



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA BIOMEDICA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Biomedica

Codice Python per risolvere problemi elettromagnetici a scopo didattico

Python code to solve electromagnetic problems for educational purposes

Relatore:

Prof. **FRANCO MOGLIE**

Tesi di Laurea di:

MATTIA DI ODOARDO

A.A. 2023 / 2024

Indice

1. Introduzione	4
2. Python	5
2.1 Numpy.....	6
2.2 Scipy.....	6
2.3 Matplotlib.....	7
2.4 Jupyter Notebook.....	8
3. Problemi elettromagnetici	9
3.1 Legge di Coulomb	9
3.2 Comportamento del Campo Elettrico	12
3.3 Campo elettrico generato da molteplici cariche puntuali...	15
3.4 Proprietà elettriche dei materiali	19
3.5 Comportamento del dielettrico.....	22
3.6 Onde Piane	23
3.7 Propagazione delle Onde Piane	24
3.8 Risoluzione Esercizio	26
3.9 Efficacia di Schermatura.....	29
Conclusione.....	50
Bibliografia.....	51

ABSTRACT

Negli ultimi anni, Python e Jupyter Notebook si sono affermati come strumenti fondamentali per la simulazione e l'analisi di fenomeni fisici, grazie alla loro flessibilità e facilità d'uso. Questa tesi esamina come Python possa essere utilizzato nella modellazione di fenomeni elettromagnetici, sfruttando librerie avanzate come NumPy, SciPy e Matplotlib per calcoli numerici e visualizzazioni grafiche. Viene mostrato come Python possa risolvere le equazioni di Maxwell e la legge di Coulomb, calcolare i campi elettrici prodotti da cariche puntiformi e descrivere la propagazione delle onde elettromagnetiche. Attraverso esempi pratici e casi studio, si evidenzia come Python possa migliorare la comprensione teorica e l'applicazione pratica dell'elettromagnetismo, fornendo un potente strumento per l'analisi di problemi complessi. Inoltre, la tesi sottolinea il potenziale di Python come risorsa educativa, rendendo l'apprendimento interattivo e accessibile per studenti e professionisti.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, l'applicazione della programmazione con le scienze fisiche ha aperto nuove strade per la comprensione e l'utilizzo di fenomeni complessi. In particolare, Python si è affermato come uno strumento potente e versatile, in grado di rendere molto più facili simulazioni, analisi e visualizzazioni in tutti i campi, incluso quello dell'elettromagnetismo, trattato in questa tesi. Mi propongo di esplorare l'utilizzo di Python e di Jupyter Notebook per modellare e analizzare fenomeni elettromagnetici, evidenziando le sue capacità di calcolo numerico e grafico. L'elettromagnetismo, una delle quattro forze fondamentali della natura, descrive l'interazione tra cariche elettriche e campi magnetici. Le sue leggi, espresse attraverso le equazioni di Maxwell, sono fondamentali per comprendere una vasta gamma di fenomeni, dall'ottica alle comunicazioni a radiofrequenza e alle applicazioni in ambito biomedicale. Tuttavia, la loro complessità spesso richiede approcci numerici per ottenere soluzioni pratiche. Qui entrano in gioco Jupyter Notebook e Python, con molti codici già scritti, come NumPy, SciPy e Matplotlib, offre strumenti potenti per la simulazione e l'analisi dei dati. Questa tesi si articolerà in diversi capitoli, che tratteranno sia gli aspetti teorici dell'elettromagnetismo che le applicazioni pratiche di Python per la sua modellazione. Attraverso esempi concreti e casi studio, spiegherò come Python possa non solo semplificare il lavoro degli scienziati e degli ingegneri, ma anche rendere l'apprendimento dell'elettromagnetismo più accessibile e interattivo. In conclusione, ci proponiamo di evidenziare il potenziale di Python come strumento educativo e professionale, capace di promuovere una comprensione più profonda delle leggi che governano il mondo elettromagnetico.

2. PYTHON

Python è un linguaggio di programmazione moderno, dalla sintassi semplice e potente che ne facilita l'apprendimento. Gli ambiti di applicazione di questo linguaggio di programmazione sono svariati: sviluppo di siti o applicazioni Web e desktop, realizzazione di interfacce grafiche, amministrazione di sistema, calcolo scientifico e numerico, database, giochi, grafica 3D, eccetera. Python è rinomato, diffuso e facile da apprendere in quanto nonostante sia un linguaggio potente non richiede moltissimo tempo per essere appreso; inoltre è open source: tutti lo possono utilizzare e modificare per le proprie necessità, evitando di richiedere codici di licenza.

È importante notare anche le situazioni in cui Python potrebbe non essere la scelta migliore. Essendo un linguaggio di alto livello, non è adatto per la programmazione di sistema, come la gestione di driver di dispositivi. Inoltre, poiché tutto in Python è trattato come un oggetto, ciò può influire negativamente sulle prestazioni. La tipizzazione dinamica, sebbene utile, potrebbe rappresentare un problema in un codice lungo e complesso. Inoltre, Python utilizza un Garbage Collector per la gestione della memoria, il che significa che non è necessario tenere traccia manualmente degli oggetti in RAM, ma questo processo automatico potrebbe influenzare il rendimento, rendendo consigliabile una gestione diretta in certe circostanze. Infine, il fatto che Python sia un linguaggio interpretato e non possa essere compilato e ottimizzato ha perso importanza grazie alla potenza di calcolo disponibile oggi.

2.1 NumPy

NumPy è il pacchetto fondamentale per il calcolo scientifico in Python. È una libreria Python che fornisce un oggetto array multidimensionale, vari oggetti derivati (come array mascherati e matrici) e un assortimento di routine per operazioni rapide sugli array, tra cui matematica, logica, manipolazione delle forme, ordinamento, selezione, I/O, trasformate di Fourier discrete, algebra lineare di base, operazioni statistiche di base, simulazione casuale e molto altro. Fornisce una potente serie di strumenti per lavorare con grandi matrici di dati numerici. Offrono supporto per grandi array multidimensionali, che consente agli utenti di eseguire calcoli complessi su grandi set di dati; supporta operazioni matematiche su array, come la moltiplicazione di matrice e l'algebra lineare.

2.2 SciPy

SciPy è un pacchetto software per il calcolo scientifico e tecnico a Python. È costruito sopra la popolare libreria di calcolo numerica NumPy, e usa lo stesso array multidimensionale come struttura base di dati. Una delle caratteristiche principali di SciPy è la sua libreria di ottimizzazione, che include funzioni per ridurre al minimo o massimizzare una determinata funzione, risolvere equazioni e modelli di adattamento ai dati. Le applicazioni scientifiche che utilizzano SciPy traggono vantaggio dallo sviluppo di moduli aggiuntivi in numerose nicchie del panorama software da parte di sviluppatori di tutto il mondo. Tutto, dalla programmazione parallela alle subroutine e alle classi del database e del web, è stato messo

a disposizione del programmatore Python. Tutto questo potere è disponibile in aggiunta alle librerie matematiche in SciPy.

2.3 Matplotlib

Matplotlib è una biblioteca completa per la creazione di visualizzazioni statiche, animate e interattive in Python.

- Crea grafici di qualità da pubblicazione.
- Crea figure interattive.
- Personalizza lo stile visivo e il layout.
- Esporta in molti formati di file.
- Utilizza una vasta gamma di pacchetti di terze parti basati su Matplotlib.

2.4 Jupyter Notebook

Jupyter è un ambiente di sviluppo integrato (IDE) che consente di scrivere, eseguire e condividere documenti interattivi contenenti codice, equazioni, visualizzazioni e testo descrittivo. Jupyter Notebook può essere utilizzato come un IDE per Python, sebbene non sia un IDE nel senso tradizionale. Supporta molti linguaggi di programmazione e offre funzionalità che si trovano comunemente negli IDE, come l'esecuzione di codice, la visualizzazione dei risultati, l'inserimento di annotazioni e commenti, e altre caratteristiche utili. Inoltre, è un'applicazione web open source, gestita localmente, che permette di sviluppare un progetto e offre supporto utile anche per lavorare nella data science. Un documento Jupyter Notebook è un file JSON, che segue uno schema con versione, che in genere termina con l'estensione ".ipynb". Le parti principali dei notebook Jupyter sono: metadati, formato notebook ed elenco di celle. I metadati sono un dizionario di definizioni di dati per configurare e visualizzare il notebook. Notebook Format è un numero di versione del software. L'elenco delle celle comprende diversi tipi di celle per Markdown (visualizzazione), codice (da eseguire) e output delle celle del tipo di codice.

3.PROBLEMI ELETTROMAGNETICI

3.1 Legge Di Coulomb

Le immagini che verranno presentate di seguito sono state ottenute utilizzando il software Jupyter Notebook da me impiegato per l'implementazione della Legge di Coulomb; saranno inoltre descritti i comandi e le funzioni usate. Verranno presentate le varie celle in formato codice 'Markdown' prima e dopo aver attivato la funzione 'Run' per la relativa esecuzione.



Fig.1

[Fig.1] Il nome del documento è “Legge Di Coulomb”; esso è stato scaricato nel formato “Notebook(.ipynb)” a partire da ‘File’—‘Download as’. Si possono inoltre osservare vari comandi intuitivi per la gestione delle celle.

```

1 # La Legge di Coulomb
2 * Coulomb tra il 1777 e il 1785 fece una serie di esperimenti e provò che la forza elettrica era proporzionale all'inverso del quadrato della distanza.
3 * In realtà gli stessi esperimenti furono condotti in precedenza da Cavendish, ma non li pubblicò.
4
5 * Questo è stato il primo tentativo di capire il funzionamento della forza elettrica.
6   ## Nel vuoto
7 La legge di Coulomb fornisce la forza fra due cariche elettriche in un mezzo illimitato lineare, omogeneo e isotropo
8 $$ \left| \mathbf{F} \right| = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} $$
9
10 La direzione della forza è sulla retta congiungente le due cariche.
11
12 Il verso della forza è attrattiva se le cariche sono di segno opposto, repulsiva se sono delle stesso segno

```

Fig.2

[Fig.2] La formattazione del testo in Markdown prevede l'uso di un asterisco all'inizio e alla fine del testo per ottenere il *corsivo* (italic). Per il grassetto (bold), si utilizzano due asterischi. Inoltre, un singolo asterisco prima di un testo consente di creare un elenco puntato. **[Fig.3]** Facendo eseguire il codice mediante il tasto 'Run' per le celle si ottiene:

La legge di Coulomb

- Nello spazio vuoto, la forza tra due cariche è proporzionale al prodotto dei loro valori q_1 e q_2 ed è inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza r .
- Essa è diretta lungo la congiungente delle due cariche.
- La forza è repulsiva se le cariche hanno lo stesso segno, attrattiva se diverso.
- La formula può essere estesa per cariche in presenza di altri materiali e non puntiformi.

Nel vuoto

La legge di Coulomb fornisce la forza fra due cariche elettriche in un mezzo illimitato lineare, omogeneo e isotropo

$$|\mathbf{F}| = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

La **direzione** della forza è sulla retta congiungente le due cariche.

Il **verso** della forza è attrattiva se le cariche sono di segno opposto, repulsiva se sono delle stesso segno

Fig.3

L'inserimento di un immagine in una cella può essere effettuato a partire da "Edit"- "Insert Image".

![caricheCoulomb2.png.jpg](attachment:82c2e180-e001-4c50-a879-7e787a267933.jpg)

Il risultato è mostrato in **[Fig.4]**, dove viene riportata la direzione della forza, intesa come la congiungente tra le due cariche elettriche e infine il verso che può essere interno tra le due cariche se hanno segno opposto, (discordi); mentre sarà esterno rispetto alle due cariche se esse hanno il medesimo segno (accordi). Le due forze che si instaurano tra le cariche, F_{12} e F_{21} , sono uguali in modulo e in direzione ma hanno verso opposto.

