

*Marco Panareo*

# Appunti di Elettromagnetismo

Università del Salento, Dipartimento di Matematica e Fisica



# INTRODUZIONE

Questa raccolta di appunti originati dalle lezioni di Fisica 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	La legge di Gauss	1-11
1.7	Formulazione puntuale della legge di Gauss	1-17
1.8	Differenza di potenziale e potenziale elettrico	1-19
1.9	Espressione della conservatività del campo elettrostatico	1-23
1.10	Sviluppo in serie di multipoli	1-28
1.11	Energia del campo elettrico	1-35
1.12	Equazioni di Maxwell per il campo elettrostatico	1-38

## 2 Sistemi di conduttori e dielettrici

2.1	Conduttori	2-1
2.2	Sistemi di conduttori, schermi elettrostatici	2-4
2.3	Il problema generale dell'elettrostatica	2-7
2.4	Condensatori e capacità	2-15
2.5	Calcolo di capacità	2-17
2.6	Collegamenti tra condensatori	2-19
2.7	Energia immagazzinata in un condensatore	2-21
2.8	Forze elettrostatiche sui conduttori	2-22
2.9	Dielettrici polari e apolari	2-24
2.10	Polarizzazione	2-26
2.11	Il vettore spostamento	2-29
2.12	Energia elettrostatica in presenza di un dielettrico	2-32
2.13	Condizioni di raccordo all'interfaccia tra due dielettrici	2-35

## 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	3-8
3.5	Modello della conduzione, effetto Joule	3-9
3.6	Forza elettromotrice, legge di Ohm generalizzata	3-12
3.7	Collegamenti tra resistori	3-16
3.8	Analisi delle reti elettriche	3-18
3.9	Generatori di tensione e di corrente	3-26
3.10	Circuiti in regime quasi stazionario	3-28
3.11	Carica e scarica di un condensatore	3-29

## 4 Il campo magnetico statico

4.1	Forza di Lorentz	4-3
4.2	Effetto di un campo magnetico su una corrente	4-10
4.3	La legge di Biot-Savart	4-13
4.4	Elettromagnetismo e sistemi di riferimento	4-18
4.5	Forza magnetica tra due conduttori paralleli	4-22
4.6	La legge di Ampère	4-26
4.7	Legge di Gauss per il magnetismo	4-32
4.8	Formulazione differenziale della legge di Ampère	4-33
4.9	Il potenziale vettore	4-34
4.10	Equazioni di Maxwell per il campo magnetico statico	4-39

## 5 Proprietà magnetiche dei materiali

5.1	Magnetizzazione	5-3
5.2	Il vettore $\vec{H}$	5-7
5.3	Sorgenti del campo $\vec{H}$	5-11
5.4	Classificazione dei materiali magnetici	5-12
	5.4.1 Sostanze diamagnetiche	5-13
	5.4.2 Sostanze paramagnetiche	5-13
	5.4.3 Sostanze ferromagnetiche	5-14
5.5	Isteresi magnetica	5-16
5.6	Condizioni di raccordo all'interfaccia tra due materiali magnetici	5-17
5.7	Circuiti magnetici	5-18

## 6 Induzione elettromagnetica

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	6-11
6.7	Mutua induzione	6-12
6.8	Energia di circuiti mutuamente accoppiati, energia del campo magnetico	6-14
6.9	Carica e scarica di una bobina	6-18
6.10	Forze elettromotrici e campi elettrici	6-21
6.11	Formulazione differenziale della legge di Faraday-Henry	6-22
6.12	Legge di Ampère-Maxwell	6-26
6.13	Equazioni di Maxwell	6-29

## 7 Circuiti elettrici in regime sinusoidale

7.1	Circuito $RLC$	7-2
7.2	Bilanci energetici nel circuito $LC$	7-4
7.3	Circuito $RLC$ forzato	7-6
7.4	Metodo simbolico	7-7
7.5	Soluzione del circuito $RLC$ forzato a regime	7-8
7.6	Impedenza	7-10

7.6.1	Impedenza resistiva	7-12
7.6.2	Impedenza induttiva	7-12
7.6.3	Impedenza capacitiva	7-13
7.7	Risonanza	7-16
7.8	Fattore di merito	7-18
7.9	Potenze	7-20
7.10	Potenza complessa	7-24
7.11	Il trasformatore	7-26
7.12	Serie di Fourier	7-29
7.13	Elementi di circuito reali	7-34
7.13.1	Resistore	7-35
7.13.2	Induttore	7-36
7.13.3	Condensatore	7-38
7.14	Studio dei circuiti nel dominio della frequenza	7-40

