamiento inicialmente planteado. Para cumplir con este propósito, es necesario examinar un grupo de experimentos básicos e introductorios, con la finalidad de elaborar los fundamentos operativos del electromagnetismo. De este estudio surgirá la NECESIDAD de introducir un atributo físico de la materia sometida a esta clase de interacciones, que llamaremos CARGA ELÉCTRICA. Veremos que este atributo es una *magnitud*, y como tal directamente vinculada a un procedimiento de medición. Nuestro *MODELO* actual del electromagnetismo incluye la noción de carga eléctrica, como uno de sus elementos conceptuales básicos.

«...el significado de una idea fundamental puede expresarse por medio de un conjunto de axiomas que establezcan verdades básicas sobre la idea.»

[William Whewell (1794-1866)  
«Novum Organon Renovatum»]

## A. EXPERIENCIAS FUNDAMENTALES

En este apartado examinaremos un grupo de experimentos que fundamentan el concepto de carga eléctrica EN REPOSO respecto a un *referencial inercial R*. La elección del referencial la hemos hecho previamente, mediante experimentos mecánicos que decidan aquélla.

Veamos cómo proceder.

### I. El electroscope

¿Qué es un electroscope? Es un INSTRUMENTO que responde esencialmente al esquema de la figura 1-1. Consiste en un *frasco de vidrio*, cerrado por un tapón de goma, a través del cual pasa una barra metálica que lleva unida, en forma solidaria, una esfera también metálica que designamos con *A*. Esta esfera es de pequeñas dimensiones (p. ej., 1 cm de diámetro), frente a las demás dimensiones del dispositivo. La barra tiene en el otro extremo, ubicado en el *interior* del frasco un par de hojas de papel estañado, muy livianas (masa despreciable).

Las hojas de papel de estaño están unidas a una articulación común, con fricción despreciable, de modo que pueden disponer de un movimiento pendular, prácticamente libres.

En condiciones de operación, el dispositivo se utilizará en un ambiente de aire *muy seco*, por razones detalladas más adelante. El aire en el interior del frasco tendrá estas mismas propiedades. Obsérvese que la figura 1-1 inclu-

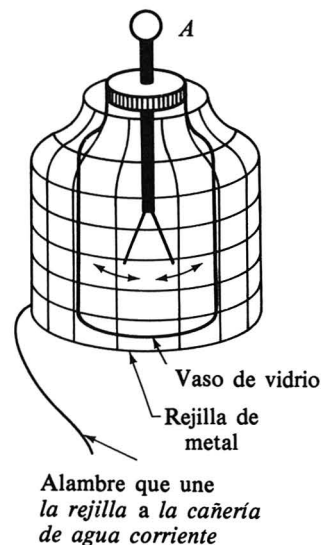
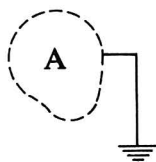


Figura 1-1



Representación convencional para indicar que el dispositivo  $A$  está unido o conectado a tierra.

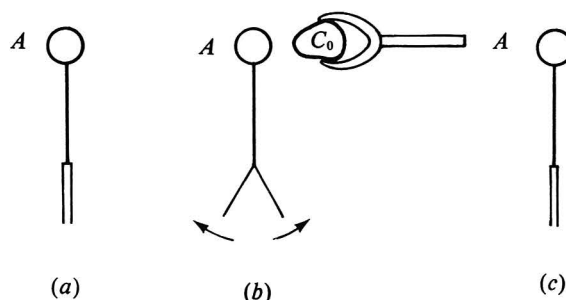
Figura 1-2

ye un detalle importante y cuyo significado será explicado en otro lugar: el frasco está *rodeado* íntegramente por una *rejilla* metálica. Esta rejilla está unida, mediante un alambre metálico, a la cañería de agua corriente (como señala la figura) o a un clavo empotrado en la pared del laboratorio. *Diremos*, sin justificar por ahora la designación, que la rejilla está colocada o conectada «a tierra». En general, cuando un alambre conecta a tierra *este* dispositivo o cualquier otro, lo señalaremos gráficamente así como indica la figura 1-2. Aquí indicamos un dispositivo cualquiera, que llamamos  $A$ , conectado «a tierra». ¿Por qué tomamos esta precaución? Lo explicaremos más adelante, pero digamos por el momento lo que sigue: el desarrollo de este capítulo se refiere a la fundamentación del concepto de «carga eléctrica» como magnitud, y el electroscopio será el dispositivo sobre el cual edificaremos el procedimiento operacional. Para que nuestro esquema tenga éxito, es necesario asegurar que la definición operativa arroje una *medida uniforme*. Es un hecho empírico, del cual podremos dar luego una explicación, que la condición de rejilla conectada a tierra asegura una medida con ese carácter. En lo que sigue supondremos que a menos que se aclare explícitamente, se cumple esa condición operativa.

## II. Comportamiento de los cuerpos frotados

Consideremos ahora una colección de cuerpos, de materiales diversos y de cualquier *forma*. Para operar con ellos, supondremos que al *asirlos*, efectuaremos la manipulación con una pinza forrada en goma o plástico. Dispondremos también de una gamuza *bien seca*, con la cual efectuaremos un intenso frotado de cada cuerpo de la colección. Una vez que los cuerpos han sido frotados, los dispondremos muy alejados entre sí, sobre una mesa de goma, plástico o madera.

Elijamos ahora uno cualquiera de los cuerpos frotados y *acercuémoslo* al cabezal  $A$  del electroscopio, SIN TOCARLO. Corroboraremos, en general, que las hojuelas DIVERGEN respecto de su posición inicial. Mientras el cuerpo que genera este efecto en el electroscopio se mantiene en las proximidades de  $A$  y en reposo respecto a esta esfera, la divergencia de las hojas *SE MANTIENE TAMBIÉN*. Cuando el cuerpo *se aleja* de  $A$ , las hojuelas caen y adquieren la configuración inicial de reposo y equilibrio. En la figura 1-3 se indican estas operaciones.



- (a) Electroscopio ANTES de acercar el cuerpo  $C_0$  previamente frotado.  
 (b) Electroscopio con el cuerpo frotado  $C_0$  colocado en su proximidad.  
 (c) Electroscopio, después de alejar el cuerpo  $C_0$ .

Figura 1-3

Una vez cumplidas las etapas señaladas en la figura 1-3, podemos acercar otra vez al cuerpo  $C_0$  al cabezal  $A$ , de forma que retome su posición anterior, indicada en la etapa (b). ¿Qué se verifica? Observamos que el dispositivo **VUELVE** a separar sus hojuelas, **EN LA MISMA FORMA** que en la operación anterior.