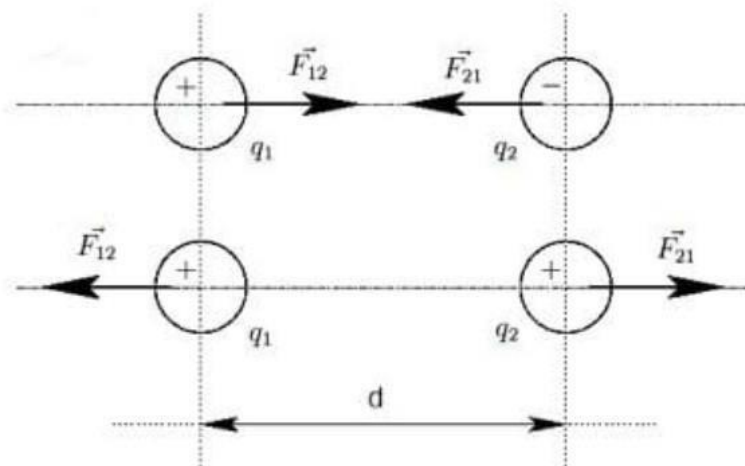
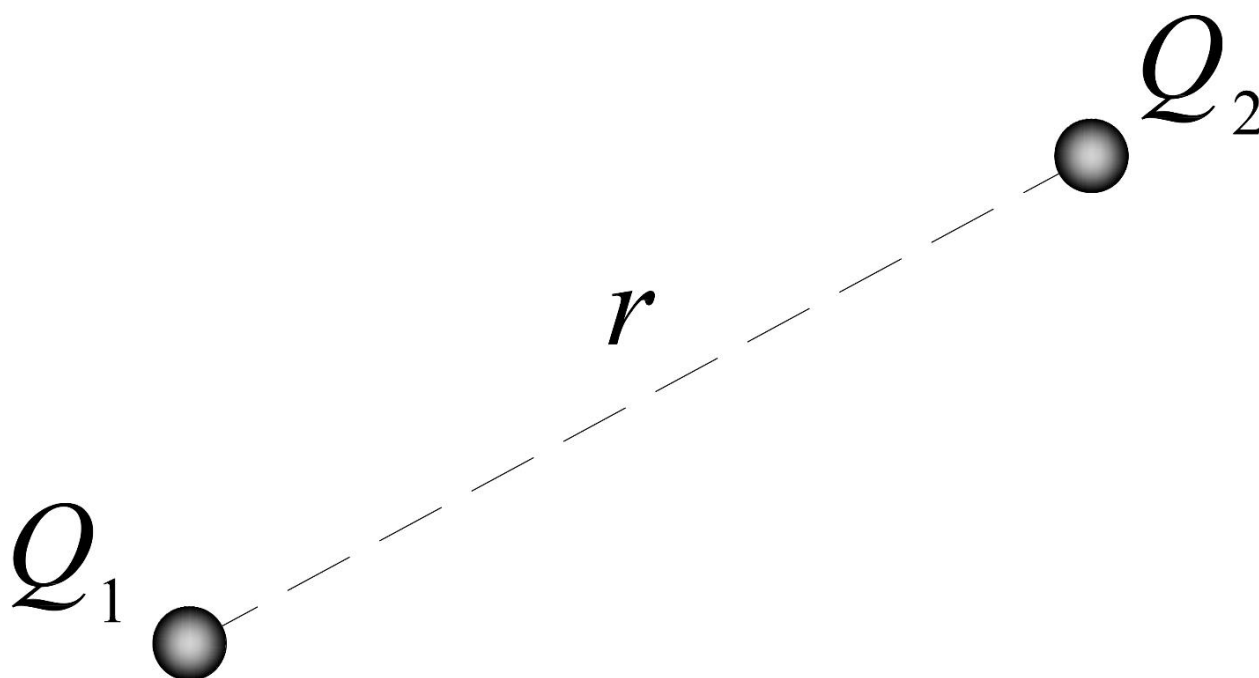


Fig.4



3.2 Comportamento del campo elettrico

Abbiamo visto come la carica elettrica genera un campo elettrico che varia con la distanza secondo la legge di Coulomb.

Il comportamento del campo elettrico può essere sintetizzato nei seguenti punti:

1. Inversamente proporzionale al quadrato della distanza:

- Man mano che la distanza R aumenta, il campo elettrico E diminuisce secondo la legge dell'inverso del quadrato. Ciò significa che raddoppiando la distanza, il campo elettrico diventa un quarto di quello precedente.

2. Direzione:

- La direzione del campo elettrico è radiale, allontanandosi dalla carica se essa è positiva e avvicinandosi se è negativa.

3. Valore del campo:

- Se la carica q è maggiore, il campo elettrico sarà più forte a qualsiasi distanza data.

È possibile creare un grafico per descrivere queste dipendenze e questo comportamento attraverso Jupyter in questo modo:

📄 + 🔍 📄 ▶ ■ ↻ ▶▶ Code ▾

```
[3]: %matplotlib inline

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.constants as scp

# Definizione della carica
q = 1e-6 # Carica in coulomb
k = 1 / (4 * np.pi * scp.epsilon_0)

# Distanze da 0.01 m a 1 m
distanze = np.linspace(0.01, 1, 100)
campi_elettrici = k * q / distanze**2 # Calcolo del campo elettrico

# Creazione del grafico
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(distanze, campi_elettrici, label=f'Campo Elettrico di una carica {q} C')
plt.title('Campo Elettrico in Funzione della Distanza')
plt.xlabel('Distanza (m)')
plt.ylabel('Campo Elettrico (N/C)')
plt.ylim(0, np.max(campi_elettrici) * 1.1) # Limita l'asse y per migliorare la visualizzazione
plt.grid()
plt.axhline(0, color='black', linewidth=0.5, ls='--')
plt.axvline(0, color='black', linewidth=0.5, ls='--')
plt.legend()
plt.show()
```

Dove:

- I. **Importazioni:** Importiamo NumPy per la manipolazione numerica e Matplotlib per il plotting.
- II. **Definizione dei Dati:** Calcoliamo i valori del campo elettrico in funzione della distanza dalla carica.
- III. **Creazione del Grafico:** Utilizziamo `plt.plot()` per tracciare i dati, e aggiungiamo titolo, etichette e griglia.
- IV. **Visualizzazione:** `plt.show()` per visualizzare il grafico.

Ottengo così tale grafico in **[Fig.5]**:

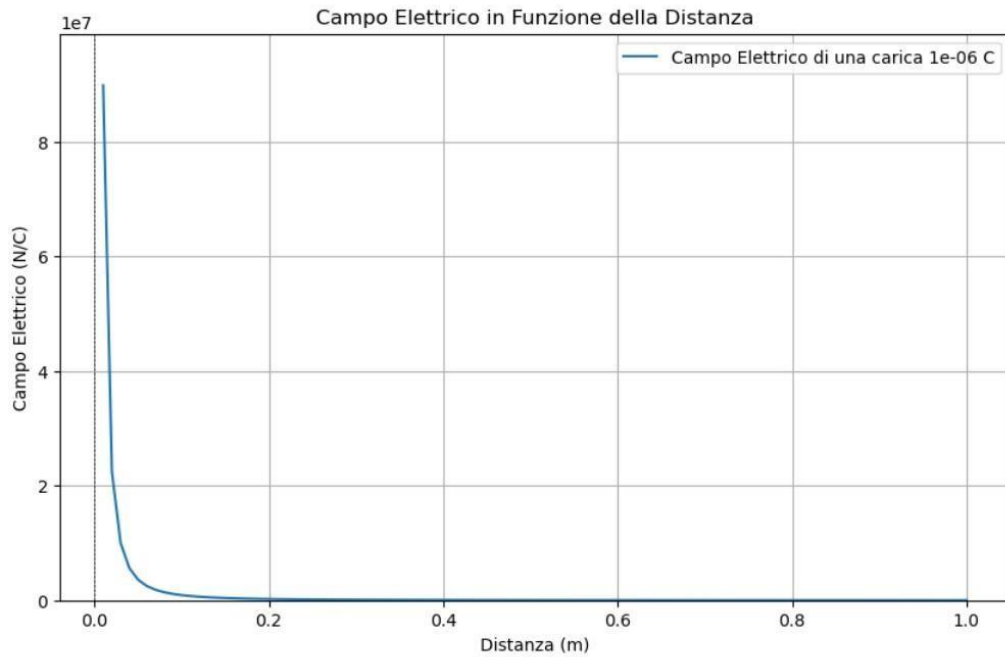


Fig.5

Dove l'asse X rappresenta la distanza tra le cariche in metri, mentre l'asse Y rappresenta il valore del campo elettrico misurato in N/C. Si può notare che il campo elettrico decresce rapidamente all'aumentare della distanza, evidenziando l'influenza della distanza sulla forza elettrica.

3.3 Campo elettrico generato da molteplici cariche puntuali

L'espressione per il campo elettrico E creato da una carica puntiforme è:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R^2}$$

Dove:

- E è il campo elettrico in newton per coulomb (N/C).
- q è la carica elettrica in coulomb (C).
- R è la distanza tra la carica e il punto P in metri (m).
- ϵ_0 è la permittività elettrica del vuoto, circa $8.854 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N m}^2$.

Con Jupyter posso calcolare il campo elettrico E generato da una carica q a distanza R con questo codice **[Fig.6]**:

```
import numpy as np
import scipy.constants as scp

def campo_elettrico(q, R):
    """
    Calcola il campo elettrico E generato da una carica q a distanza R.

    Parametri:
    q : float : valore della carica in coulomb
    R : float : distanza dalla carica in metri

    Restituisce:
    float : campo elettrico in N/C
    """
    return q / (4 * np.pi * scp.epsilon_0 * R**2)

# Esempio di utilizzo
q = 1e-6 # Carica in coulomb (1 microcoulomb)
R = 0.1 # Distanza in metri (10 cm)

E = campo_elettrico(q, R)
print(f"Il campo elettrico a distanza {R} m dalla carica di {q} C è: {E:.2e} N/C")
```

Il campo elettrico a distanza 0.1 m dalla carica di 1e-06 C è: 8.99e+05 N/C

Fig.6

In questo modo si può calcolare il campo elettrico utilizzando la legge di Coulomb e in aggiunta vi è riportato un esempio di utilizzo, supponendo una carica di $1\mu\text{C}$ e la distanza di $0,1\text{m}$. È possibile eseguire questo codice per calcolare il campo elettrico in diversi punti, modificando i valori di q e R a secondo della necessità.

Per calcolare il campo elettrico risultante in un punto a causa di più cariche, è necessario sommare i campi elettrici generati da ciascuna carica in quel punto: sarà necessario specificare le cariche, le loro posizioni e i loro valori, utilizzare la formula per calcolare il campo elettrico generato da ciascuna carica nel punto di interesse e infine sommare i vettori del campo elettrico per ottenere il campo elettrico totale. Implementando questo con Jupyter avrò come codice:

```
import numpy as np
import scipy.constants as scp

class Carica:
    def __init__(self, valore, posizione):
        self.value = valore # Valore della carica in coulomb
        self.position = np.array(posizione) # Posizione come array numpy

    def forza(self, altra_carica):
        k = 1 / (4 * np.pi * scp.epsilon_0) # Costante di Coulomb
        distanza_vector = self.position - altra_carica.position
        distanza = np.linalg.norm(distanza_vector) # Distanza tra le cariche

        if distanza == 0:
            raise ValueError("La distanza tra le cariche non può essere zero.")

        # Calcola il vettore della forza
        forza_magnitudine = k * self.value * altra_carica.value / distanza**2
        forza_vector = forza_magnitudine * (distanza_vector / distanza) # Direzione della forza

        return forza_vector

    def campo_elettrico(self, punto):
        k = 1 / (4 * np.pi * scp.epsilon_0) # Costante di Coulomb
        distanza_vector = punto - self.position
        distanza = np.linalg.norm(distanza_vector)

        if distanza == 0:
            raise ValueError("La distanza dalla carica non può essere zero.")

        # Calcola il vettore del campo elettrico
        campo_magnitudine = k * self.value / distanza**2
        campo_elettrico_vector = campo_magnitudine * (distanza_vector / distanza) # Direzione del campo

        return campo_elettrico_vector
```

Dove:

1. **Funzione campo elettrico:** calcola il campo elettrico generato da una carica specificata in una posizione data.
2. **Definizione delle Cariche:** le cariche sono definite in un elenco con il loro valore e posizione.
3. **Calcolo del Campo Totale:** il campo elettrico totale è ottenuto sommando i campi elettrici di tutte le cariche nel punto specificato.

4. **Esecuzione:** quando esegui il notebook, il codice stamperà il campo elettrico totale nel punto specificato.

E' possibile modificare le cariche e le loro posizioni per esplorare diverse configurazioni. Di seguito è riportato un esempio di utilizzo eseguito con Jupyter, in cui all'interno del blocco "**main**" sono definite quattro cariche elettriche:

- **$q1$** **$q2$** sono negative con lo stesso valore, posizionate a coordinate diverse lungo l'asse x.
- **$q3$** e **$q4$** sono cariche positive, anch'esse con lo stesso valore ma posizionate in punti diversi nello spazio.

