

## PROGRAMMA DEL CORSO DI ELETTROMAGNETISMO – CORSO DI LAUREA IN FISICA - A.A. 2020/2021 Prof. Giovanni La Rana

**Elettrostatica nel vuoto.** Fenomenologia delle forze elettriche, la carica elettrica, i costituenti elementari della materia, la quantizzazione della carica elettrica e la carica elementare, isolanti e conduttori, elettrizzazione per contatto, induzione elettrostatica. Legge di Coulomb, elettroscopio a foglie, legge di conservazione della carica elettrica, unità di misura delle cariche, la costante dielettrica del vuoto. Campo elettrico generato da una carica puntiforme e da sistemi discreti di cariche puntiformi e sistemi continui con densità di carica volumica, superficiale e lineare, principio di sovrapposizione. Esempi di Campo elettrico generato da distribuzioni uniformi di carica: filo rettilineo, spira circolare, disco, piano. Flusso del campo elettrico e teorema di Gauss. Rappresentazione grafica del campo elettrostatico. Esempi di calcolo del campo elettrico con il teorema di Gauss: sfera e guscio sferico uniformemente carichi, sfera uniformemente carica con foro sferico vuoto all'interno, filo rettilineo carico indefinito, piano uniformemente carico. La divergenza di un vettore, teorema della divergenza. La prima equazione di Maxwell. Potenziale elettrostatico generato da una carica puntiforme e da una distribuzione discreta e continua di cariche. L'operatore gradiente, significato fisico, componenti in coordinate cartesiane e polari. Relazione tra campo elettrico e gradiente del potenziale. Esempi di calcolo di potenziale: piano, doppio piano e anello uniformemente carichi, distribuzioni di cariche che si estendono all'infinito. Campo elettrico generato da un dipolo, espresso in coordinate polari e cartesiane. Azioni meccaniche su dipoli elettrici in un campo elettrico esterno: energia potenziale, risultante e momento risultante delle forze esercitate dal campo sul dipolo. Sviluppo in serie di multipoli. Rotore di un campo vettoriale. Circuitazione del campo elettrostatico e conservatività. Teorema di Stokes. Terza equazione di Maxwell nel caso statico (irrotazionalità del campo elettrostatico).

**Elettrostatica nei conduttori.** Conduttori. Campo elettrico interno nullo come condizione di equilibrio. Continuità della componente tangenziale del campo elettrostatico al passaggio tra due mezzi. Potenziale di un conduttore all'interno e sulla superficie. Lavoro di estrazione. Cariche superficiali e teorema di Coulomb. Esempi: conduttore sferico, conduttore cavo e schermo elettrostatico, sfere collegate, effetto delle punte, messa a "terra" (o a "massa"). Capacità di un conduttore isolato. Coefficienti di potenziale, di induzione e di capacità. Condensatore elettrostatico e sua capacità, condensatore sferico, cilindrico e piano. Sistemi di condensatori in serie e in parallelo. Energia elettrostatica di un sistema discreto di cariche puntiformi e di un sistema continuo di cariche. Densità di energia elettrostatica. Energia elettrostatica di un sistema di conduttori. Forze su conduttori carichi, pressione elettrostatica sulla superficie dei conduttori. Operatore Laplaciano, equazione di Poisson e di Laplace del potenziale, teorema di unicità. Problema generale dell'elettrostatica in assenza di cariche localizzate e con sistema di conduttori di geometria nota nei casi: a) noti i potenziali dei conduttori (problema di Dirichlet), b) note le cariche dei conduttori; e c) nel caso di presenza di cariche localizzate e sistema di conduttori con cariche note. Metodo delle cariche immagini. Soluzione dell'equazione di Laplace in casi unidimensionali.

**Elettrostatica nei dielettrici.** Dielettrici, la costante dielettrica relativa e assoluta. Interpretazione microscopica. Polarizzazione per deformazione, polarizzabilità elettronica. Campo locale e campo macroscopico. Polarizzazione per orientamento. Molecole polari. Vettore polarizzazione e suo significato fisico. Relazioni fra le densità superficiale e volumica di cariche di polarizzazione e il vettore polarizzazione elettrica. Esempi: lastra uniformemente polarizzata, sfera con polarizzazione uniforme. Relazione tra campo locale e campo macroscopico nelle sostanze dielettriche: gas e vapori, liquidi non polari, relazione di Clausius-Mossotti, suscettività elettrica, dielettrici solidi. Vettore

spostamento elettrico. Equazioni fondamentali dell'elettrostatica in presenza dei dielettrici. Materiali anisotropi e tensore di polarizzazione, dielettrici perfetti. Teorema di Gauss e di Coulomb per il vettore spostamento elettrico, conservatività del campo elettrico in presenza dei dielettrici. Problema generale dell'elettrostatica in presenza di dielettrici, condizioni di raccordo di E e D sulla interfaccia fra due dielettrici diversi. Definizione operativa di E e D. Energia elettrostatica in presenza di dielettrici. Esempi: condensatore piano con più dielettrici all'interno, sfera carica immersa in un dielettrico, sfera carica circondata da un guscio di dielettrico, forza di risucchio di un dielettrico in un condensatore piano.