Cumplida esta etapa, volvemos a separar el cuerpo  $C_0$ , con lo cual, las hojuelas del electroscope vuelven a caer.

Ahora, con  $C_0$  alejado, lo **TOCAMOS** con la mano y *volvemos a acercarlo al electroscope*. ¿Qué observamos? Corroboramos que si  $C_0$  se coloca en la misma posición que en las experiencias anteriores respecto al cabezal  $A$ , *el electroscope NO SEPARA SUS HOJUELAS*.

Verificada esta observación, volvemos a frotar el cuerpo  $C_0$  y lo acercamos otra vez al electroscope, que *vuelve* a abrir sus hojas, que caen si  $C_0$  se aleja.

¿Cómo interpretamos estos hechos? Una forma posible es esta:

a) Cuando  $C_0$  es frotado, **ADQUIERE** una propiedad física que revela su existencia cuando el cuerpo se aproxima al electroscope. Esta propiedad **NO** desaparece cuando  $C_0$  se aleja y retorna, por lo cual, en principio **NO** parece depender del movimiento que ejecuta el cuerpo.

También podríamos pensar que si  $C_0$  frotado se aproxima al electroscope, «pasa» a éste alguna propiedad, la cual depende *de la posición relativa* de ambos y que cuando  $C_0$  se aleja, este cuerpo **NO** mantiene la propiedad adquirida. Este esquema, no descartable en principio, **NO** lo adoptaremos, porque el supuesto señalado en a) será **SUFICIENTE** para fundamentar nuestro concepto de carga eléctrica.

Aparte de ello, tendríamos que explicar el mecanismo por el cual  $C_0$  puede transferir una «propiedad» al electroscope. Obsérvese, no obstante, que si se frota  $C_0$  y hace diverger las hojuelas, cuando *se aleja* y las hojas del electroscope caen, **NO** tenemos *evidencia* alguna de que  $C_0$  *mantenga* la propiedad que parece tener cuando está cercano al cabezal  $A$ .

De cualquier manera, si  $C_0$  está frotado y cercano al cabezal  $A$ , debemos explicar de algún modo cómo es posible que  $C_0$  modifique el estado físico del electroscope. Nuestro modelo deberá dar una solución a esta cuestión, aunque **NO** supongamos que la propiedad adquirida por  $C_0$  por frotamiento «pase» al electroscope cuando están cercanos.

Nótese que esta suposición, con los elementos objetivos que tenemos hasta el momento, **NO** es una hipótesis antojadiza. En efecto: hay fenómenos que se explican mediante transferencias. Por ejemplo, si tenemos un cuerpo  $C_0$  a cierta temperatura y lo aproximamos al cuerpo  $A$ , es un hecho empírico que este cuerpo incrementa su temperatura, en general. Esto lo explicamos diciendo que  $C_0$  ha transferido energía en forma de calor al cuerpo  $A$ .

Aquí planteamos un modelo diferente. Afirmamos que  $C_0$  adquiere una propiedad y la mantiene y, además, la misma se evidencia cuantas veces queramos por aproximación al cabezal  $A$ . El éxito de nuestra interpretación será juzgado por los resultados que obtengamos.

b) Esta propiedad adquirida por  $C_0$  puede atribuirse *al frotamiento* que se ha efectuado al cuerpo, puesto que cuando se toca la propiedad desaparece, si bien posteriormente **REAPARECE al frotar nuevamente**.

En particular, podemos frotar el cabezal  $A$  del propio electroscope, en cuyo caso las hojuelas divergen. Si tocamos el cabezal  $A$ , las hojas volverán a

caer. Si volvemos a frotar el cabezal  $A$ , la propiedad reaparece. Aceptada esta interpretación, estamos en condiciones de continuar con nuestras experiencias.

Supongamos ahora que nuestros cuerpos  $C_0, C_1, C_2, \dots, C_n$ , de diversos materiales, son pequeñas esferas de, p. ej., 0,3 cm de diámetro.

Imaginemos ahora que se cuelga cada cuerpo  $C_i$  mediante un hilo largo, de nylon.

Es un hecho corroborable que si las experiencias que describimos antes con el cuerpo  $C_0$  se realizan con cualquier otro cuerpo de la colección  $C_i$ , se reproducen los resultados cualitativos. Este hecho nos lleva a pensar que el comportamiento observado en el electroscopio proviene de «algún» elemento común a todos los cuerpos de la colección. Lo observado, cualitativamente considerado, no es un fenómeno particular o específico de  $C_0$ , sino de cualquier cuerpo de cualquier naturaleza.

Seguidamente, TOCAMOS todos los cuerpos de la colección con la mano. Si cada cuerpo lo acercamos ahora al electroscopio, éste *NO SE PERTURBARÁ*. Ahora bien: consideremos ahora otro cuerpo  $C_j$  colgado de un hilo de nylon, análogo al utilizado para colgar el cuerpo  $C_i$ . Supongamos que  $C_i$  y  $C_j$ , previamente tocados, cuelgan como se indica en la figura 1-4. Corroboramos ahora que cualesquiera sean los cuerpos  $C_i$  y  $C_j$  de la colección, los péndulos *NO se separan* de su posición de equilibrio estable para cualquier valor de la distancia « $a$ » indicada en la figura 1-4.

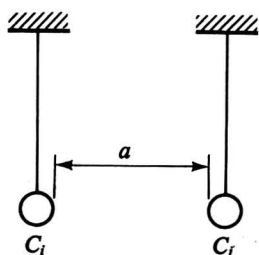
Alejemos otra vez los péndulos  $C_i$  y  $C_j$ . Frotemos los cuerpos  $C_i$  y  $C_j$  para todo valor de « $i$ » y « $j$ ».

Volvamos a considerar ahora el cuerpo  $C_0$ , utilizado en nuestras experiencias iniciales. Si ahora acercamos otro cuerpo de la colección a él, observamos que los péndulos formados por  $C_0$  y el cuerpo acercado se *separan de la vertical* (posición de equilibrio estable). Es un hecho corroborable que *NO* todos los péndulos colocados inicialmente en forma vertical se separan del mismo modo. Hay cuerpos de la colección que se *acercan* a  $C_0$ , mientras que otros se *alejan* de  $C_0$ . Esto se indica en las figuras 1-5a y 1-5b. Si repetimos la operación con los DEMÁS cuerpos de la colección, observamos que *RESPECTO al cuerpo  $C_0$* , podemos efectuar una clasificación: una categoría está formada por todos los cuerpos que frente a  $C_0$  se *comportan* como  $C_i$ ; la categoría restante incluye a los demás y se comportan, los de esta clase, como  $C_j$ . Podemos llamar *A* y *B* a estas categorías.