Dopo di che viene calcolata la forza esercitata dalla carica $q1$ sulla carica $q2$ attraverso la funzione **forza** che restituisce un vettore che rappresenta la forza, che viene poi stampato. Se le cariche sono vicine, il vettore avrà una grandezza significativa, mentre se sono lontane, sarà più piccolo. In aggiunta viene calcolato il campo elettrico generato da ciascuna carica in un punto specifico, ovvero l'origine (0, 0, 0). Per ciascuna carica, la funzione campo elettrico restituisce un vettore che rappresenta il campo elettrico a quel punto. In seguito, si sommano i vettori dei campi elettrici generati da ciascuna carica per ottenere il campo elettrico totale nell'origine. Questo permette di vedere come le diverse cariche influenzano il campo elettrico in un punto specifico. Infine, il codice stampa i campi elettrici generati da ciascuna carica e il campo elettrico totale nell'origine. I risultati sono in volt per metro (V/m), che è l'unità di misura del campo elettrico.

```

# Esempio di utilizzo
if __name__ == "__main__":
    # Definizione delle cariche
    q1 = Carica(-0.035e-6, [1, 0, 2.5]) # Carica 1
    q2 = Carica(-0.035e-6, [-1, 0, 2.5]) # Carica 2
    q3 = Carica(0.035e-6, [0.1, 0, -2]) # Carica 3
    q4 = Carica(0.035e-6, [-1, 0, -2]) # Carica 4

    # Calcolo delle forze
    forza_q1_q2 = q1.forza(q2)
    print("Forza tra q1 e q2:", forza_q1_q2)

    # Calcolo dei campi elettrici nell'origine (0, 0, 0)
    punto = np.array([0.0, 0.0, 0.0])
    e_field_q1 = q1.campo_elettrico(punto)
    e_field_q2 = q2.campo_elettrico(punto)
    e_field_q3 = q3.campo_elettrico(punto)
    e_field_q4 = q4.campo_elettrico(punto)

    campo_elettrico_totale = e_field_q1 + e_field_q2 + e_field_q3 + e_field_q4

    print("Campo elettrico dovuto a q1 nel punto:", e_field_q1, "V/m")
    print("Campo elettrico dovuto a q2 nel punto:", e_field_q2, "V/m")
    print("Campo elettrico dovuto a q3 nel punto:", e_field_q3, "V/m")
    print("Campo elettrico dovuto a q4 nel punto:", e_field_q4, "V/m")
    print("Campo elettrico totale nel punto:", campo_elettrico_totale, "V/m")

Forza tra q1 e q2: [2.75243774e-06 0.00000000e+00 0.00000000e+00]
Campo elettrico dovuto a q1 nel punto: [16.11396591 -0.          40.28491478] V/m
Campo elettrico dovuto a q2 nel punto: [-16.11396591 -0.          40.28491478] V/m
Campo elettrico dovuto a q3 nel punto: [-3.91735465  0.          78.34709303] V/m
Campo elettrico dovuto a q4 nel punto: [28.13548746  0.          56.27097492] V/m
Campo elettrico totale nel punto: [ 24.21813281  0.          215.18789752] V/m

```

3.4 Proprietà elettriche dei materiali

I parametri elettromagnetici costitutivi di un mezzo materiale sono:

- la **permittività** ϵ ;
- la **conducibilità** σ ;
- la **permeabilità** μ .

Di seguito ho riportato i principali parametri elettromagnetici che caratterizzano un mezzo materiale implementandoli attraverso Jupyter in formato Markdown **[Fig.7-8]** che viene utilizzato per formattare testo in modo semplice e intuitivo, e successivamente ho eseguito la cella **[Fig.9-10]**.

```

# Conducibilità Elettrica

La conducibilità elettrica è una misura della capacità di un materiale di condurre corrente elettrica. Essa è l'inverso della resistività e dipende dalla natura del materiale e dalla sua temperatura.

### Definizione
La conducibilità è definita come il rapporto tra la densità di corrente (J) e il campo elettrico applicato (E):


$$\sigma = J/E$$


### Unità di Misura
L'unità di misura della conducibilità elettrica è il siemens per metro (S/m).

## Fattori che Influenzano la Conducibilità
1. Tipo di materiale: I metalli, come il rame e l'argento, hanno alta conducibilità, mentre materiali come la gomma hanno bassa conducibilità.
2. Temperatura: In genere, la conducibilità dei metalli diminuisce con l'aumento della temperatura, mentre per i semiconduttori e i materiali isolanti può aumentare.
3. Impurità: La presenza di impurità nel materiale può influenzare significativamente la sua conducibilità.

```

Fig.7

```

# Permittività Elettrica

La permittività elettrica è una proprietà fondamentale dei materiali che misura la loro capacità di consentire il passaggio di un campo elettrico. Essa indica quanto un materiale può influenzare il campo elettrico che lo attraversa.

### Definizione
La permittività è un parametro che determina quanto un campo elettrico può essere "ridotto" o "attenuato" da un materiale. Si definisce come il rapporto tra il campo elettrico applicato ( $E$ ) e la densità di carica elettrica ( $D$ ) che si forma all'interno del materiale:


$$D = \epsilon E$$


### Unità di Misura
L'unità di misura della permittività è il farad per metro (F/m).

## Applicazioni
- Condensatori: La permittività dei materiali dielettrici utilizzati nei condensatori influisce sulla loro capacità.
- Materiali Dielettrici: In ingegneria elettrica e elettronica, la scelta dei materiali è spesso basata sulla loro permittività.

```

Fig.8

Conducibilità Elettrica

La **conducibilità elettrica** è una misura della capacità di un materiale di condurre corrente elettrica. Essa è l'inverso della resistività e dipende dalla natura del materiale e dalla sua temperatura.

Definizione

La conducibilità è definita come il rapporto tra la densità di corrente (J) e il campo elettrico applicato (E):

$$\sigma = J/E$$

Unità di Misura

L'unità di misura della conducibilità elettrica è il **siemens per metro (S/m)**.

Fattori che Influenzano la Conducibilità

- Tipo di materiale**: I metalli, come il rame e l'argento, hanno alta conducibilità, mentre materiali come la gomma hanno bassa conducibilità.
- Temperatura**: In genere, la conducibilità dei metalli diminuisce con l'aumento della temperatura, mentre per i semiconduttori e i materiali isolanti può aumentare.
- Impurità**: La presenza di impurità nel materiale può influenzare significativamente la sua conducibilità.

Permittività Elettrica

La **permittività elettrica** è una proprietà fondamentale dei materiali che misura la loro capacità di consentire il passaggio di un campo elettrico. Essa indica quanto un materiale può influenzare il campo elettrico che lo attraversa.

Definizione

La permittività è un parametro che determina quanto un campo elettrico può essere "ridotto" o "attenuato" da un materiale. Si definisce come il rapporto tra il campo elettrico applicato (E) e la densità di carica elettrica (D) che si forma all'interno del materiale:

$$D = \epsilon E$$

Unità di Misura

L'unità di misura della permittività è il **farad per metro (F/m)**.

Applicazioni

- **Condensatori:** La permittività dei materiali dielettrici utilizzati nei condensatori influisce sulla loro capacità.
- **Materiali Dielettrici:** In ingegneria elettrica e elettronica, la scelta dei materiali è spesso basata sulla loro permittività.

Fig.9-10

Tabella 4.1 Conducibilità di alcuni materiali comuni a 20°.	
Materiale	Conducibilità, σ (S/m)
<i>Conduttori</i>	
Argento	6.2×10^7
Rame	5.8×10^7
Oro	4.1×10^7
Alluminio	3.5×10^7
Ferro	10^7
Mercurio	10^6
Carbonio	3×10^4
<i>Semiconduttori</i>	
Germanio puro	2.2
Silicio puro	4.4×10^{-4}
<i>Isolanti</i>	
Vetro	10^{-12}
Paraffina	10^{-15}
Mica	10^{-15}
Quarzo fuso	10^{-17}

Ho anche inserito questa tabella che indica la conducibilità di alcuni materiali a 20°, e possiamo notare i materiali si possano classificare come **conduttori** (metalli) o **dielettrici** (isolanti) a seconda della loro conducibilità. Quest'ultima dipende da diversi fattori, compresa la temperatura e la presenza di impurità; in generale nei matelli crescere al decrescere della temperatura.

3.5 Comportamento del dielettrico

Conduttori e Dielettrici

Un **conduttore** possiede un elevato numero di elettroni negli orbitali più esterni degli atomi, che possono muoversi liberamente. In assenza di un campo elettrico, questi elettroni si spostano in modo casuale a diverse velocità, generando corrente elettrica.

Al contrario, nei **dielettrici**, gli elettroni sono saldamente legati agli atomi, rendendo difficile il loro distacco, anche in presenza di un campo elettrico.

Un dielettrico ideale ha una conducibilità σ pari a zero.

Tuttavia essi possono essere **polarizzati** distorcendo la posizione dei nuclei: vengono rappresentati come un **dipolo elettrico** formato da una carica $+q$ positiva al centro dei nuclei e da una $-q$ negativa nel centro della nuvola elettronica.

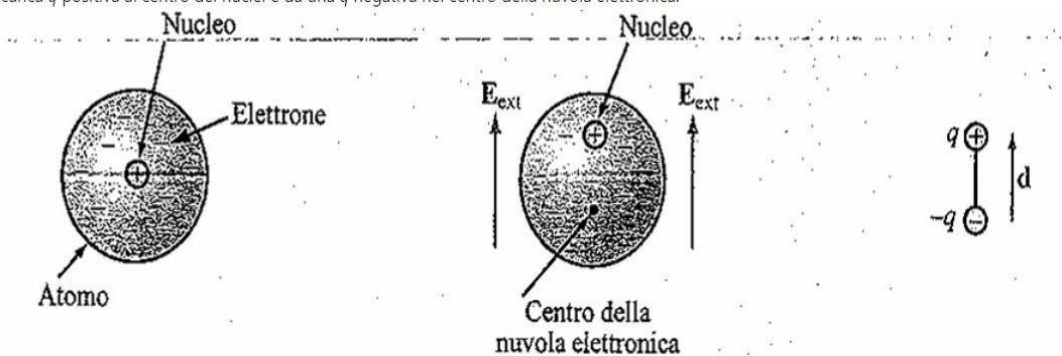
[!\[/dielettrici.jpg\]\(attachment:d20f1501-d7aa-4841-8828-cd1e07b06d5e.jpg\)](#)

Nella cella ho riportato le differenze principali tra un conduttore e un dielettrico al passaggio di corrente ed il suo comportamento atomico, avvalendomi anche dell'inserimento di una immagine. Eseguendo la cella in questione ottengo:

Conduttori e Dielettrici

Un **conduttore** possiede un elevato numero di elettroni negli orbitali più esterni degli atomi, che possono muoversi liberamente. In assenza di un campo elettrico, questi elettroni si spostano in modo casuale a diverse velocità, generando corrente elettrica.

Al contrario, nei **dielettrici**, gli elettroni sono saldamente legati agli atomi, rendendo difficile il loro distacco, anche in presenza di un campo elettrico. Un dielettrico ideale ha una conducibilità σ pari a zero. Tuttavia essi possono essere **polarizzati** distorcendo la posizione dei nuclei: vengono rappresentati come un **dipolo elettrico** formato da una carica q positiva al centro dei nuclei e da una $-q$ negativa nel centro della nuvola elettronica.



3.6 Onde Piane

Successivamente ho trattato le caratteristiche fondamentali delle onde piane e i parametri che le caratterizzano, dapprima in formato 'Markdown' [Fig.11] e in seguito ho eseguito la cella corrispondente come mostrato in [Fig.12].

```
**ONDE PIANE**

Sono una naturale conseguenza di molti processi fisici.
Esse possiedono alcune proprietà comuni, infatti le onde in moto trasportano energia da un punto all'altro, e con una certa velocità si possono propagare lungo una superficie o anche attraverso un volume.
Quelle tridimensionali possono essere: piane, cilindriche o sferiche.
Quelle piane sono caratterizzate da una perturbazione che nel tempo ha proprietà uniformi su un piano infinito perpendicolare alla direzione della propagazione dell'onda.
I parametri costitutivi di un'onda piana sono:
1. Ampiezza (A)
• Rappresenta l'escursione massima dell'onda rispetto alla posizione di equilibrio. Maggiore è l'ampiezza, più intensa è l'onda.
2. Frequenza (f)
• Indica il numero di oscillazioni complete dell'onda che si verificano in un secondo, misurata in hertz (Hz).
3. Periodo (T)
• È l'inverso della frequenza ed è il tempo necessario per completare un'oscillazione.
4. Lunghezza d'onda ( $\lambda$ )
• È la distanza tra due punti consecutivi in fase sull'onda. È correlata alla frequenza e alla velocità dell'onda dalla relazione  $v=f\cdot\lambda$  dove v è la velocità dell'onda.
5. Velocità di propagazione (v)
• È la velocità alla quale l'onda si propaga attraverso il mezzo. Può dipendere dal tipo di onda e dal mezzo in cui si propaga.
6. Fase ( $\phi$ )
• Indica la posizione di un punto sull'onda in un dato momento, misurata in radianti. La fase determina l'orientamento dell'onda nel tempo e nello spazio.
7. Direzione di propagazione
• Indica la direzione in cui l'onda si muove nel suo ambiente.
```

Fig.11

ONDE PIANE

Sono una naturale conseguenza di molti processi fisici. Esse possiedono alcune proprietà comuni, infatti le onde in moto trasportano energia da un punto all'altro, e con una certa velocità si possono propagare lungo una superficie o anche attraverso un volume. Quelle tridimensionali possono essere: piane, cilindriche o sferiche. Quelle piane sono caratterizzate da una perturbazione che nel tempo ha proprietà uniformi su un piano infinito perpendicolare alla direzione della propagazione dell'onda. I parametri costitutivi di un'onda piana sono:

1. **Ampiezza (A)** • Rappresenta l'escursione massima dell'onda rispetto alla posizione di equilibrio. Maggiore è l'ampiezza, più intensa è l'onda.
2. **Frequenza (f)** • Indica il numero di oscillazioni complete dell'onda che si verificano in un secondo, misurata in hertz (Hz).
3. **Periodo (T)** • È l'inverso della frequenza ed è il tempo necessario per completare un'oscillazione.
4. **Lunghezza d'onda (λ)** • È la distanza tra due punti consecutivi in fase sull'onda. È correlata alla frequenza e alla velocità dell'onda dalla relazione $v=f\cdot\lambda$ dove v è la velocità dell'onda.
5. **Velocità di propagazione (v)** • È la velocità alla quale l'onda si propaga attraverso il mezzo. Può dipendere dal tipo di onda e dal mezzo in cui si propaga.
6. **Fase (ϕ)** • Indica la posizione di un punto sull'onda in un dato momento, misurata in radianti. La fase determina l'orientamento dell'onda nel tempo e nello spazio.
7. **Direzione di propagazione** • Indica la direzione in cui l'onda si muove nel suo ambiente.

