

*Marco Panareo*

# Appunti di Fisica

Elettromagnetismo

Università degli Studi del Salento, Facoltà di Ingegneria



# INTRODUZIONE

Questa raccolta di appunti originati dalle lezioni di Fisica Generale tenute in vari anni nasce dalla richiesta formulata dagli studenti di possedere un testo che fornisca un ausilio didattico per lo studio degli argomenti presentati durante il corso. Tali appunti, pertanto, non devono essere intesi quale sostituto di un trattato di Fisica, di cui ne esiste già un cospicuo numero specialmente in lingua straniera, ma uno strumento di studio che raccoglie in un solo testo gli argomenti affrontati a lezione e che solleva lo studente dall'impegno di prendere affrettatamente degli appunti a scapito della indispensabile concentrazione necessaria alla comprensione delle lezioni.

Non tutti gli argomenti delle lezioni sono trattati e contemporaneamente, alcuni concetti sviluppati in questi appunti non rappresentano necessariamente degli argomenti di lezione; ciò è dovuto alle diverse scelte didattiche fatte di anno in anno. Per questi motivi tali appunti hanno una struttura dinamica, nel senso che si arricchiscono continuamente di nuovo materiale o si modificano in relazione ai suggerimenti ed alle proposte formulate dagli studenti.

Lo stato attuale di questi appunti si deve infatti in larga misura al contributo degli studenti che sistematicamente hanno rilevato errori o imprecisioni stimolandone un progressivo perfezionamento sia di carattere formale che sostanziale. A loro va tutto il mio ringraziamento e a loro è dedicato questo lavoro.



# INDICE

## 1 Il campo elettrostatico

|      |   |      |
|------|---|------|
| 1.1  | Proprietà delle cariche elettriche                                | 1-1  |
| 1.2  | La legge di Coulomb   | 1-5  |
| 1.3  | Il campo elettrico  | 1-6  |
| 1.4  | Distribuzioni continue di carica                                  | 1-7  |
| 1.5  | Linee di forza del campo elettrico                                | 1-10 |
| 1.6  | Flusso di un vettore  | 1-11 |
| 1.7  | La legge di Gauss   | 1-12 |
| 1.8  | Formulazione puntuale della legge di Gauss                        | 1-18 |
| 1.9  | Conduttori in equilibrio elettrostatico                           | 1-19 |
| 1.10 | Differenza di potenziale e potenziale elettrico                   | 1-20 |
| 1.11 | Campo elettrico uniforme  | 1-22 |
| 1.12 | Potenziale elettrico ed energia potenziale per cariche puntiformi | 1-23 |
| 1.13 | Potenziale elettrico dovuto a distribuzioni continue di carica    | 1-24 |
| 1.14 | Relazione tra campo elettrico e potenziale                        | 1-26 |
| 1.15 | Espressione della conservatività del campo elettrostatico         | 1-27 |
| 1.16 | Conduttori carichi isolati  | 1-28 |
| 1.17 | Sviluppo in serie di multipoli                                    | 1-30 |
| 1.18 | Equazioni di Maxwell per il campo elettrostatico                  | 1-36 |

## 2 Capacità elettrica e dielettrici

|     |   |      |
|-----|---|------|
| 2.1 | Capacità elettrica  | 2-1  |
| 2.2 | Calcolo di capacità   | 2-2  |
| 2.3 | Collegamenti tra condensatori   | 2-4  |
| 2.4 | Energia immagazzinata in un condensatore, energia del campo elettrico | 2-5  |
| 2.5 | Forze elettrostatiche sui conduttori                                  | 2-7  |
| 2.6 | Dielettrici polari e apolari  | 2-9  |
| 2.7 | Polarizzazione  | 2-10 |
| 2.8 | Il vettore spostamento elettrico                                      | 2-11 |
| 2.9 | Condizioni di raccordo all'interfaccia tra due dielettrici            | 2-17 |

## 3 Corrente elettrica e circuiti

|     |  |      |
|-----|--|------|
| 3.1 | Corrente elettrica e densità di corrente             | 3-1  |
| 3.2 | Equazione di continuità                              | 3-3  |
| 3.3 | Legge di Ohm   | 3-4  |
| 3.4 | Caratteristiche dei conduttori in regime stazionario | 3-7  |
| 3.5 | Modello della conduzione, effetto Joule              | 3-8  |
| 3.6 | Forza elettromotrice, legge di Ohm generalizzata     | 3-11 |
| 3.7 | Collegamenti tra resistori                           | 3-14 |
| 3.8 | Analisi delle reti elettriche                        | 3-17 |
| 3.9 | Circuiti in regime quasi stazionario                 | 3-22 |