Es un hecho empírico que esta categorización AGOTA a todos los cuerpos existentes en la colección, de modo que si cualquier cuerpo se frota, al acercarlo al péndulo formado con  $C_0$ , queda incluido en la clase *A* o en la *B*.

Ahora bien: definidas las categorías *A* y *B*, relativas al cuerpo  $C_0$ , podemos tomar dos cuerpos de la misma clase, construir con ellos sendos péndulos y repetir nuestros experimentos. ¿Qué observamos? Concluimos con carácter general que dos cuerpos frotados, pertenecientes a la misma clase (*A* o *B*), EN TODOS LOS CASOS adoptan el esquema de la figura 1-5b. En cambio, si tomamos un cuerpo cualquiera de la clase *A* y otro cuerpo de clase *B*, en todos los casos adoptan la posición indicada en 1-5a.

Brevemente: todos los cuerpos frotados y pertenecientes a la MISMA CLASE se repelen, mientras que todos los cuerpos frotados y pertenecientes a CLASES DIFERENTES, se atraen.



Los péndulos  $C_i$  y  $C_j$ , previamente TOCADOS con la mano, se colocan verticales estén cercanos o no.

Figura 1-4

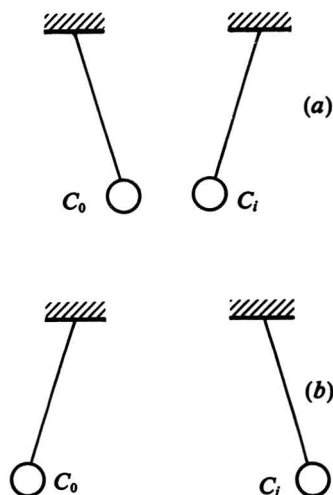


Figura 1-5

La categorización AGOTA a todos los cuerpos de nuestra colección, puesto que el propio cuerpo  $C_0$  PUEDE incluirse en la categoría  $B$ , por ejemplo.

Las experiencias anteriormente detalladas nos habilitan a dar esta

#### DEFINICIÓN:

Cuando se frota un cuerpo cualquiera, adquiere CARACTERÍSTICAS observables en su comportamiento detalladas en las experiencias anteriormente descritas, que resumiremos diciendo que ha adquirido la propiedad de *electrización* o también que se ha CARGADO ELÉCTRICAMENTE por frotamiento.

Supongamos que frotamos todos los cuerpos existentes a nuestro alcance. Entre ellos estará incluido el VIDRIO, el cual quedará en una de las clases que hemos llamado  $A$  y  $B$ .

#### DEFINICIÓN:

Llamaremos categoría de los cuerpos cargados eléctricamente en forma POSITIVA, a aquella clase de cuerpos frotados que INCLUYE al vidrio entre sus miembros. Por exclusión, los cuerpos que *frotados*, NO pertenecen a esa clase, diremos que están cargados eléctricamente en forma NEGATIVA.

Esta definición nos aclara que las designaciones «POSITIVA» y «NEGATIVA» para las categorías, son CONVENCIONALES. No hay nada en ellas que sea «positivo» o «negativo». Éstos son adjetivos que utilizamos para distinguir una categoría de otra, y la distinción radica en que *una* de ellas incluye al vidrio, mientras que la otra no lo incluye. Éste es el ÚNICO distintivo de ambas clases.

Hasta el momento, lo que hemos logrado son *dos clases* de cuerpos, tales que los de *una* clase (frotados) se repelen y los de clases *distintas* (frotados) se atraen y además se ha dado un nombre convencional a cada clase.

Por extensión del lenguaje, diremos que los cuerpos que pertenecen a la categoría en la cual se incluye el vidrio frotado, están «cargadas POSITIVAMENTE» o que tienen «carga positiva». Más adelante precisaremos esta afirmación, estableciendo *con RIGOR* que el cuerpo frotado lo que ha adquirido es un EXCESO de carga positiva.

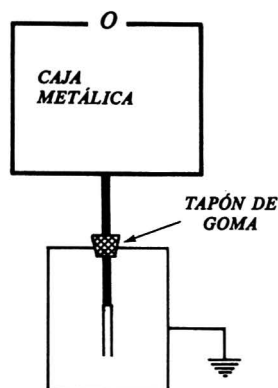
Los cuerpos de la otra clase diremos que han adquirido un EXCESO de carga negativa. El fundamento de estas expresiones lo veremos después.

Todo lo visto se incluye dentro de un esquema estrictamente cualitativo.

Nos preguntamos ahora: esta propiedad que hemos llamado «electrización por frotamiento» ¿es sólo cualitativa o es medible? En otros términos: la carga eléctrica, esa propiedad que adquieren los cuerpos al ser frotados, ¿es o no una magnitud? Si es una magnitud, entonces los «estados de electrización serán cuantificables. Veamos entonces esta cuestión crucial.

### III. La carga eléctrica como magnitud

Para ver que la «carga eléctrica» es una magnitud o, con más precisión, que los estados de electrización son manifestaciones cuantificables de una magnitud, debemos elaborar el *procedimiento de medición*. Ya disponemos, en principio, de un dispositivo para «denunciar» los estados de electrización. Pero aún este instrumento no es de medida, pues no arroja respuestas cuantitativas. Veamos cómo allanamos todos estos aspectos.



Electroscopio con caja metálica

Figura 1-6

### a) Los estados de electrización constituyen un orden

Consideremos la clase de los cuerpos cargados eléctricamente en forma *positiva*. Los designaremos así:  $C_1^+$ ,  $C_2^+$ ,  $C_3^+$ , ...,  $C_n^+$ . Vemos si es posible elaborar algún criterio que permita distinguir si la «carga eléctrica» del cuerpo  $C_i^+$  es MAYOR, MENOR o IGUAL que la del cuerpo  $C_j^+$ . Volvamos a la experiencia. En primer lugar, consideremos el dispositivo de la figura 1-6, que es una versión «corregida» del electroscopio ya utilizado. En lugar de cabezal esférico  $A$  de la figura 1-1, tenemos una caja metálica «casi cerrada», que dispone de un pequeño orificio  $O$  a través del cual es posible introducir pequeños cuerpos cargados, mediante operaciones previas. La caja metálica está unida mediante una varilla también metálica a los elementos móviles del electroscopio (hojuelas), que se hallan alojadas dentro de un recipiente de vidrio con una rejilla externa «conectada a tierra». Siguen vigentes aquí las condiciones que establecimos inicialmente acerca de la escasa humedad del aire interior y exterior del electroscopio.