Fig.12

3.7 Propagazione Onde Piane

La propagazione delle onde è un fenomeno fisico che descrive come le onde si muovono attraverso vari mezzi, trasportando energia e informazione. In particolare, le onde elettromagnetiche (EM) sono oscillazioni dei campi elettrici e magnetici che si propagano attraverso lo spazio e che dunque non necessitano di un mezzo per estendersi.

La propagazione, dunque, può avvenire attraverso mezzi con perdite, i quali dissipano energia durante la propagazione dell'onda, principalmente a causa di conduzione elettrica e polarizzazione. Le onde, infatti, subiscono attenuazione, cioè la loro ampiezza diminuisce nel tempo e nello spazio e ciò può portare a distorsioni e cambiamenti nella forma dell'onda.

Le equazioni di Maxwell descrivono come i campi elettrici e magnetici si comportano e interagiscono. Sono fondamentali per capire la propagazione delle onde elettromagnetiche, in questo caso specifico le equazioni di Maxwell devono includere termini di attenuazione. La costante di propagazione γ è complessa e comprende una parte reale (attenuazione) e una parte immaginaria (fase): $\gamma=\alpha+j\beta$.

In tal caso la velocità di propagazione e l'attenuazione dipendono dalla conducibilità σ : $\alpha = \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$ e $\beta = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$.

L'impedenza può variare con la frequenza e dipendere dalla perdita di energia nel mezzo.

Le onde in mezzi con perdite sono più rilevanti in applicazioni pratiche, come le comunicazioni e l'acustica, dove l'attenuazione e le distorsioni devono essere gestite.

Altrimenti la trasmissione delle onde può verificarsi mediante mezzi senza perdita, detti ideali poiché non dissipano energia durante la propagazione delle onde, le quali, dunque, non subendo alcuna attenuazione, mantengono costante la loro ampiezza e forma nel tempo.

Le equazioni di Maxwell possono essere utilizzate senza considerare termini di attenuazione. La velocità di propagazione è determinata solo dalla permittività e dalla permeabilità del mezzo: $u_p = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$.

Mentre l'impedenza del mezzo è costante e non dipende dalla frequenza.

Nella seguente tabella possiamo trovare i parametri che caratterizzano la propagazione delle onde attraverso vari tipi di materiali.

Espressioni di α , β , η_c , u_p e λ per vari tipi di mezzi.				
Mezzo qualsiasi	Mezzo senza perdite ($\sigma = 0$)	Mezzo a basse perdite ($\epsilon''/\epsilon' \ll 1$)	Buon conduttore ($\epsilon''/\epsilon' \gg 1$)	Unità di misura
$\alpha = \omega \left[\frac{\mu\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} - 1 \right] \right]^{1/2}$	0	$\frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\sqrt{\pi f \mu \sigma}$	(Np/m)
$\beta = \omega \left[\frac{\mu\epsilon'}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'}\right)^2} + 1 \right] \right]^{1/2}$	$\omega \sqrt{\mu\epsilon}$	$\omega \sqrt{\mu\epsilon}$	$\sqrt{\pi f \mu \sigma}$	(rad/m)
$\eta_c = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \left(1 - j \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^{-1/2}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$	$(1+j) \frac{\alpha}{\sigma}$	(Ω)
$u_p = \omega/\beta$	$1/\sqrt{\mu\epsilon}$	$1/\sqrt{\mu\epsilon}$	$\sqrt{4\pi f / \mu \sigma}$	(m/s)
$\lambda = 2\pi/\beta = u_p/f$	u_p/f	u_p/f	u_p/f	(m)

Note: $\epsilon' = \epsilon$; $\epsilon'' = \sigma/\omega$; nello spazio libero $\epsilon = \epsilon_0$, $\mu = \mu_0$; nella pratica, un materiale è considerato un mezzo a basse perdite se $\epsilon''/\epsilon' = \sigma/\omega\epsilon < 0.01$ e un buon conduttore se $\epsilon''/\epsilon' > 100$.

3.8 Risoluzione Esercizio

In questa sezione, presenterò la soluzione di un esercizio specifico, che illustra l'uso di Python per risolvere un problema pratico.

L'esercizio in questione richiede l'implementazione di un algoritmo per analizzare un insieme di dati, applicando tecniche di programmazione e strumenti di visualizzazione. Utilizzeremo librerie come NumPy e Scipy per gestire i dati e generare grafici che facilitino l'interpretazione dei risultati.

Attraverso questo approccio, dimostreremo come Jupyter non solo semplifichi il processo di scrittura e test del codice, ma favorisca anche un apprendimento attivo e coinvolgente.

```
[33]: testo = """
Un'onda piana polarizzata linearmente si propaga lungo l'asse z positivo in un mezzo con costante dielettrica
 $\epsilon_r = 10.0$  e  $\sigma = 0.1$  S/m alla frequenza  $f = 1$  GHz. Il campo elettrico è diretto lungo l'asse y e per  $z=0$  vale  $E = 1.2 + j0.3$  V/m. Si calcoli il fasore del campo elettrico E per  $z = 0$  e del campo magnetico H per  $z = 10$  cm. Si indichi anche la direzione e il verso di H.
"""

print(testo)
```

```
Un'onda piana polarizzata linearmente si propaga lungo l'asse z positivo in un mezzo con costante dielettrica
 $\epsilon_r = 10.0$  e  $\sigma = 0.1$  S/m alla frequenza  $f = 1$  GHz. Il campo elettrico è diretto lungo l'asse y e per  $z=0$  vale  $E = 1.2 + j0.3$  V/m. Si calcoli il fasore del campo elettrico E per  $z = 0$  e del campo magnetico H per  $z = 10$  cm. Si indichi anche la direzione e il verso di H.
```

Fig.13

Vogliamo ora implementare, attraverso Jupyter, un esempio di esercizio sull'onda piana, il cui testo è riportato in **[Fig.13]**.

Esercizio Onde Piane

NB: unità di misura nel sistema internazionale (SI) in tutte le soluzioni

```
[28]: import numpy as np
import scipy.constants as scp
import math
import cmath
print("pi =", scp.pi)
print("eps0 =", scp.epsilon_0)
print("mu0 =", scp.mu_0)

pi = 3.141592653589793
eps0 = 8.8541878128e-12
mu0 = 1.25663706212e-06
```

Fig.14

[Fig.14] Qui Il codice importa le librerie necessarie e stampa alcune costanti fisiche fondamentali. In particolare, stampa delle costanti, quali π , ϵ_0 (costante dielettrica nel vuoto), μ_0 (permeabilità nel vuoto).

Esercizio 1 Un'onda piana ..

```
[6]: def materiale (epsr, mur, sigma, freq):
    sig = sigma
    omega = 2.0 * scp.pi * freq
    epsilon1 = scp.epsilon_0 * epsr
    epsilon2 = sig / omega
    epsc = epsilon1 - epsilon2 * 1j
    mu = mur * scp.mu_0
    tgd = epsilon2 / epsilon1
    tgd2 = tgd**2
    alfa = omega * np.sqrt (mu * epsilon1 * 0.5 * (np.sqrt (1 + tgd2) - 1))
    beta = omega * np.sqrt (mu * epsilon1 * 0.5 * (np.sqrt (1 + tgd2) + 1))
    gamma = alfa + beta * 1j
    eta = np.sqrt (mur * scp.mu_0 / epsc)
    return gamma, eta, alfa, beta, tgd, epsc
```

Fig.15

In **[Fig.15]** la funzione *materiale* calcola vari parametri relativi a un materiale in base alla sua costante dielettrica relativa (ϵ_r), permeabilità relativa, conducibilità (σ) e frequenza.

Dapprima viene calcolata la frequenza angolare ω , poi la costante dielettrica assoluta del materiale, la parte immaginaria della costante dielettrica, legata alla conducibilità e la costante dielettrica complessa, che tiene conto delle perdite nel materiale. Dopo di che calcola la permeabilità

assoluta del materiale, la tangente dell'angolo di perdita, che indica le perdite del materiale, le costanti di attenuazione, di fase e quella complessa di attenuazione; e infine l'impedenza del materiale.

Come output La funzione restituisce:

- *gamma*: Costante complessa di propagazione (m^{-1}).
- *eta*: Impedenza del materiale (Ω).
- *alfa*: Costante di attenuazione (Np/m).
- *beta*: Costante di fase (rad/m).
- *tgδ*: Tangente dell'angolo di perdita.
- *epsc*: Costante dielettrica complessa (F/m).

```
[8]: # Calcolo della costante di propagazione
er = 6
mur = 1
sigma = 0.075
frequenza = 0.5E9
gamma, eta, alfa, beta, tgδ, epsc = materiale(er, mur, sigma, frequenza)
print('Costante dielettrica complessa = %7.3g + j %7.3g F/m' % (epsc.real, epsc.imag))
print('Rapporto = %7.3g' % (tgδ))
print('Gamma = %4.3g + j %4.3g 1/m' % (gamma.real, gamma.imag))
print('Eta = %4.3g + j %4.3g 1/m' % (eta.real, eta.imag))

Costante dielettrica complessa = 5.31e-11 + j -2.39e-11 F/m
Rapporto = 0.449
Gamma = 5.63 + j 26.3 1/m
Eta = 144 + j 30.8 1/m
```

Fig.16

Con questo codice **[Fig.16]** ho la definizione il calcolo e la stampa dei parametri citati precedentemente.

```

L1a = 144 * j * 0.01 / m
[10]: # Calcolo dei fasori del campo elettrico per z=0 cm (E0) e magnetico per z=10 cm (H10)
z10 = 0.05
E0 = 2.4 + 0.35j
print('At z = %4.3g (m)' % (0))
print('E modulo = %4.3g V/m, E fase = %4.3g deg' % (abs(E0), cmath.phase(E0) * 180 / scp.pi))
E10 = E0 * np.exp(-gamma * z10)
H10 = E10 / eta
print('At z = %4.3g (m)' % (z10))
print('E10 modulo = %4.3g V/m, E10 fase = %4.3g deg' % (abs(E10), cmath.phase(E10) * 180 / scp.pi))
print('H10 modulo = %4.3g A/m, H10 fase = %4.3g deg' % (abs(H10), cmath.phase(H10) * 180 / scp.pi))

At z = 0 (m)
E modulo = 2.43 V/m, E fase = 8.3 deg
At z = 0.05 (m)
E10 modulo = 1.83 V/m, E10 fase = -67 deg
H10 modulo = 0.0125 A/m, H10 fase = -79.1 deg

```

Fig.17

Infine, in **[Fig.17]** ho inserito il codice che calcola e stampa i fasori del campo elettrico **E** e del campo magnetico **H** in un materiale specifico in una posizione specifica imposta dall'esercizio.

In conclusione, questa implementazione è utile per analizzare la propagazione dei campi elettrici e magnetici in un materiale, mostrando come cambiano i valori di modulo e fase a diverse posizioni.

3.9 Efficacia di Schermatura

L'efficacia di schermatura si riferisce alla capacità di un materiale di ridurre o bloccare i campi elettrici, i campi magnetici o le onde elettromagnetiche. Questo concetto è fondamentale in vari settori, come l'elettronica, la telecomunicazione e la protezione delle persone dalle radiazioni.

Fattori che Influenzano l'Efficacia di Schermatura

1. **Materiale:** La scelta del materiale è cruciale. I materiali conduttivi (come rame e alluminio) sono efficaci contro le onde elettromagnetiche, mentre i materiali ferromagnetici (come il ferro) sono più adatti per schermare i campi magnetici statici o a bassa frequenza.
2. **Spessore:** Maggiore è lo spessore del materiale, migliore sarà la schermatura. Tuttavia, ci sono limiti pratici e costi associati all'aumento dello spessore.
3. **Frequenza:** L'efficacia della schermatura può variare con la frequenza dell'onda. I materiali possono essere più o meno efficaci a diverse frequenze.
4. **Geometria:** La forma e la configurazione del materiale schermante possono influenzare la sua capacità di ridurre il campo. Ad esempio, una schermatura continua è generalmente più efficace rispetto a una schermatura discontinua.
5. **Interfacce:** La qualità delle interfacce tra diversi materiali (ad esempio, giunzioni saldate o adesive) può influenzare la perdita di schermatura.

L'efficacia di schermatura è solitamente espressa in decibel (dB) e può essere calcolata utilizzando la formula:

$$SE_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{E_1}{E_2} \right)$$
 dove E_1 esprime l'ampiezza del campo elettrico in un punto della regione di interesse prima del posizionamento dello schermo; mentre E_2 esprime l'ampiezza del campo elettrico nello stesso punto, dopo il posizionamento dello schermo. Analogamente è possibile sostituire tali valori di campo elettrico con H_1 e H_2 , ossia col campo magnetico.