**Corrente elettrica stazionaria.** Definizione di corrente elettrica. Corrente elettrica come flusso del vettore densità di corrente attraverso una superficie, espressione microscopica del vettore densità di corrente. Conservazione della carica ed equazione di continuità. Correnti stazionarie, prima legge di Kirchoff relativa ai nodi nei circuiti. Legge di Ohm in forma locale e integrale, conduttività, resistività, resistenza, conduttanza, coefficiente di temperatura Il resistore come componente circuitale. Modello microscopico della conduzione, libero cammino medio ed espressione microscopica della conduttività. Lavoro del campo elettrostatico e potenza dissipata in un conduttore: effetto Joule. Densità di potenza dissipata in termini locali. Generatori elettrici: campo elettromotore e forza elettromotrice. Punto di lavoro del generatore. Forze contro elettromotrici. Resistenze in serie e in parallelo. Relazione tra capacità e resistenza di una porzione di spazio compresa fra due conduttori. Seconda legge di Kirchoff, metodo delle maglie per la risoluzione dei circuiti in corrente continua. Teorema di Thevenin. Correnti quasi stazionarie. Scarica e carica di un condensatore collegato ad un resistore: costante di tempo caratteristica, andamenti nel tempo delle grandezze corrente e carica, bilancio energetico.

**Fenomeni magnetici stazionari nel vuoto.** Fenomenologia delle forze magnetiche. Forza di Lorentz e definizione del vettore induzione magnetica (o campo magnetico). Invarianza relativistica della carica elettrica. Dinamica e traiettoria di particelle cariche in campo magnetico uniforme. Intrappolamento di particelle cariche in un campo magnetico. Il ciclotrone. Azioni meccaniche su circuiti percorsi da corrente stazionaria da un campo magnetico esterno. Momento magnetico di una spira, analogia con dipolo elettrico, energia potenziale meccanica di una spira immersa in un campo magnetico. Legge di Biot e Savart. Calcolo del campo magnetico prodotto da un tratto di filo rettilineo, da una spira circolare e da un solenoide finito (questi ultimi due sull'asse), da un nastro di corrente. Flusso del campo magnetico attraverso superfici chiuse. Seconda equazione di Maxwell. Solenoidalità delle linee di flusso del campo. Legge di Ampere sulla circuitazione del campo magnetico e la corrente concatenata. Quarta equazione di Maxwell nel caso stazionario. Applicazioni della legge di Ampère sulla circuitazione al calcolo del campo prodotto da un filo indefinito, anche con raggio finito, da una corrente piana e da un solenoide indefinito. Forze scambiate tra fili paralleli percorsi da corrente, definizione di Ampere. Potenziale scalare (cenni). Potenziale vettore, definizione, risoluzione dell'equazione, trasformazione di gauge, equazione generale. Potenziale vettore e campo magnetico generati da spira finita percorsa da corrente nel limite di grandi distanze (campo di un dipolo magnetico), e da un filo rettilineo indefinito percorso da corrente. Teorema di equivalenza di Ampere (solo enunciato). Effetto Hall.

**Magnetismo nella materia.** Spire di corrente microscopiche. Modello planetario dell'atomo di idrogeno. Momento magnetico e momento angolare. Quantizzazione del momento angolare. Magnetone di Bohr. Momento angolare di spin. Momento magnetico intrinseco di elettrone, protone e neutrone. Principio di esclusione di Pauli. Sostanze ferromagnetiche, paramagnetiche e diamagnetiche, classificazione. Vettore intensità di polarizzazione magnetica, correnti amperiane. Densità di corrente amperiana superficiale e volumica. Relazioni fondamentali fra vettore magnetizzazione e correnti microscopiche. Equazioni fondamentali della magnetostatica in presenza di materia, analogia con le equazioni dell'elettrostatica in presenza di dielettrici. Campo magnetico

H. Teorema della circuitazione di Ampère per  $H$ , applicazioni ad un filo e ad un solenoide indefiniti. Relazione tra  $B$  e  $H$ , permeabilità magnetica. Condizioni di raccordo per  $B$  e  $H$  sulle superfici di separazione fra mezzi materiali, applicazioni a materiali omogenei e isotropi immersi in un campo magnetico. Linee del campo  $B$  all'interno di materiali ferromagnetici. Proprietà macroscopiche dei materiali dia-, para- e ferromagnetici: equazioni costitutive della magnetizzazione, suscettività magnetica. Ciclo di isteresi per i materiali ferromagnetici. Relazione fra campo microscopico locale e campi macroscopici. Precessione di Larmor. Polarizzazione per orientamento e funzione di Langevin. Interpretazione microscopica del diamagnetismo, paramagnetismo e ferromagnetismo. Circuiti magnetici (cenni).