Supongamos que  $C_i^+$  es una esfera de diámetro pequeño, para que pueda ser introducida por  $O$  en el *interior* de la caja metálica. Para realizar esta operación, unimos el cuerpo  $C_i^+$  a un hilo de nylon o de seda de modo que, una vez cargado, mantenga su electrización. El cuerpo  $C_i^+$  se introduce en la caja de modo que quede «totalmente rodeada» por las paredes de ésta. ¿Qué ocurre? Se observa que aunque la esfera  $C_i^+$  NO TOQUE la caja por su cara interna, *se origina la apertura de las hojas del electroscopio*. Esto se indica en la figura (b) de la 1.7. Veamos las distintas operaciones.

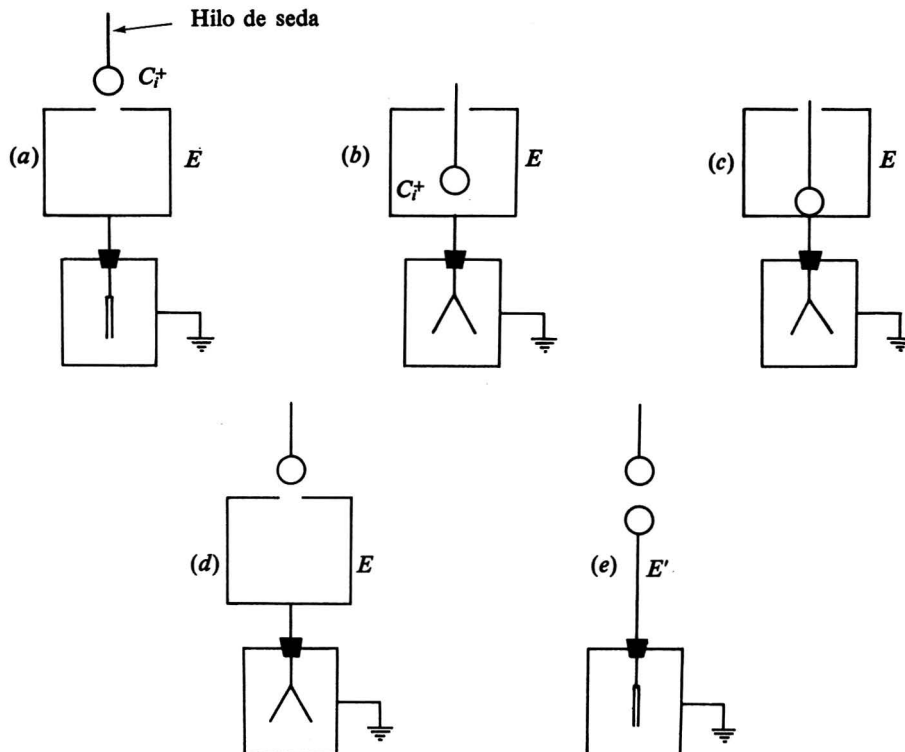


Figura 1-7

1. Comenzamos acercando el cuerpo  $C_i^+$  a un electroscopio  $E'$ , el cual indicará divergencia de sus hojas y que efectivamente el cuerpo tiene un estado de electrización. Esta operación NO ha sido indicada en la figura 1-7.

2. Seguidamente, acercamos el cuerpo  $C_i^+$  al electroscopio  $E$  y lo *introducimos* en su caja metálica. Esto se indica en las figuras 1-7a y 1-7b. Se observa que las hojas de  $E$  divergen. La divergencia lograda NO se modifica aunque  $C_i^+$  se mueva o toque en su cara interna a la caja. En cualquier caso, las hojas NO CAMBIAN SU POSICIÓN. Esto se indica en la figura 1-7c. De ahora en adelante, supondremos que cada vez que introducimos en la caja del electroscopio  $E$  un cuerpo con exceso de carga o sin ella, ANTES de retirarlo, TOCAMOS con él la cara interna de la caja. Por este motivo, NO INSISTIREMOS explícitamente en esta operación, que supondremos se ha realizado en todos los casos.

3. Posteriormente, sacamos el cuerpo  $C_i$ , con lo cual la separación de las hojas de  $E$  NO CAMBIA. Si ahora llevamos el cuerpo  $C_i$  al mismo electroscopio  $E'$ , utilizado en la operación 1, y lo ubicamos respecto a él en las mismas condiciones que cuando comenzamos el proceso, corroboraremos que *ahora*  $E'$ , NO SEPARA sus hojas. Concluimos que  $C_i$  NO tiene exceso de carga, después de haber tocado la caja hueca de  $E$ .

En cambio, el electroscopio  $E$  mantiene su divergencia, adquirida cuando se introdujo  $C_i^+$ , y aun después que este cuerpo se retiró del interior de la caja hueca. Estas cuestiones se indican en las figuras (d) y (e) de la 1.7.

#### PRIMER CRITERIO DE ORDENACIÓN DE CARGAS

La serie de operaciones anteriormente indicadas nos permiten dar un criterio para juzgar la igualdad y la desigualdad de cargas entre cuerpos de la misma clase de electrización. En efecto: dados dos cuerpos  $C_i^+$  y  $C_j^+$ , diremos que tienen IGUAL exceso de carga positiva (el criterio es el mismo si se tratara de excesos de carga negativa) si, introducidos consecutivamente en la caja del electroscopio  $E$ , la divergencia de sus hojas en ambas operaciones ES LA MISMA. Naturalmente, para que la definición de igualdad sea consistente, una vez quitado el cuerpo  $C_i$  del interior de  $E$ , es necesario TOCAR con la mano el electroscopio, de modo que sus hojas caigan totalmente para, POSTERIORMENTE, introducir el cuerpo  $C_j^+$ . En esta situación, el electroscopio volverá a separar sus hojas. Si en esta operación, la separación es la misma que cuando se introdujo  $C_i^+$ , diremos que los excesos de carga correspondientes a los estados de electrización  $C_i^+$  y  $C_j^+$ , SON IGUALES.