Il comportamento di un campo elettromagnetico varia a seconda della distanza dalla sorgente e può essere suddiviso in due zone principali:

1. Zona dei Campi Reattivi (o Zona di Induzione)

- **Caratteristiche:** questa area si trova nelle immediate vicinanze della sorgente, dove i campi elettrico e magnetico devono essere analizzati separatamente. In questa regione, i campi non sono ancora "slegati" dalla sorgente stessa.
- **Interazione con Materiali:** è necessario valutare come questi campi interagiscono con gli oggetti materiali considerando ciascun campo in modo indipendente.
- **Impedenza caratteristica:** il rapporto tra le ampiezze dei campi elettrici e magnetici (detto impedenza caratteristica) dipende dalle caratteristiche tecniche della sorgente. In questa zona, i campi sono influenzati da effetti reattivi, come l'induzione.

2. Zona dei Campi Radiativi

- **Caratteristiche:** Questa zona si trova a distanze superiori alla lunghezza d'onda della sorgente, dove i campi elettrico e magnetico non sono più direttamente legati alla sorgente.
- **Interazione dei Campi:** In questa regione, i campi elettrici e magnetici interagiscono tra loro, dando origine al campo elettromagnetico. È qui che si sviluppano le onde elettromagnetiche.
- **Propagazione:** Nella zona radiativa, l'impedenza caratteristica è determinata esclusivamente dalle proprietà del mezzo in cui il campo si propaga. Le componenti elettrica e magnetica si influenzano reciprocamente, generando onde che si propagano nel mezzo.

Essendo la nostra sorgente un'onda piana, andremo a considerare esclusivamente la zona di campo lontano.

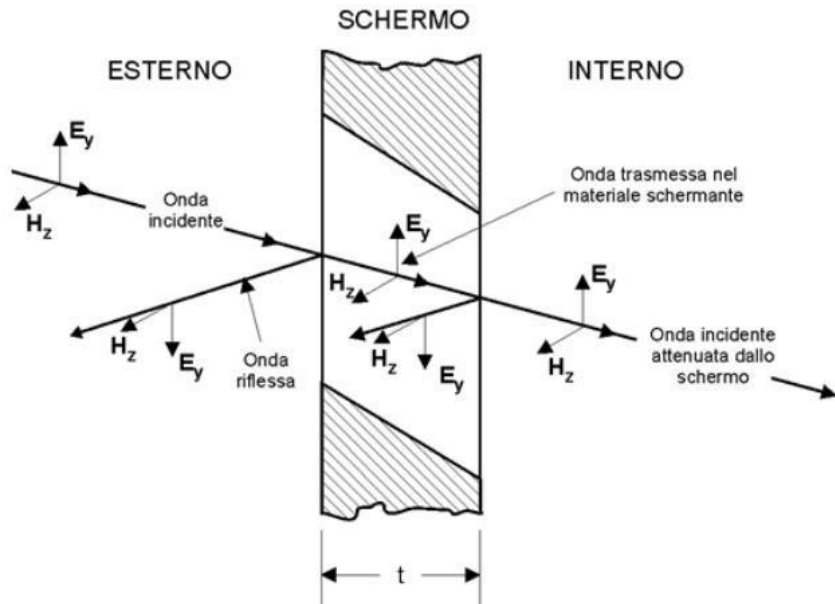
L'impedenza caratteristica dipende unicamente dalle caratteristiche in

cui il mezzo si propaga: $\zeta = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$

Nel vuoto invece occorre inserire la ϵ_0 (costante dielettrica (8,854 pF/m)) e la permeabilità magnetica assoluta $\mu_0 = 0,4\pi \mu\text{H/m}$.

Lo schermo ideale

Per *schermo ideale* si intende una lastra piana omogenea indefinita e di spessore uniforme.



L'onda viene in parte riflessa, in parte trasmessa. La perdita di potenza associata alla prima riflessione è indicata con $R_{dB}^{(1)} (\geq 0)$.

L'onda trasmessa nel materiale schermante subisce un'attenuazione dovuta alla dissipazione di energia per effetto Joule, $A_{dB} (\geq 0)$.

Sulla seconda interfaccia l'onda subisce una seconda riflessione e una conseguente attenuazione $R_{dB}^{(2)} (\geq 0)$.

Il contributo all'efficacia schermante dovuto alle riflessioni multiple sarà: $B_{dB} (\leq 0)$.

Dunque l'efficacia schermante dipende dal contributo di questi fenomeni:

$$SE_{dB} = R_{dB}^{(1)} + A_{dB} + R_{dB}^{(2)} + B_{dB}.$$

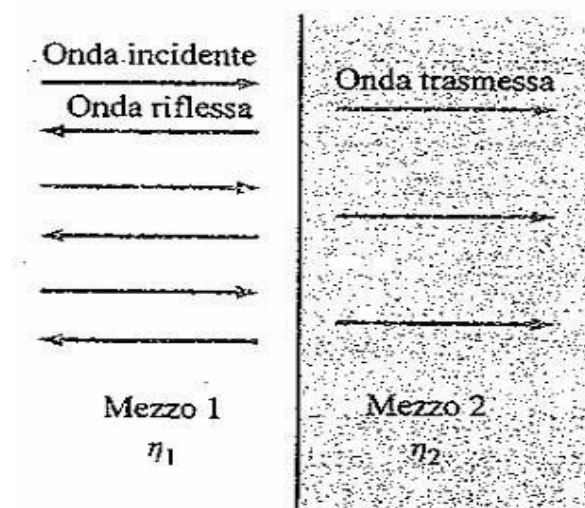
Come abbiamo visto l'efficacia di schermatura è strettamente legata ai fenomeni di riflessione e trasmissione delle onde. I materiali progettati per schermare onde elettromagnetiche devono ottimizzare la riflessione,

minimizzare la trasmissione e massimizzare l'assorbimento per essere realmente efficaci.

- **Riflessione:** una parte dell'onda incidente viene riflessa all'interfaccia tra i due materiali. La quantità di energia riflessa è influenzata dall'impedenza del materiale. Se l'impedenza del materiale schermante è molto diversa da quella dell'ambiente circostante, una grande frazione dell'onda sarà riflessa.
- **Trasmissione:** la parte dell'onda che non viene riflessa può essere trasmessa attraverso il materiale. Se il materiale non è efficace nella schermatura, una quantità significativa di onda passerà attraverso di esso.

Incidenza Normale

Quando si parla di onde con incidenza normale, si fa riferimento a situazioni in cui un'onda (come la luce o onde sonore) colpisce un'interfaccia tra due materiali perpendicolarmente, cioè con un angolo di incidenza di 0 gradi rispetto alla normale alla superficie.



Quando un'onda incontra un'interfaccia in modo normale, può essere riflessa o trasmessa. I coefficienti di riflessione (ρ) e trasmissione (τ) possono essere calcolati usando le impedenze (η_1 e η_2) dei due materiali:

- **Coefficiente di Riflessione:** esprime la frazione di potenza dell'onda incidente che viene riflessa.

$$\rho = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1}$$

Se $\rho=1$ l'onda viene riflessa totalmente, mentre se $\rho=0$ l'onda non viene riflessa e di fatto l'onda viene trasmessa totalmente.

- **Coefficiente di Trasmissione:** rappresenta la frazione di potenza dell'onda incidente che viene trasmessa nel secondo mezzo.

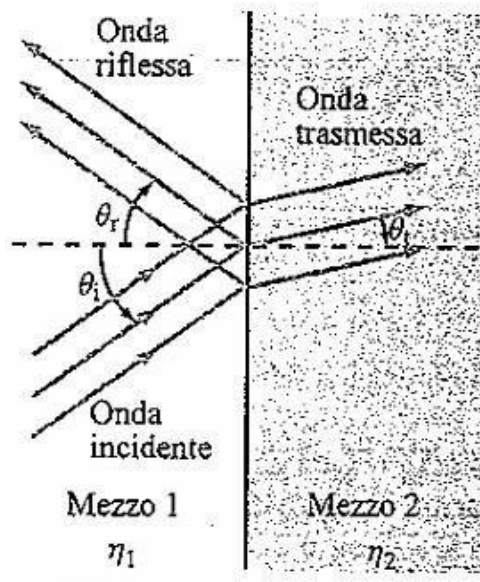
$$r = \frac{2\eta_2}{\eta_2 + \eta_1}$$

La somma della potenza riflessa e trasmessa deve uguagliare la potenza incidente. Pertanto, la seguente relazione è valida:

$$r = 1 + \rho$$

Questa espressione indica che la potenza totale è conservata.

Incidenza Obliqua

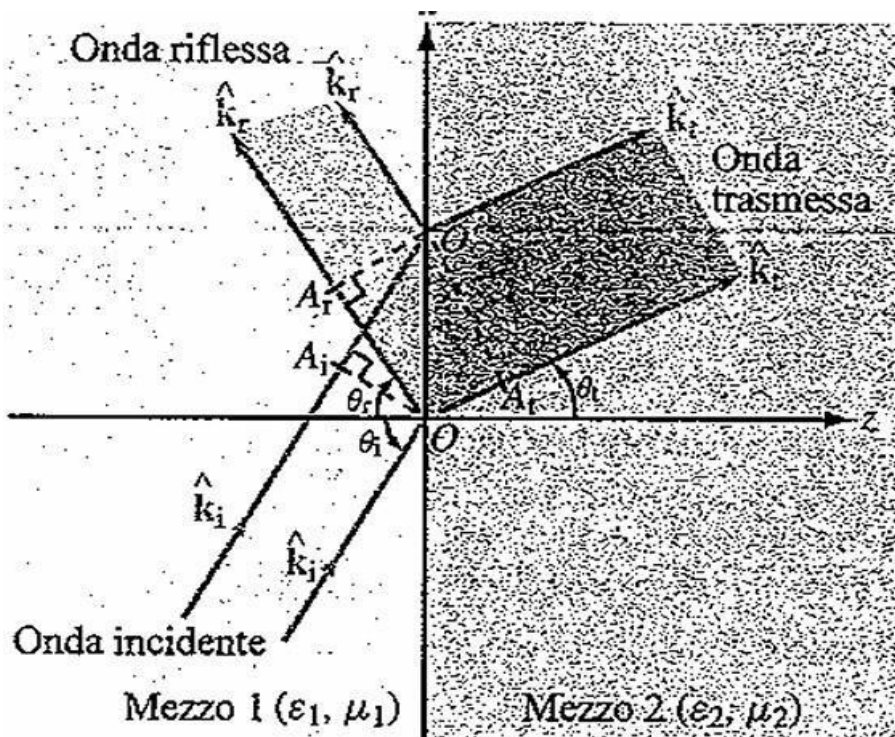


L'incidenza obliqua si verifica quando un'onda colpisce un'interfaccia con un angolo diverso da 90° rispetto alla normale alla superficie. L'angolo di incidenza (θ_i) è l'angolo tra il raggio incidente e la normale. In questo caso,

si verificano fenomeni di riflessione e rifrazione che possono essere descritti dalla **legge di Snell**, che si articola in due principi:

- *Legge della Riflessione* che afferma che l'angolo di riflessione è uguale a quello di incidenza --> $\theta_i = \theta_r$
- *Legge della Rifrazione* che stabilisce un legame tra $\sin\theta_i$ e $\sin\theta_t$ in termini del rapporto tra le velocità di fase --> $\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \sqrt{\frac{\mu_1 \epsilon_1}{\mu_2 \epsilon_2}}$

L'indice di rifrazione è un parametro fondamentale che descrive come le onde si propagano attraverso un materiale. È definito come il rapporto tra la velocità della luce nel vuoto e la velocità della luce nel materiale: $n = \frac{c}{u_p}$



Nel caso di incidenza normale ($\theta_i=0$) dalla legge di Snell si evince che $\theta_t=0$, mentre per l'incidenza obliqua si ha $\theta_t < \theta_i$ quando $n_1 < n_2$ e $\theta_t > \theta_i$ quando $n_1 > n_2$. Questo comporta che se l'onda nel mezzo 1 incide su un mezzo più denso **[Fig.18(a)]**, l'onda trasmessa si rifrange verso l'interno verso l'asse z; mentre è vero il contrario se l'onda incide su un mezzo meno denso **[Fig.18(b)]**. Se $\theta_t=\pi/2$, come si vede in **[Fig.18(c)]**,

l'onda rifratta si propaga parallelamente alla superficie e non viene trasmessa energia all'interno del mezzo 2.