**Campi elettrici e magnetici dipendenti dal tempo.** Cenni sulle trasformazioni relativistiche dei campi elettrici e magnetici al variare del sistema di riferimento. Induzione elettromagnetica. Legge di Faraday-Neumann. Legge di Lenz. Interpretazione fisica del fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Flusso tagliato. Variazione del flusso dovuta al moto delle sorgenti del campo o a sorgenti variabili nel tempo. Forma locale della legge di Faraday-Neumann e terza equazione di Maxwell nel caso non stazionario. Fenomeno dell'autoinduzione e induttanza. Forza elettromotrice autoindotta. Induttanza di un solenoide e di un cavo coassiale. Circuito serie RL, extracorrente di apertura, analisi energetica. Legge di Felici. Induzione mutua. Energia e densità di energia magnetica. Energia magnetica e azioni meccaniche su circuiti. Circuiti accoppiati. Applicazioni al solenoide e a sistemi di spire. Cenni sui principi di funzionamento di alternatori, dinamo e motori elettrici. La quarta equazione di Maxwell nel caso non stazionario. Densità di corrente di spostamento.

**Onde elettromagnetiche.** Riepilogo delle equazioni di Maxwell nel vuoto ed in presenza di mezzi omogenei e isotropi. Equazioni di Maxwell nel vuoto in assenza di cariche e correnti localizzate. Equazioni delle onde elettromagnetiche. Generalità sulle onde: funzione rappresentativa di un'onda progressiva e regressiva, fronte d'onda, onde piane e sferiche, onde periodiche sinusoidali, ampiezza, fase e fase iniziale, periodo, lunghezza d'onda, frequenza, pulsazione, numero d'onda, velocità di fase. Caso di simmetria piana, equazione di D'Alembert. Notazione reale e complessa della funzione rappresentativa di un'onda. Velocità di propagazione di un'onda elettromagnetica nel vuoto e in un dielettrico. Indice di rifrazione. Onde elettromagnetiche piane: relazioni tra  $E$  e  $B$ , impedenza caratteristica del materiale, onde monocromatiche, vettore d'onda, densità di energia del campo elettrico e magnetico, onde stazionarie, riflessione di onde piane incidenti su conduttore piano ideale. Equazione e funzione di rappresentazione delle onde sferiche. Onde elettromagnetiche nei dielettrici: dipendenza dell'indice di rifrazione dalla frequenza dell'onda. Nomenclatura dello spettro elettromagnetico. Conservazione dell'energia e vettore di Poynting. Intensità istantanea e media di un'onda piana e sferica monocromatica. Quantità di moto di un'onda elettromagnetica. Pressione di radiazione. Relazione fra quantità di moto ed energia trasportata dall'onda. Momento angolare trasportato dall'onda elettromagnetica. Potenziali elettrodinamici. Gauge di Lorenz e equazioni d'onda dei potenziali. Potenziali ritardati. Cenni sulla covarianza relativistica dell'elettrodinamica. Radiazione emessa da un dipolo oscillante e da una carica in moto accelerato. Formula di Larmor e di Lienard.

Testo utilizzato nel corso:

Corrado Mencuccini Vittorio Silvestrini  
Fisica, Elettromagnetismo – Ottica  
Casa Editrice Ambrosiana

**Il programma comprende gli argomenti svolti nei primi nove capitoli nel testo (compresi gli esempi e gli approfondimenti).**

**Sono esclusi dal programma il Cap. 8 ed i seguenti paragrafi:** 1.13.; 2.7.; 4.7; 4.10; 4.11.; 4.12.; 4.13; 5.8.(cenni); 6.7.; 7.8; 9.7.; 9.11.; 9.13.; 9.14.; 9.16..

Sono inoltre esclusi i seguenti argomenti/approfondimenti:

- Approfondimento sulla polarizzabilità per orientamento di un gas o di un mezzo non denso, par. 3.2
- Campo elettromagnetico prodotto da una carica in moto rettilineo uniforme, par. 9.12.

Nota: per alcuni argomenti relativi alla corrente elettrica stazionaria, presenti nel programma e solo accennati nel corso, si fa riferimento a quanto svolto nel Corso di Laboratorio I.