Análogamente, si introducimos  $C_i^+$  en  $E$  y éste separa sus hojas, lo tocamos y luego introducimos  $C_j^+$ , vuelve a separar sus hojas. Si la nueva separación obtenida en esta segunda operación ES MENOR (MAYOR) que la adquirida cuando se introdujo  $C_i^+$ , diremos que el exceso de carga de este último estado es MAYOR (MENOR) que la que corresponde al estado  $C_j^+$ .

Si la propiedad que hemos llamado «carga eléctrica» es medible, entonces será posible establecer una CORRESPONDENCIA entre los diferentes estados de electrización y números. En lo que sigue, veremos que se trata de una *magnitud escalar*. Aceptaremos momentáneamente la existencia de esta correspondencia, con la finalidad de facilitar nuestra simbología y nuestras explicaciones.

Supongamos que  $Q_i$  es el número que asociamos (por el momento en forma totalmente arbitraria) al exceso de carga de  $C_i$  en el estado  $C_i^+$  y, análoga-

mente, sea  $Q_i$  el número que corresponde al estado  $C_i^+$  del cuerpo  $C_i$ . De acuerdo con el procedimiento anteriormente detallado, es posible elegir estos números de modo que se tenga;  $Q_i = Q_j$  ó  $Q_i > Q_j$  ó  $Q_i < Q_j$ .

Como dijimos anteriormente, nos hemos referido a «cargas positivas». Es obvio sin embargo que nuestros criterios de igualdad y desigualdad siguen vigentes si procedemos a operar con estados de electrización negativa. No obstante, haremos una precisión desde ahora. En lo que sigue indicaremos los estados de electrización «positivos» con números positivos y los estados de electrización negativos con números negativos. Por este motivo, para que exista un ordenamiento entre los excesos de carga que resulte isomorfo *del que existe entre los números*, cuando también operamos con cuerpos cargados con excesos de *naturaleza negativa*, diremos que tiene MAYOR EXCESO de carga aquel estado que actuando sobre  $E$  logre MENOR divergencia de las hojas. En símbolos: si  $C_i^-$  y  $C_j^-$  son dos cuerpos con excesos de carga negativas  $Q_i$  y  $Q_j$ , diremos que  $Q_i = Q_j$  ó  $Q_i > Q_j$  ó  $Q_i < Q_j$ , según que, introducidos SUCESIVAMENTE (y en cada operación partiendo de  $E$  con sus hojas juntas)  $C_i$  y  $C_j$ , este último logre, IGUAL, MAYOR o MENOR divergencia en las hojas de  $E$  que el primero.

Obsérvese que si  $C$  es un cuerpo en cierto estado de electrización, con cierto exceso de carga, sea éste positivo o negativo, su ubicación dentro del ordenamiento NO está determinado, a menos que PREVIAMENTE dilucidemos el problema del tipo de carga; es decir, si es de la misma clase que la del vidrio o no. *El criterio anterior* presupone que sepamos de antemano *la clase* a la que pertenece el cuerpo con exceso de carga o, más precisamente, su estado de electrización.

## SEGUNDO CRITERIO DE ORDENACIÓN DE CARGAS

La pregunta es ahora: ¿existen otros criterios para definir un orden? Sí; existen. Veamos otro grupo de operaciones que también definen un ordenamiento.

Supongamos para ello un conjunto de cuerpos frotados  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ , que disponen de excesos de carga  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ . Para definir el ordenamiento, debemos conocer, por lo menos, la clase de electrización de UNO de los cuerpos con exceso de carga. Imaginemos que  $Q_1$  es el número (positivo) asociado a un exceso de carga positiva, que reconocemos por repulsión con una esferita de vidrio frotado.

Comenzamos ubicando el cuerpo  $C_1$ , al que asignamos el número  $Q_1$ , en el interior de la caja del electroscopio  $E$ . Las hojas de éste divergerán. Suponemos, como siempre, que  $E$  partió de un estado en el cual las hojas estaban caídas. Retiramos luego el cuerpo  $C_1$  del interior de  $E$ . Seguidamente, introducimos el cuerpo  $C_2$  con un estado de carga asociado al número  $Q_2$ , *sin tocar el electroscopio con la mano*.

La experiencia revela que pueden ocurrir cuatro situaciones bien definidas:

1. Al introducir  $Q_2$ , *AUMENTA* la divergencia de las hojas de  $E$ . En este caso, interpretamos la situación por analogía con lo que sucede con  $Q_1$ , estableciendo que  $Q_2$  es del mismo carácter (la misma clase de electrización) que  $Q_1$ . Seguidamente, sin tocar el electroscopio con la mano, retiramos el cuerpo  $Q_2$ , tocamos el dispositivo  $E$  e introducimos nuevamente el cuerpo

de carga  $Q_2$  y tocamos la cara interna del dispositivo. Las hojas de  $E$  divergerán y podremos comparar esta divergencia con la provocada inicialmente por  $Q_1$ . Si la divergencia obtenida en la segunda operación (introducción de  $Q_2$ ) es IGUAL, MAYOR o MENOR que la lograda al introducir  $Q_1$ , diremos que:  $Q_2 = Q_1$ ;  $Q_2 > Q_1$  ó  $Q_2 < Q_1$ , respectivamente.

2. Las hojas de  $E$  caen PARCIALMENTE, *sin llegar a UNIRSE*, cuando introducimos  $Q_2$ . Interpretamos este hecho así: el cuerpo de carga en exceso  $Q_2$  tiene electrización de clase distinta a la que tiene el cuerpo de electrización asociada al valor  $Q_1$ . En este caso, asignamos al valor  $Q_2$  un *número negativo* y como no se logra hacer caer TOTALMENTE las hojas de  $E$ , desde el estado de divergencia logrado por  $Q_1$ , DIREMOS que el módulo de  $Q_2$  es MENOR al de  $Q_1$ . En consecuencia, a los hechos observados le asignamos este criterio de interpretación:

$$Q_2 < 0 \quad ; \quad |Q_2| < Q_1$$

3. Las hojas de  $E$  caen en forma TOTAL y NO vuelven a diverger. En este caso interpretamos que  $Q_2$  es de *clase opuesta* a la de  $Q_1$ . Como la divergencia lograda por  $Q_1$  es ANULADA al introducir  $Q_2$ , INTERPRETAMOS la situación diciendo que  $Q_2$  y  $Q_1$  son OPUESTOS. En símbolos:  $Q_2 < 0$ ;  $|Q_2| = Q_1$ .
4. Las hojas de  $E$  caen en forma TOTAL y VUELVEN a diverger. En este caso interpretamos que  $Q_2$  es de *clase opuesta* a la de  $Q_1$ . En esta situación, establecemos el criterio que el módulo de  $Q_2$  es MAYOR que el de  $Q_1$ . En símbolos:  $Q_2 < 0$ ;  $|Q_2| > Q_1$ .