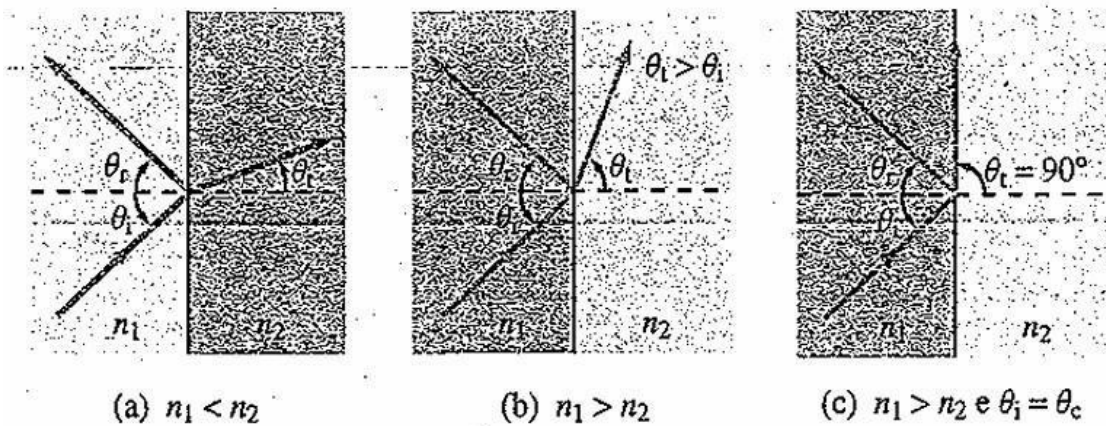
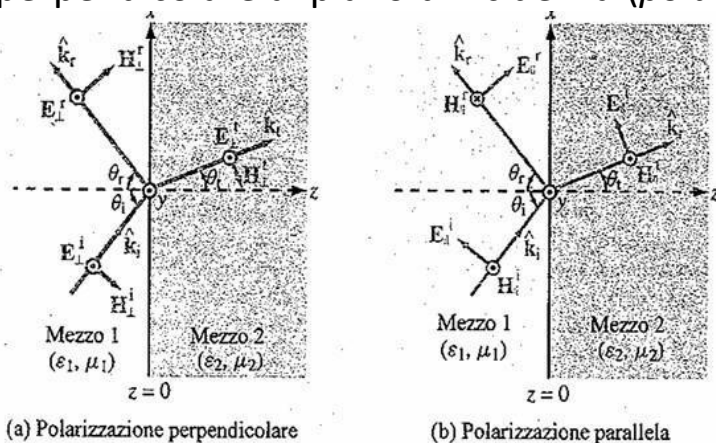
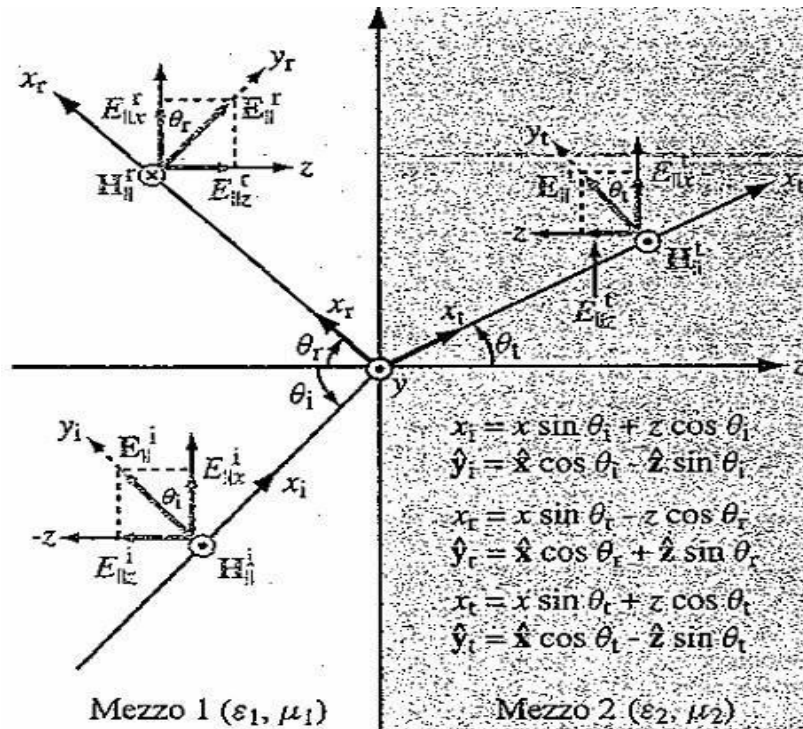


Fig.18

Nel caso di incidenza normale, il coefficiente di riflessione e di trasmissione all'interfaccia tra due mezzi diversi sono indipendenti dalla polarizzazione dell'onda incidente, in quanto i campi elettromagnetici di un'onda piana normale incidente sono sempre tangenti all'interfaccia a prescindere dalla polarizzazione dell'onda; questo non accade nel caso di incidenza obliqua. Un'onda polarizzata si può descrivere come sovrapposizione di due onde polarizzate ortogonalmente l'una rispetto all'altra, una delle quali ha il campo elettrico parallelo al piano d'incidenza (*polarizzazione parallela*) e un'altra col campo elettrico perpendicolare al piano d'incidenza (*polarizzazione perpendicolare*).



Polarizzazione Parallela

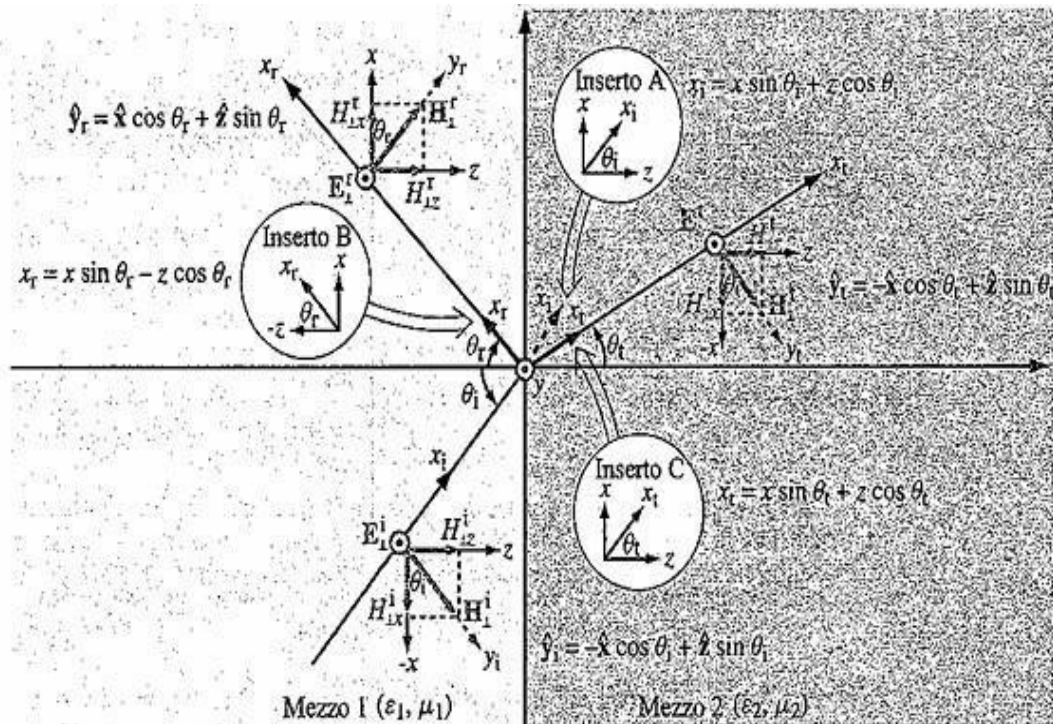


Qui i campi elettrici giacciono nel piano d'incidenza e i campi magnetici associati sono a esso perpendicolari. Con questa configurazione si ottengono le seguenti espressioni dei *coefficienti di riflessione e trasmissione per la polarizzazione parallela*:

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{E_{\parallel 0}^r}{E_{\parallel 0}^i} = \frac{\eta_2 \cos \theta_t - \eta_1 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i},$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{E_{\parallel 0}^t}{E_{\parallel 0}^i} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_t + \eta_1 \cos \theta_i}.$$

Polarizzazione Perpendicolare



Qui il fasore del campo elettrico punta in direzione y e il fasore del campo magnetico associato è rivolto lungo l'asse y_i .

Con questa considerazione ottengo le seguenti espressioni *dei coefficienti di riflessione e di trasmissione per la propagazione perpendicolare*:

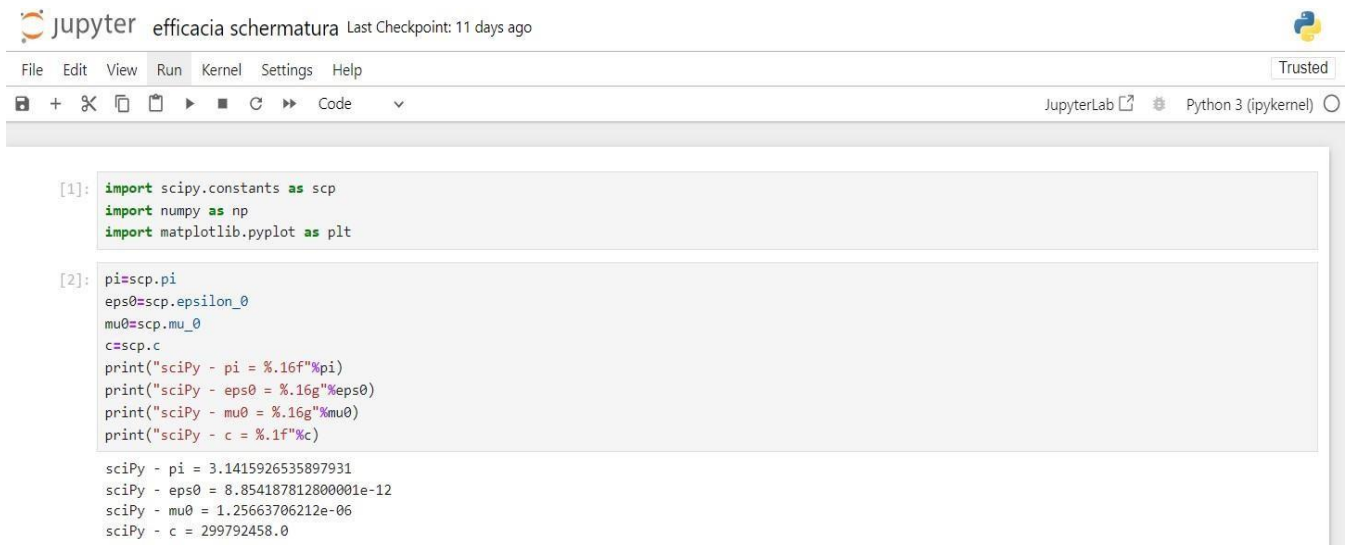
$$\Gamma_{\perp} = \frac{E_{10}^r}{E_{10}^i} = \frac{\eta_2 \cos \theta_i - \eta_1 \cos \theta_t}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t},$$

$$\tau_{\perp} = \frac{E_{10}^t}{E_{10}^i} = \frac{2\eta_2 \cos \theta_i}{\eta_2 \cos \theta_i + \eta_1 \cos \theta_t}.$$

Questi coefficienti sono legati dalla seguente relazione:

$$\tau_{\perp} = 1 + \Gamma_{\perp}$$

Implementazione con Jupyter



```
[1]: import scipy.constants as scp
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

[2]: pi=scp.pi
eps0=scp.epsilon_0
mu0=scp.mu_0
c=scp.c
print("sciPy - pi = %.16f"%pi)
print("sciPy - eps0 = %.16g"%eps0)
print("sciPy - mu0 = %.16g"%mu0)
print("sciPy - c = %.1f"%c)

sciPy - pi = 3.1415926535897931
sciPy - eps0 = 8.854187812800001e-12
sciPy - mu0 = 1.25663706212e-06
sciPy - c = 299792458.0
```

Attraverso Jupyter ho implementato un esempio che riguarda l'efficacia di schermatura, in questa prima parte di codice ho importato le costanti fisiche da `scipy.constants` e ho stampato i valori di π , ϵ_0 (permettività del vuoto), μ_0 (permeabilità del vuoto) e c (velocità della luce nel vuoto).

```
[3]: def materiale (strato):
    epsr=strato[1]
    mur=strato[2]
    sigma=strato[3]
    omega=2*scp.pi*freq
    epsr2=sigma/(omega*scp.epsilon_0)
    tgd2=(epsr2**2)/(epsr**2)
    alfa=omega * np.sqrt (mur * scp.mu_0 * epsr * scp.epsilon_0 * 0.5 * (np.sqrt (1 + tgd2) - 1))
    beta=omega * np.sqrt (mur * scp.mu_0 * epsr * scp.epsilon_0 * 0.5 * (np.sqrt (1 + tgd2) + 1))
    gamma=alfa + beta * 1j
    eta=np.sqrt (mur * scp.mu_0 / ((epsr - epsr2 * 1j) * scp.epsilon_0))
    return gamma, eta
```

In questa cella ho definito la funzione ***materiale*** che calcola alcuni parametri elettromagnetici per un dato `strato`: la costante dielettrica relativa del materiale, la permeabilità relativa, la conducibilità, la frequenza angolare, i coefficienti di attenuazione e di fase, il coefficiente di propagazione complesso e l'impedenza caratteristica.

La funzione restituisce il coefficiente di propagazione complesso γ e l'impedenza caratteristica η del materiale.

```
[4]: def snell (n1,n2,ti):
      theta_inc=ti
      n1=n1
      n2=n2
      theta_rifl=theta_inc
      arg=np.sin(theta_inc)*n1/n2
      if (arg>1):
          theta_rifr=scp.pi
      else:
          theta_rifr=np.arcsin(arg)
      return theta_rifl, theta_rifr
```

Qui la funzione **Snell** implementa la legge di Snell per la rifrazione della luce, calcolando gli angoli di riflessione e rifrazione in base agli indici di rifrazione dei due materiali e all'angolo di incidenza.

```
[9]: def interf_obl_perp (e1,e2,t1,t2):
      eta1=e1
      eta2=e2
      theta1=t1
      theta2=t2
      rho = (eta2*np.cos(theta1)-eta1*np.cos(theta2))/(eta2*np.cos(theta1)+eta1*np.cos(theta2))
      tt = 1 + rho
      return rho, tt
```

```
[10]: def interf_obl_par (e1,e2,t1,t2):
      eta1=e1
      eta2=e2
      theta1=t1
      theta2=t2
      rho = (eta2*np.cos(theta2)-eta1*np.cos(theta1))/(eta2*np.cos(theta2)+eta1*np.cos(theta1))
      tt = (1 + rho) * np.cos(theta1) / np.cos(theta2)
      return rho, tt
```

Nella cella [9] la funzione **interf_obl_perp** è stata sviluppata per calcolare il coefficiente di riflessione e il coefficiente di trasmissione per onde che attraversano un'interfaccia tra due materiali. Questa funzione assume che i materiali siano isotropi e che la luce sia incidente perpendicolarmente.