|          |  |      |
|----------|--|------|
| 3.10     | Carica e scarica di un condensatore                                | 3-23 |
| <b>4</b> | <b>Il campo magnetico statico</b>                                  |      |
| 4.1      | Forza di Lorentz   | 4-3  |
| 4.2      | Effetto di un campo magnetico su una corrente                      | 4-8  |
| 4.3      | La legge di Biot-Savart  | 4-12 |
| 4.4      | Elettromagnetismo e sistemi di riferimento                         | 4-16 |
| 4.5      | Forza magnetica tra due conduttori paralleli                       | 4-21 |
| 4.6      | La legge di Ampère   | 4-24 |
| 4.7      | Legge di Gauss per il magnetismo                                   | 4-31 |
| 4.8      | Formulazione differenziale della legge di Ampère                   | 4-31 |
| 4.9      | Equazioni di Maxwell per il campo magnetico statico                | 4-32 |
| <b>5</b> | <b>Proprietà magnetiche dei materiali</b>                          |      |
| 5.1      | Magnetizzazione  | 5-2  |
| 5.2      | Il vettore $\vec{H}$   | 5-5  |
| 5.3      | Proprietà del vettore $\vec{H}$                                    | 5-6  |
| 5.4      | Sorgenti del campo $\vec{H}$                                       | 5-11 |
| 5.5      | Classificazione dei materiali magnetici                            | 5-12 |
| 5.5.1    | Sostanze diamagnetiche   | 5-13 |
| 5.5.2    | Sostanze paramagnetiche  | 5-14 |
| 5.5.3    | Sostanze ferromagnetiche   | 5-14 |
| 5.6      | Isteresi magnetica   | 5-16 |
| 5.7      | Condizioni di raccordo all'interfaccia tra due materiali magnetici | 5-18 |
| 5.8      | Circuiti magnetici   | 5-19 |
| <b>6</b> | <b>Induzione elettromagnetica</b>                                  |      |
| 6.1      | Legge di Faraday-Henry   | 6-2  |
| 6.2      | Legge di Lenz  | 6-3  |
| 6.3      | Induzione di movimento   | 6-4  |
| 6.4      | Convenzioni relative all'applicazione della legge di Faraday-Henry | 6-7  |
| 6.5      | Autoinduzione  | 6-8  |
| 6.6      | Energia immagazzinata in una bobina, energia del campo magnetico   | 6-11 |
| 6.7      | Mutua induzione  | 6-14 |
| 6.8      | Carica e scarica di una bobina                                     | 6-16 |
| 6.9      | Forze elettromotrici e campi elettrici                             | 6-20 |
| 6.10     | Formulazione differenziale della legge di Faraday-Henry            | 6-21 |
| 6.11     | Legge di Ampere-Maxwell  | 6-24 |
| 6.12     | Equazioni di Maxwell   | 6-28 |
| <b>7</b> | <b>Circuiti elettrici in regime sinusoidale</b>                    |      |
| 7.1      | Circuito <i>RLC</i>  | 7-2  |
| 7.2      | Bilanci energetici nel circuito <i>LC</i>                          | 7-4  |
| 7.3      | Circuito <i>RLC</i> forzato  | 7-6  |
| 7.4      | Metodo simbolico   | 7-7  |
| 7.5      | Soluzione del circuito <i>RLC</i> forzato a regime                 | 7-8  |
| 7.6      | Impedenza  | 7-10 |

|       |                      |      |
|-------|----------------------|------|
| 7.6.1 | Impedenza resistiva  | 7-12 |
| 7.6.2 | Impedenza induttiva  | 5-12 |
| 7.6.3 | Impedenza capacitiva | 5-13 |
| 7.7   | Risonanza            | 7-16 |
| 7.8   | Fattore di merito    | 7-17 |
| 7.9   | Potenze              | 7-20 |
| 7.10  | Potenza complessa    | 7-23 |
| 7.11  | Il trasformatore     | 7-25 |
| 7.12  | Serie di Fourier     | 7-27 |

## 8 Onde elettromagnetiche

|     |                                       |      |
|-----|---------------------------------------|------|
| 8.1 | Equazione delle onde                  | 8-1  |
| 8.2 | Onde armoniche                        | 8-3  |
| 8.3 | Onde elettromagnetiche                | 8-5  |
| 8.4 | Energia di un'onda elettromagnetica   | 8-9  |
| 8.5 | Intensità di un'onda elettromagnetica | 8-11 |
| 8.6 | Teorema di Poynting                   | 8-12 |
| 8.7 | Sorgenti di onde elettromagnetiche    | 8-13 |
| 8.8 | Trasmissione di segnali               | 8-15 |
| 8.9 | Linee di trasmissione                 | 8-18 |

## 9 Relatività

|     |   |      |
|-----|---|------|
| 9.1 | Trasformazioni di Lorentz                               | 9-3  |
| 9.2 | Formule di trasformazione della velocità                | 9-7  |
| 9.3 | Conseguenze cinematiche della trasformazione di Lorentz | 9-8  |
| 9.4 | Leggi di trasformazione del campo elettromagnetico      | 9-11 |
| 9.5 | Dinamica relativistica                                  | 9-12 |
| 9.6 | Equivalenza massa-energia                               | 9-17 |

## Appendice

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| A.1   | Operatori differenziali e relativi teoremi | A-1 |
| A.2   | Numeri complessi                           | A-3 |
| A.2.1 | Operazioni tra numeri complessi            | A-3 |
| A.2.2 | Rappresentazione geometrica                | A-4 |
| A.2.3 | Rappresentazione esponenziale              | A-5 |
| A.2.4 | Rappresentazione fasoriale                 | A-5 |