Las operaciones indicadas anteriormente definen un ORDEN entre los estados de electrización de los cuerpos frotados. Los dos criterios definen EL MISMO orden, lo cual es un hecho empírico, con lo que establecemos que los procedimientos son *físicamente consistentes*.

La figura 1-8 ilustra los cuatro casos a los que hace referencia el segundo criterio que hemos establecido. En la 1-8a se ha supuesto la situación del electroscopio, después que hemos retirado al cuerpo de exceso de carga positiva  $Q_1$ .

Los casos anteriormente tratados partían del supuesto que el cuerpo con exceso de carga  $Q_1$  era de clase positiva. Para complementar el criterio examinemos el caso en el cual  $Q_1$  es un exceso de carga negativa. Esta cualidad de la electrización del cuerpo la reconocemos por la atracción del mismo con el vidrio frotado.

Comenzamos por introducir el cuerpo de carga  $Q_1$  en el interior de  $E$  y tocamos con él la cara interna de éste. El electroscopio divergerá sus hojas. Con el dispositivo en estas condiciones, introducimos el cuerpo de carga  $Q_2$  en la caja de  $E$ , SIN TOCAR a éste. La experiencia revela la existencia de cuatro situaciones posibles:

1. Si la divergencia de las hojas AUMENTA, diremos que  $Q_2$  es un exceso de carga negativa. Con esta operación reconocemos la clase (o signo) de la carga  $Q_2$ . Para comparar con  $Q_1$  debemos proceder así: comenzamos sacando  $Q_2$  de la caja de  $E$ , SIN TOCAR a éste; luego tocamos con la mano el electroscopio y seguidamente volvemos a introducir al cuerpo de carga  $Q_2$  y

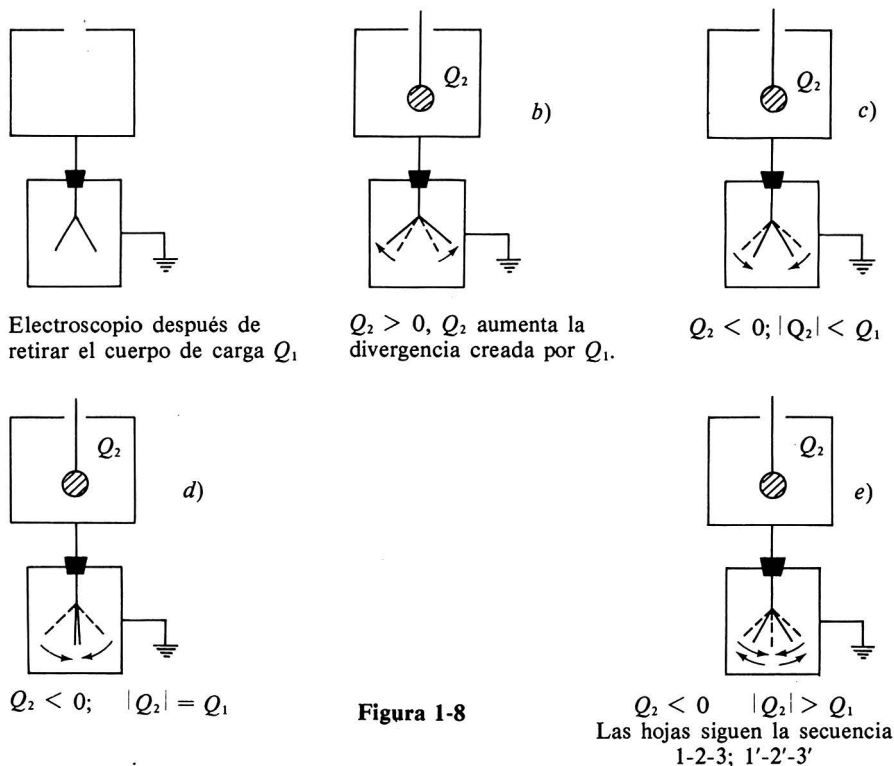


Figura 1-8

tocamos la cara interna de  $E$ . Las hojas del electroscopio divergerán. Si esta divergencia es IGUAL, MAYOR o MENOR que la lograda en la operación inicial, al introducir  $Q_1$  diremos que  $Q_2$  es IGUAL, MENOR o MAYOR (*en módulo*) que la  $Q_1$ .

- Si la divergencia de las hojas DISMINUYE SIN QUE CAIGAN TOTALMENTE, concluiremos que la clase de electrización  $Q_2$  es POSITIVA y de menor módulo que la de  $Q_1$ . En símbolos:  $Q_2 > 0$  y  $Q_2 < |Q_1|$ .
- Si la divergencia de las hojas lograda por  $Q_1$  es aniquilada por la introducción de  $Q_2$ , diremos que ésta es un exceso de carga positiva y de IGUAL MÓDULO que  $Q_1$ . En símbolos:  $Q_2 > 0$  y  $Q_2 = |Q_1|$ .
- Si la divergencia de las hojas, al introducir  $Q_2$ , se logra después de una caída total de las hojas de  $E$ , diremos que  $Q_2$  es un exceso de carga positivo y que su módulo es mayor que el de  $Q_1$ . En símbolos:  $Q_2 > 0$  y  $Q_2 > |Q_1|$ .

Puede ocurrir que al introducir el cuerpo  $Q_2$ , NO SE MODIFIQUE la situación de las hojas del electroscopio  $E$  en estado de divergencia desde que retiramos  $Q_1$ . En este caso, diremos que el cuerpo introducido en segundo término no tiene exceso de carga respecto al dispositivo  $E$ . Diremos que el cuerpo está en estado NEUTRO respecto al electroscopio. Naturalmente que otro electroscopio  $E'$  podría indicar que un cuerpo señalado como neutro para  $E$ , tiene exceso de carga para  $E'$ . No obstante, debemos recordar que nuestras leyes y mediciones deben referirse al instrumental de que disponemos y que la coherencia entre las deducciones físicas realizadas con instrumentos de la misma

especie tiene que ver con lo mencionado en el Capítulo Previo del tomo I y que denominamos «prolongación instrumental».