Nella cella [10], invece, la funzione *interf_obl_par* calcola i coefficienti di riflessione e trasmissione per un'onda polarizzata parallelamente all'interfaccia tra due materiali.

```
def campi (gamma, thick, rho, tt, e_p, e_m):
    gamma=gamma
    thick=thick
    e_p=e_p
    e_m=e_m
    rho=rho
    tt=tt
    exp_piu = np.exp (gamma * thick)
    exp_meno = np.exp (- gamma * thick)
    e_piu = (exp_piu * e_p + rho * exp_meno * e_m) / tt
    e_meno = (rho * exp_piu * e_p + exp_meno * e_m) / tt
    return e_piu, e_meno
```

Qui la funzione *campi* calcola i campi elettrici E_- negativo e E_+ positivo di un materiale in base ai parametri di attenuazione, spessore e coefficienti di riflessione e trasmissione.

```
[12]: def SE_obl_perp(freq,ti):
    theta_m[0]=ti
    for i in range(nstrati):
        n[i]=np.sqrt(strati[i][1]*strati[i][2])
        gamma[i],eta[i]=materiale(strati[i])

    for i in range(1,nstrati,1):
        theta_rifl,theta_m[i]=snell(n[i-1],n[i],theta_m[i-1])
    for i in range(nstrati-1):
        rho[i],tt[i]=interf_obl_perp(eta[i],eta[i+1],theta_m[i-1],theta_m[i])
    i=nstrati-1
    e_p[i] = 1 + 0j;
    e_m[i] = 0 + 0j;
    for i in range(nstrati-2, -1, -1):
        e_p[i], e_m[i] = campi (gamma[i+1], strati[i+1][4]/np.cos(theta_m[i+1]), rho[i], tt[i], e_p[i+1], e_m[i+1])
    SE_lin = np.abs(e_p[0])
    return SE_lin
```

La funzione *SE_obl_perp* gestisce il calcolo della propagazione di un'onda elettromagnetica in un sistema di strati, considerando gli effetti di riflessione e trasmissione attraverso ogni interfaccia. Per prima cosa viene impostato l'angolo di incidenza, poi vengono inseriti dei vettori per

memorizzare gli indici di rifrazione, le costanti di propagazione e le impedenze intrinseche per ogni strato.

Il ciclo calcola l'angolo di rifrazione e aggiorna l'angolo di incidenza per ciascun strato successivo usando la legge di Snell. Dopo viene calcolato il coefficiente di riflessione e il coefficiente di trasmissione per ogni interfaccia. La funzione, infine, calcola iterativamente i campi elettrici per gli strati precedenti usando la funzione ***campi*** così da avere come output il valore assoluto dell'ampiezza del campo elettrico nel primo strato.

```
def SE_obl_par(freq,ti):
    theta_m[0]=ti
    for i in range(nstrati):
        n[i]=np.sqrt(strati[i][1]*strati[i][2])
        gamma[i],eta[i]=materiale(strati[i])

    for i in range(1,nstrati,1):
        theta_rifl,theta_m[i]=snell(n[i-1],n[i],theta_m[i-1])
    for i in range(nstrati-1):
        rho[i],tt[i]=interf_obl_par(eta[i],eta[i+1],theta_m[i-1],theta_m[i])
    i=nstrati-1
    e_p[i] = 1 + 0j;
    e_m[i] = 0 + 0j;
    for i in range(nstrati-2, -1, -1):
        e_p[i], e_m[i] = campi (gamma[i+1], strati[i+1][4]/np.cos(theta_m[i+1]), rho[i], tt[i], e_p[i+1], e_m[i+1])
    SE_lin = np.abs(e_p[0])
    return SE_lin
```

Qui la funzione ***SE_obl_par*** calcola la propagazione delle onde elettromagnetiche in un mezzo stratificato in condizioni di incidenza obliqua. Il primo ciclo calcola l'indice di rifrazione e le proprietà ottiche per ciascuno strato. Il secondo applica la legge di Snell per calcolare gli angoli di rifrazione per ciascun strato successivo. Anche qui come output restituisce il valore assoluto dell'ampiezza del campo elettrico nel primo strato.

```

]: nstrati=3
theta_iniziale=85/180*np.pi
n=[0]*nstrati
gamma=[0]*nstrati
eta=[0]*nstrati
theta_m=[0]*nstrati
theta_m[0]=theta_iniziale
tt=[0]*(nstrati-1)
rho=[0]*(nstrati-1)
e_p=[0]*(nstrati)
e_m=[0]*(nstrati)
#strati = [("aria 1",1,1,0,0),
#          ("alluminio",1,1,3.8e7,25e-9), #alluminio
#          ("aria 2",1,1,0,0.01218),

strati = [("aria 1",1,1,0,0),
          ("alluminio",1,1,3.8e7,25e-6),
          ("aria 2",1,1,0,0.015),]

#freq=1e9
freq = np.linspace ( start = 100e6 # Lower Limit (Hz)
                    , stop = 10e9 # upper Limit (Hz)
                    , num = 501 # generate 501 points between 0 and 3
                    )

for i in range(nstrati):
    n[i]=np.sqrt(strati[i][1]*strati[i][2])
    gamma[i],eta[i]=materiale(strati[i])
    # print("Materiale:",strati[i][0]," - Indice di rifrazione =",np.round(n[i]))
    # print("Materiale:",strati[i][0]," - Costante di propagazione =",np.round(gamma[i],2),"(1/m), Impedenza caratteristica =",np.round(eta[i],2),"ohm")
for i in range(1,nstrati,1):
    theta_rifl,theta_m[i]=snell(n[i-1],n[i],theta_m[i-1])
for i in range(nstrati-1):
    rho[i],tt[i]=interf_obl_perp(eta[i],eta[i+1],theta_m[i-1],theta_m[i])
    # print("Interfaccia:",i," - Coefficiente di trasmissione =",np.round(tt[i],5)," Coefficiente di riflessione =",np.round(rho[i],5))
i=nstrati-1

```

Nella prima parte vengono inizializzate le variabili d'interesse come il numero di strati (in questo caso 3), l'angolo di incidenza iniziale, e gli array per gli indici di rifrazione, le costanti di propagazione, le impedenze, gli angoli di rifrazione e i campi elettrici. In seguito, si definisce la lista di materiali (strati) in cui si propagano le onde. Ogni strato ha un nome e parametri fisici (come permittività dielettrica relativa, permeabilità magnetica relativa e spessore) In questo caso ho definito:

- **"aria 1"**: Primo strato d'aria, con proprietà base.
- **"alluminio"**: con permittività e permeabilità relativa pari ad 1, un'alta conducibilità di 3.8×10^7 S/m e uno spessore di 25 μm .
- **"aria 2"**: Secondo strato d'aria.

Poi per ogni strato, vengono calcolati l'indice di rifrazione, le proprietà ottiche, l'angolo di rifrazione utilizzando la funzione materiale e le leggi di Snell. Inoltre, vengono calcolati anche i coefficienti di riflessione e trasmissione per ciascun'interfaccia tra strati.

```

i=nstrati-1
e_p[i] = 1 + 0j;
e_m[i] = 0 + 0j;
#print("Materiale:",strati[i][0]," - E progressivo =",np.round(e_p[i],2),"(V/m), E regressivo =",np.round(e_m[i],2),"(V/m)")
for i in range(nstrati-2, -1, -1):
    e_p[i], e_m[i] = campi (gamma[i+1], strati[i+1][4]/np.cos(theta_m[i+1]), rho[i], tt[i], e_p[i+1], e_m[i+1])
    # print("Materiale:",strati[i][0]," - E progressivo =",np.round(e_p[i],2),"(V/m), E regressivo =",np.round(e_m[i],2),"(V/m)")
#print("SE (dB) = ", np.round(20 * np.log10(np.abs(e_p[0])),2))
#fstart = 0.1 # IN GHz
#fstop = 10 # IN GHz
#fstep = 1e-3 # IN GHz
#fnum = (fstop - fstart) / fstep + 1

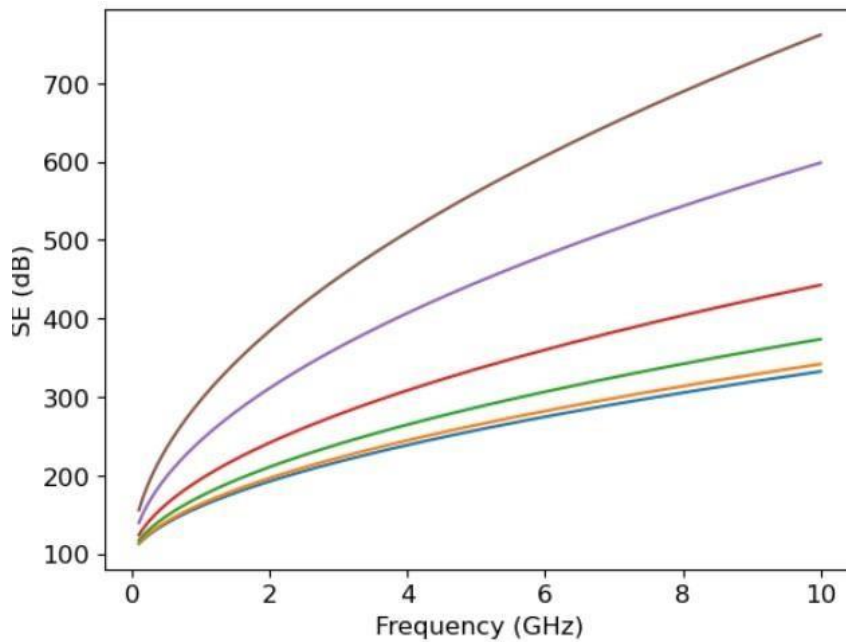
#print("x = ",x)
#print("y = ",y)
plt.rc('xtick', labels=12)
plt.rc('ytick', labels=12)
plt.rc('axes', labels=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel('SE (dB)')
y = 20 * np.log10(SE_obl_perp(freq,0/180*np.pi)) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y)
y = 20 * np.log10(SE_obl_perp(freq,15/180*np.pi)) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y)
y = 20 * np.log10(SE_obl_perp(freq,30/180*np.pi)) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y)
y = 20 * np.log10(SE_obl_perp(freq,45/180*np.pi)) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y)
y = 20 * np.log10(SE_obl_perp(freq,60/180*np.pi)) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y)
y = 20 * np.log10(SE_obl_perp(freq,67.5/180*np.pi)) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y)
plt.show()

```

In questa seconda parte, vi è l'inizializzazione del campo elettrico dell'ultimo strato. Poi si attua il calcolo iterativo dei campi elettrici per ogni strato procedendo all'indietro. In seguito, viene configurata la grafica per i grafici che verranno creati, in particolare per diversi angoli di incidenza (da 0° a 67.5°), viene calcolato il SE in dB e tracciato sul grafico che segue.

Asse delle X: rappresenta la frequenza dell'onda elettromagnetica in gigahertz (GHz).

Asse delle Y: rappresenta la perdita di segnale in decibel (dB). Valori più alti di SE indicano una trasmissione migliore attraverso gli strati. Un SE negativo implica una perdita di segnale, mentre un valore positivo indica che il segnale è stato amplificato (o meno attenuato).

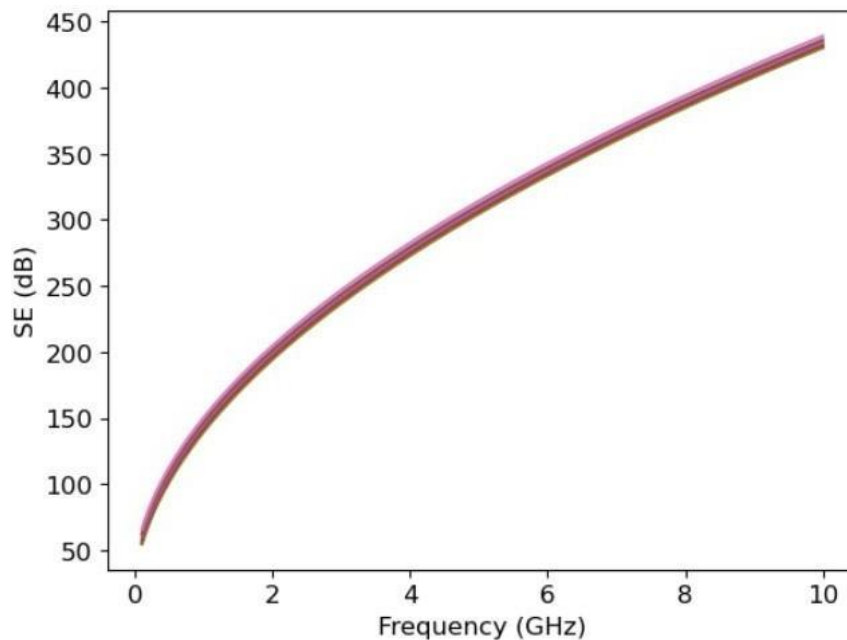


Ogni curva rappresenta la trasmissione del segnale a un angolo di incidenza diverso (0° , 15° , 30° , 45° , 60° , 67.5°) e tali curve possono mostrare picchi o cadute in corrispondenza di determinate frequenze. Questi picchi possono essere dovuti a fenomeni come la risonanza, mentre le cadute possono essere il risultato di riflessione o assorbimento. È possibile osservare come l'angolo di incidenza influisce sulla trasmissione del segnale:

- **Angoli più bassi** potrebbero mostrare una trasmissione migliore a frequenze specifiche.
- **Angoli più alti** potrebbero avere una maggiore attenuazione, specialmente a frequenze più elevate.