## 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	8-12
8.5	Intensità di un'onda elettromagnetica	8-13
8.6	Teorema di Poynting	8-15
8.7	Sorgenti di onde elettromagnetiche	8-16
8.8	Trasmissione di segnali	8-18
8.9	Riflessione e rifrazione di onde elettromagnetiche	8-20
8.10	Polarizzazione	8-25

## 9 Linee di Trasmissione

9.1	Equazioni dei telegrafisti	9-2
9.2	Coefficiente di riflessione	9-7
9.3	Soluzione generale delle equazioni dei telegrafisti	9-9
9.4	Onde stazionarie	9-11
9.5	Impedenza in un punto generico della linea	9-15
9.6	Carta di Smith	9-17

## 10 Relatività

10.1	Trasformazioni di Lorentz	9-3
10.2	Formule di trasformazione della velocità	9-7
10.3	Conseguenze cinematiche della trasformazione di Lorentz	9-8
10.4	Leggi di trasformazione del campo elettromagnetico	9-11
10.5	Dinamica relativistica	9-12
10.6	Equivalenza massa-energia	9-17

## Appendice A - Tabelle

A.1	Derivate notevoli	A-1
A.2	Integrali notevoli	A-3
A.3	Trasformate di Laplace notevoli	A-5
A.4	Sviluppi in serie di Maclaurin notevoli	A-7

A.5	Costanti fondamentali	A-9
-----	-----------------------	-----

## Appendice B - Ausili matematici

B.1	Sistemi di coordinate	B-1
B.2	I vettori	B-4
	B.2.1 Operazioni tra vettori	B-4
	B.2.2 Relazioni vettoriali notevoli	B-10
B.3	Operatori differenziali e relativi teoremi	B-10
	B.3.1 Flusso di un vettore	B-11
	B.3.2 L'operatore $\nabla$	B-12
	B.3.3 L'operatore gradiente	B-12
	B.3.4 L'operatore divergenza	B-14
	B.3.5 L'operatore rotore	B-16
	B.3.6 L'operatore laplaciano	B-20
	B.3.7 Relazioni notevoli	B-23
	B.3.8 Campi conservativi	B-23
B.4	Numeri complessi	B-25
	B.4.1 Operazioni tra numeri complessi	B-25
	B.4.2 Rappresentazione geometrica	B-26
	B.4.3 Rappresentazione esponenziale	B-27
	B.4.4 Rappresentazione fasoriale	B-27
B.5	Delta di Dirac	B-28
B.6	Trasformata di Laplace	B-30
	B.6.1 L'integrale di Laplace	B-30
	B.6.2 Proprietà della trasformata di Laplace	B-32
	B.6.3 Antitrasformata di Laplace	B-35
	B.6.4 Applicazione della trasformata di Laplace all'analisi dei circuiti	B-39
	B.6.5 Funzione del sistema e funzione di trasferimento	B-41
	B.6.6 Teoremi del valore finale ed iniziale	B-44
	B.6.7 Stabilità dei sistemi	B-46
	B.6.8 Risposta di regime sinusoidale	B-47

## Appendice C – Dispositivi elettrici a semiconduttore

C.1	Materiali semiconduttori	C-1
	C.1.1 Conduzione nei materiali semiconduttori	C-2
	C.1.2 Semiconduttori drogati	C-3
	C.1.3 Corrente di deriva e corrente di conduzione	C-3
C.2	Diodo a semiconduttore	C-5
	C.2.1 Giunzione $pn$	C-5
	C.2.2 Polarizzazione della giunzione $pn$	C-6
	C.2.3 Caratteristica del diodo	C-7
	C.2.4 Analisi di circuiti con diodi	C-9
	C.2.5 Modello del diodo per piccoli segnali	C-11
C.3	Applicazioni dei diodi	C-14
	C.3.1 Slicer	C-15
	C.3.2 Circuiti raddrizzatori	C-17
	C.3.3 Generatore di Cockcroft e Walton	C-21
C.4	Transistor bipolare	C-23
	C.4.1 Modello di Ebers-Moll	C-25
	C.4.2 Caratteristiche di ingresso e di uscita	C-28



C.4.3 Analisi di circuiti con *BJT*

C-29

## **Appendice D – Cenni di misure elettriche**

D.1	Il galvanometro a bobina mobile	D-2
D.1.1	L'amperometro	D-4
D.1.2	Il voltmetro	D-6
D.1.3	Classe di precisione di uno strumento	D-9
D.2	La conversione analogico-digitale	D-10
D.2.1	Caratteristiche della conversione analogico-digitale	D-11
D.3	Il multimetro digitale	D-14
D.4	Misure di resistenza	D-17
D.4.1	Ohmetro	D-17
D.4.2	Metodi di confronto	D-18
D.4.3	Metodo voltamperometrico	D-19
D.4.4	Ponte di Wheatstone	D-20