### b) Calibración del electroscopio: el electrómetro

Veamos ahora si es posible asociar a cada carga (estado de electrización) un número.

Para ello elaboraremos una escala asociada al electroscopio. Diremos en este caso que disponemos de un *electrómetro*.

Comenzaremos por elegir una carga  $Q$ , que llamaremos carga base o carga UNIDAD.

En principio, la elección de esta carga es arbitraria. Elegimos un conjunto de cuerpos pequeños del *mismo material*. Frotamos uno de ellos hasta que adquiera un exceso de carga  $Q$ . En primer término, interaccionamos este cuerpo frotado con otro de vidrio frotado de modo que estamos en condiciones de fijar el signo de  $Q$ .

Supongamos que  $Q$  es un exceso de carga positivo. Una vez cumplida esta etapa, introducimos  $Q$  en el electroscopio y, sin tocarlo, señalamos la divergencia de las hojas sobre un cuadrante, como indica la figura 1-9. Asignamos a esta marca el número «1». Seguidamente, frotamos los demás cuerpos suficientemente, hasta que introducidos *sucesivamente* (uno por vez) en el electroscopio, sacando el precedente, obtengamos para *cada uno* la marca indicada con el número 1. De acuerdo con el criterio visto en el apartado a) anterior, podemos afirmar que disponemos de una colección de cuerpos con excesos de carga iguales a la unidad  $Q$ .

Cumplida esta etapa, introducimos *a la vez* dos cuerpos de carga unitaria que no se tocan, con lo cual el electroscopio divergerá sus hojas y podremos indicar en el cuadrante el número «2» asociado a la carga doble. De este modo, podemos construir una escala de enteros, donde el número « $n$ » estará asociado a un conjunto de ( $n Q$ ) cargas introducidas en el electroscopio. De esta forma tenemos calibrado el electroscopio, el cual ha pasado a constituirse en un electrómetro.

Si disponemos ahora de un cuerpo de exceso de carga positivo  $Q'$  podremos, en general, al introducirlo en el electrómetro, determinar dos enteros consecutivos  $p$  y  $(p + 1)$  sobre el cuadrante de modo que:  $p \cdot Q < Q' < (p + 1) \cdot Q$ . La determinación de este intervalo definirá la medida de  $Q'$ .

Obsérvese que, por la propia definición operativa que conduce a medir  $Q'$ , se acepta tácitamente el carácter arquimediiano de la carga eléctrica asociada a cada estado de electrización.

La calibración efectuada anteriormente, a partir de excesos de carga positiva, NO sabemos si es válida para excesos de carga negativa. En otros términos: si construimos un conjunto de cuerpos de carga unitaria y negativa, es decir, cuerpos que adquieren estados de electrización negativo y que colocados en el electrómetro logran diverger las hojas hasta la marca indicada con «1», NO estamos en condiciones de asegurar que DOS cuerpos de esta especie logren elevar las hojas hasta la marca «2». En principio, si elaboramos la escala del electrómetro con cuerpos de electrización negativa, podemos *decretar* la coincidencia en la marca «1», para lo cual frotaríamos suficientemente cada cuerpo de la muestra hasta que el electrómetro indicara «1». Pero de aquí *no se*

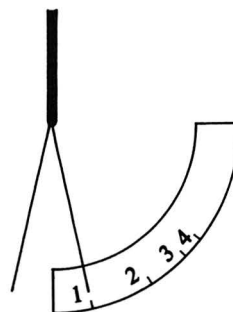


Figura 1-9

desprende, a menos que EXPERIMENTEMOS, que la ubicación de DOS o más cuerpos de carga unitaria lograrán la coincidencia de las hojas en las marcas «2», «3», ..., « $n$ », etc.

El que esto ocurra es un hecho NUEVO, revelado por la experiencia y NO una consecuencia de lo visto anteriormente.

De otro modo: si colocamos en el electrómetro el cuadrante construido con cargas unitarias *positivas*, este mismo sirve para la calibración con cargas unitarias negativas, pero esto no puede asegurarse a priori o en base a las afirmaciones y criterios vistos anteriormente, sino *después de experimentar*. Constituye, entonces, un hecho físico nuevo e independiente de lo visto hasta el momento.

La coincidencia de la escala construida con cargas unitarias positivas, con la elaborada a partir de cargas unitarias negativas, NOS AUTORIZA asignar a la unidad negativa el entero «-1» y en general los restantes enteros a los restantes estados de electrización negativa, *sin que esto* implique algún tipo de «compensación» física entre las cargas «1» y «-1». Volveremos sobre esta cuestión al tratar el Principio de Simetría de la carga eléctrica. De otro modo; el hecho de que a un estado de electrización le asignemos el número «1» y a otro el número «-1», NO implica, a menos que experimentemos, que *ambos* cuerpos colocados a la vez en el electrómetro, NO obtengan divergencia de las hojas. Si los cuerpos se juntan y se tocan, *sólo la experiencia* puede asignar al conjunto el número «0».

Por el momento, solamente hemos construido una escala con divisiones enteras. ¿Cómo construimos subdivisiones?, es decir, ¿cómo disminuimos la escala de apreciación del instrumento?

Veamos. Observemos en primer lugar, que la escala, en general, *NO será lineal*.

¿Cómo construimos las indicaciones correspondientes a  $1/2$ ,  $3/2$ ,  $5/2$ , ...? Comenzamos por electrizar dos cuerpos de una colección, con cargas eléctricas  $Q_1$  y  $Q_2$ .

Puede ocurrir que se den estos hechos:

1. Introducidos  $Q_1$  y  $Q_2$  *por separado*, se logran desviaciones *iguales* de las hojas.
2. Introducidos  $Q_1$  y  $Q_2$ , *juntos* y sin tocarse entre sí, se logra como desviación la marca «1».

En esta situación, DEFINIREMOS las cargas  $Q_1$  y  $Q_2$  como iguales y correspondientes al valor « $1/2$ ». Indicamos, entonces, el punto « $1/2$ » en la escala.

Hecho esto, tomamos otros cuerpos de la colección y *los electrizamos*, hasta que ubicados uno a uno en el electroscopio logremos una desviación de « $1/2$ ». *Supondremos*, naturalmente, que todos los cuerpos son de igual naturaleza y de iguales dimensiones, *para favorecer* la creación de excesos de carga iguales. Estos requisitos NO son *imprescindibles*, sino que los adoptamos para facilitar nuestro trabajo operacional.

Una vez que hemos construido « $n$ » cuerpos de carga « $1/2$ », colocamos *a la vez* en una primera etapa 3 de ellos y marcamos el valor « $3/2$ ». Retiramos luego los 3 cuerpos. Hecho esto, colocamos 5 cuerpos en el electroscopio simultáneamente, e indicamos el valor de « $5/2$ ». De este modo, podemos indicar los «puntos medios» de la escala. Este procedimiento nos permite graduar la

escala en submúltiplos de la unidad. El lector puede fijar el criterio para obtener las divisiones correspondientes a « $1/10$ », « $2/10$ », « $3/10$ », ..., y así sucesivamente.

La limitación de nuestra escala la fija, naturalmente, el exceso mínimo de carga detectable por el instrumento. Esto estará fijado por la *sensibilidad del dispositivo*.

### c) Regla de composición de las cargas eléctricas

Se trata ahora de examinar la posibilidad de elaborar un criterio de composición mediante el cual, dadas dos cargas  $Q_i$  y  $Q_j$ , construyamos una tercera carga  $Q_k$ . Para la elaboración de un criterio general de composición debemos apelar a la experiencia. Veremos además varios casos particulares a modo de guía a la conclusión general.

#### Primer caso:

Supongamos dos cuerpos,  $C_i$  y  $C_j$ , electrizados con excesos de carga POSITIVA que llamamos  $Q_i$  y  $Q_j$ . Disponemos de un electrómetro que inicia las operaciones con sus hojas juntas. En estas condiciones las hojas divergen hasta la división  $N_i$ . Supongamos que el cuerpo introducido NO toca la cara interna del electrómetro. Retiramos ahora el cuerpo  $C_i$  y colocamos en el electrómetro al cuerpo  $C_j$ , con lo cual logramos la divergencia de las hojas hasta la división  $N_j$ . Retiramos el cuerpo  $C_j$  sin tocar el electrómetro.

Seguidamente, introducimos *a la vez y sin que se toquen entre sí*, los cuerpos  $C_i$  y  $C_j$  en el electrómetro, el cual diverge sus hojas. *Es un hecho EXPERIMENTAL*, no previsto en las operaciones cumplidas hasta el momento ni en lo explicado hasta ahora, que la DIVISIÓN ALCANZADA POR LA DIVERGENCIA es  $(N_i + N_j)$ .

**Conclusión:** Si al exceso de carga positivo  $Q_i$  corresponde el número  $N_i$  en la escala del electrómetro y al exceso también positivo  $Q_j$  le corresponde el número  $N_j$ , al exceso de carga formado por la unión (sin tocarse) de los excesos anteriores, corresponde la indicación (número)  $(N_i + N_j)$ . En símbolos:

$$\left. \begin{array}{l} Q_i \rightarrow N_i \\ Q_j \rightarrow N_j \end{array} \right\} \text{ (ambos excesos de carga son positivos)}$$

$$Q_i \cup Q_j \rightarrow (N_i + N_j) \text{ (el símbolo «}\cup\text{» representa «unión»)}$$

#### Segundo caso:

Lo anteriormente visto también vale si los excesos de carga  $Q_i$  y  $Q_j$  son **ambos negativos**. En esta situación, el electrómetro, que NO distingue el signo de la carga de los cuerpos introducidos si operamos exclusivamente como en el caso 1, revelará que la conclusión anteriormente establecida sigue vigente. *Si de antemano* establecemos, por una operación independiente, que  $Q_i$  y  $Q_j$  son ambas negativas, veremos que la experiencia revela la aditividad denunciada en el primer caso, ahora vigente para números negativos. En símbolos, si asignamos a:

$$\begin{array}{l} Q_i \rightarrow -N_i \\ Q_j \rightarrow -N_j \end{array}$$

entonces, PODEMOS establecer que a la *unión* de los cuerpos cargados corresponde:

$$Q_i \cup Q_j \rightarrow -(N_i + N_j)$$

Obsérvese que en este caso, la *indicación* del electrómetro será (puesto que la escala es única):

$$N' = |(-N_i) + (-N_j)| = N_i + N_j$$

### *Tercer caso*

Supongamos ahora que disponemos de dos cuerpos de excesos de carga  $Q_i$  y  $Q_j$ . Por una experiencia independiente determinamos, en primer lugar, la clase de cada electrización. Cumplida esta etapa, supongamos que llegamos a la conclusión que  $Q_i > 0$  y  $Q_j < 0$ .

Seguidamente, introducimos a  $Q_i$  en el interior del electrómetro, sin tocarlo, con lo cual registramos la indicación  $N_i$  del dispositivo. Retiramos  $Q_i$  del electrómetro, con lo cual sus hojas caen y seguidamente introducimos en él, sin tocarlo, la carga  $Q_j$ . Ahora las hojas divergen hasta la señal  $N_j$  de la escala. Por lo expresado anteriormente, sabemos que la correspondencia entre cargas y números (indicaciones) que tiene en cuenta el carácter de la electrización debe definirse así:

$$Q_i \rightarrow N_i$$

$$Q_j \rightarrow -N_j$$

Cumplida la etapa anterior, dejamos  $Q_i$  adentro del electrómetro e introducimos el cuerpo de carga  $Q_j$  sin tocar *ni al dispositivo ni al cuerpo  $Q_i$* . Al cumplirse esta operación, la indicación del electrómetro será, en general, distinta de las anteriores y la llamamos  $N'$ .

Es un hecho EXPERIMENTAL que el número  $N'$  que corresponde al conjunto de ambos cuerpos en el interior del electrómetro se puede obtener a partir de la *suma* algebraica de las indicaciones ( $N_i$ ) y ( $-N_j$ ). En símbolos:

$$N' = |N_i - N_j| = |(N_i) + (-N_j)|$$

Lo anteriormente examinado nos permite establecer la siguiente conclusión general:

### CONCLUSIÓN GENERAL 1:

1. *Existe un procedimiento operacional por medio del cual podemos asignar a cada cuerpo en determinado estado de electrización, un número, que convencionalmente elegimos positivo para aquellos cuyo exceso de carga es del mismo tipo que el estado del vidrio frotado.*
2. *Es un hecho experimental nuevo y no incluido en lo anterior, que también podamos definir para dos cuerpos con estados de electrización de cualquier clase una operación de unión aditiva. Si extendemos nuestro con-*