I risultati possono indicare come la scelta degli strati influisce sulla qualità del segnale in applicazioni pratiche. Infatti, andando a sostituire all'alluminio un materiale ferromagnetico come il lamierino, ci si aspetta che i valori di SE cambino a causa delle diverse proprietà fisiche (conducibilità, permeabilità magnetica relativa e spessore) dell'alluminio rispetto al materiale ferromagnetico. I materiali ferromagnetici tendono a riflettere le onde elettromagnetiche in modo più efficace a determinate frequenze, specialmente nelle basse frequenze. La presenza del campo magnetico può aumentare la riflessione. Nel seguente grafico è possibile

notare come varia l'efficacia di schermatura a seconda della scelta del materiale stratificante.



I valori più bassi di SE indicano una peggiore capacità del materiale di bloccare o attenuare le onde elettromagnetiche. In pratica, un SE maggiore significa che il materiale è più efficace nel proteggere dall'interferenza elettromagnetica. Un SE che aumenta con la frequenza può indicare che il materiale diventa sempre più efficace a frequenze più elevate.

Se il SE diminuisce a frequenze elevate, potrebbe indicare che il materiale non riesce a schermare le onde a quelle frequenze, a causa della sua conducibilità o dello spessore. Dunque, ho analizzato come cambia l'efficacia di schermatura a seconda della scelta di metalli diversi, in particolare come varia con l'alluminio e il lamierino ferromagnetico.

In questo caso specifico, usando il lamierino con permeabilità magnetica relativa pari a 10000 (H/m), conducibilità pari a 10000 (S/m) e utilizzando lo stesso spessore dell'alluminio posso notare che, sebbene lo spessore di penetrazione ($\frac{1}{\alpha}$) sia maggiore rispetto a quello dell'alluminio, la riflessione e l'assorbimento di quest'ultimo aumentano in modo significativo, specialmente per incidenze oblique. L'alluminio, infatti, ha una capacità di schermatura molto efficace, soprattutto per le radiazioni ionizzanti, grazie

alla sua densità e al suo alto numero atomico. Quando la radiazione colpisce il materiale in modo obliquo, la lunghezza del percorso attraverso il materiale aumenta, portando a un maggiore assorbimento e attenuazione. Questo fa sì che l'alluminio risulti molto efficace nel ridurre l'intensità della radiazione incidente, anche a spessori relativamente sottili.

Infine, ho implementato un codice che modella e analizza la propagazione delle onde elettromagnetiche attraverso diversi materiali, calcolando e confrontando la loro capacità di schermatura in funzione della frequenza e della **polarizzazione**.

```
[78]: freq = np.linspace ( start = 100e6      # Lower limit (Hz)
                        , stop = 10e9      # upper limit (Hz)
                        , num = 501       # generate 501 points between 0 and 3
                        )

for i in range(nstrati):
    n[i]=np.sqrt(strati[i][1]*strati[i][2])
    gamma[i],eta[i]=materiale(strati[i])
    # print("Materiale:",strati[i][0]," - Indice di rifrazione =",np.round(n[i]))
    # print("Materiale:",strati[i][0]," - Costante di propagazione =",np.round(gamma[i],2),"(1/m), Impedenza caratteristica =",np.round(eta[i],2),"ohm")
for i in range(1,nstrati,1):
    theta_rifl,theta_m[i]=snell(n[i-1],n[i],theta_m[i-1])
    # print("Materiale:",strati[i][0]," - E progressivo =",np.round(e_p[i],2),"(V/m), E regressivo =",np.round(e_m[i],2),"(V/m)")
#print("SE (dB) = ", np.round(20 * np.Log10(np.abs(e_p[0])),2))
#fstart = 0.1 # IN GHz
#fstop = 10 # IN GHz
#fstep = 1e-3 # IN GHz
#fnum = (fstop - fstart) / fstep + 1

#print("x = ",x)
#print("y = ",y)
plt.rc('xtick', labels=12)
plt.rc('ytick', labels=12)
plt.rc('axes', labels=12)
plt.xlabel('Frequency (GHz)')
plt.ylabel('SE medio (dB)')
for i in range(nstrati-1):
    rho[i],tt[i]=interf_obl_perp(eta[i],eta[i+1],theta_m[i-1],theta_m[i])
    # print("Interfaccia:",i," - Coefficiente di trasmissione =",np.round(tt[i],5)," Coefficiente di riflessione =",np.round(rho[i],5))
i=nstrati-1
e_p[i] = 1 + 0j;
e_m[i] = 0 + 0j;
#print("Materiale:",strati[i][0]," - E progressivo =",np.round(e_p[i],2),"(V/m), E regressivo =",np.round(e_m[i],2),"(V/m)")
for i in range(nstrati-2, -1, -1):
    e_p[i], e_m[i] = campi (gamma[i+1], strati[i+1][4]/np.cos(theta_m[i+1]), rho[i], tt[i], e_p[i+1], e_m[i+1])
```

In questa prima sezione del codice si calcolano gli indici di rifrazione, le impedenze, gli angoli di riflessione.

```

i=nstrati-1
e_p[i] = 1 + 0j;
e_m[i] = 0 + 0j;
#print("Materiale:",strati[i][0], " - E progressivo =",np.round(e_p[i],2),"(V/m), E regressivo =",np.round(e_m[i],2),"(V/m)")
for i in range(nstrati-2, -1, -1):
    e_p[i], e_m[i] = campi (gamma[i+1], strati[i+1][4]/np.cos(theta_m[i+1]), rho[i], tt[i], e_p[i+1], e_m[i+1])

n_angoli = 181
somma_obl_perp = 0
for i in range(0,n_angoli - 1,1):
    somma_obl_perp = somma_obl_perp + 1 / SE_obl_perp(freq, i * 0.5 * np.pi / (n_angoli - 1))
somma_obl_perp = somma_obl_perp / (n_angoli - 1)
y = 20 * np.log10(1 / somma_obl_perp) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y, label='Polarizzazione Normale')

for i in range(nstrati-1):
    rho[i],tt[i]=interf_obl_par(eta[i],eta[i+1],theta_m[i-1],theta_m[i])
# print("Interfaccia:",i," - Coefficiente di trasmissione =",np.round(tt[i],5)," Coefficiente di riflessione =",np.round(rho[i],5))
i=nstrati-1
e_p[i] = 1 + 0j;
e_m[i] = 0 + 0j;
#print("Materiale:",strati[i][0], " - E progressivo =",np.round(e_p[i],2),"(V/m), E regressivo =",np.round(e_m[i],2),"(V/m)")
for i in range(nstrati-2, -1, -1):
    e_p[i], e_m[i] = campi (gamma[i+1], strati[i+1][4]/np.cos(theta_m[i+1]), rho[i], tt[i], e_p[i+1], e_m[i+1])

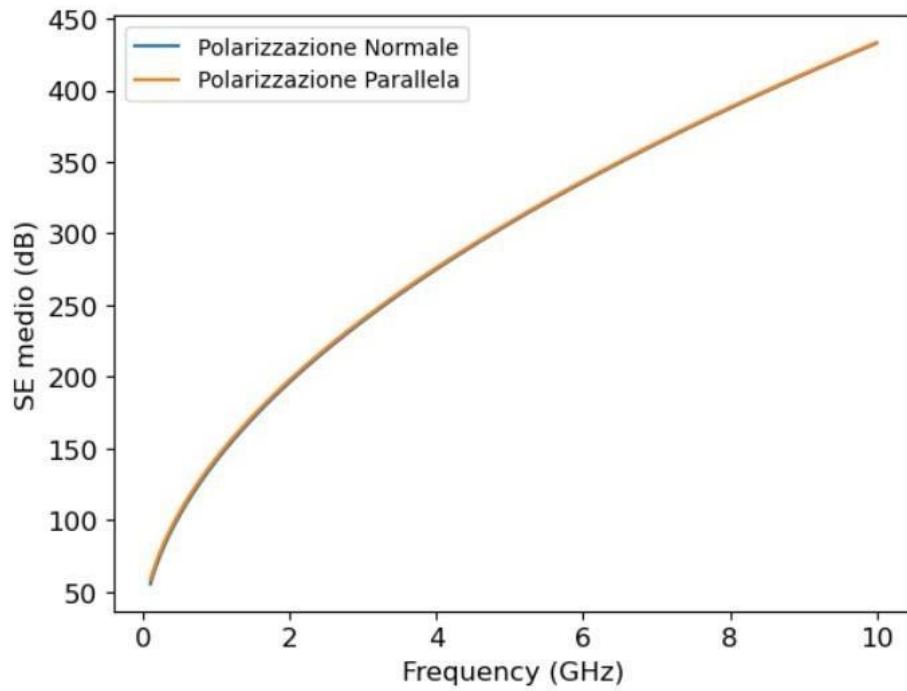
n_angoli = 901
somma_obl_par = 0
for i in range(0,n_angoli - 1,1):
    somma_obl_par = somma_obl_par + 1 / SE_obl_par(freq, i * 0.5 * np.pi / (n_angoli - 1))
somma_obl_par = somma_obl_par / (n_angoli - 1)
y = 20 * np.log10(1 / somma_obl_par) # This is already vectorized, that is, y will be a vector!
plt.plot(freq*1e-9, y, label='Polarizzazione Parallela')

```

Dopo avviene il calcolo dei coefficienti di riflessione e trasmissione per le interfacce tra strati, usando una funzione per la polarizzazione normale. In seguito, viene calcola la superficie di attenuazione per tale polarizzazione e la trasforma in dB e ripete il calcolo dei coefficienti per la polarizzazione parallela. Infine, si calcola la superficie di attenuazione per la polarizzazione parallela.

Il grafico risultante dalla simulazione mostra la **superficie di attenuazione (SE)** in decibel (dB) in funzione della frequenza (in GHz) per diverse polarizzazioni (normale e parallela).

- **Polarizzazione Normale:** rappresenta la situazione in cui il campo elettrico è perpendicolare alla superficie di incidenza. Di solito, il grafico mostra valori di attenuazione più elevati a frequenze più alte, indicando una migliore schermatura.
- **Polarizzazione Parallela:** qui il campo elettrico è parallelo alla superficie. I valori di attenuazione possono differire rispetto alla polarizzazione normale.



Posso notare immediatamente che le due curve coincidono in questa simulazione ed è possibile usare le informazioni del grafico per scegliere il materiale più adatto per applicazioni di schermatura, considerando il tipo di onda (frequenza) e la polarizzazione che dovrà affrontare.

CONCLUSIONE

L'analisi svolta in questa tesi ha dimostrato che Python, in combinazione con Jupyter Notebook, è uno strumento estremamente potente e versatile per la modellazione e la simulazione di fenomeni elettromagnetici. Le librerie NumPy e SciPy consentono di affrontare calcoli complessi, come la risoluzione delle equazioni di Maxwell, mentre Matplotlib fornisce un potente strumento per la visualizzazione grafica dei risultati. Grazie alla sua sintassi semplice e alla vasta gamma di librerie disponibili, Python permette non solo di semplificare il lavoro di ricerca e sviluppo in ambito scientifico, ma offre anche una piattaforma interattiva e facilmente accessibile che facilita la comprensione e l'apprendimento. Attraverso i vari esempi trattati, dalla simulazione del campo elettrico generato da cariche puntiformi alla propagazione delle onde elettromagnetiche, è stato dimostrato come Python possa essere utilizzato per risolvere problemi pratici, offrendo soluzioni rapide e accurate. Inoltre, Jupyter Notebook si è rivelato un ambiente particolarmente utile per integrare codice, testo e visualizzazioni in un unico documento, rendendo possibile una comprensione più immediata e completa dei fenomeni studiati. In conclusione, Python rappresenta una risorsa fondamentale sia per il mondo accademico che per quello professionale, offrendo un supporto efficace nell'analisi e nello sviluppo di modelli elettromagnetici. La sua facilità d'uso, unita alla potenza delle sue librerie, lo rende uno strumento indispensabile per affrontare le sfide della simulazione elettromagnetica, con un grande potenziale sia nell'ambito educativo che nella ricerca applicata.

BIBLIOGRAFIA

Capitolo 2: (<http://www.python.it/about/>)

- 2.1 (<https://www.geekandjob.com/wiki/numpy>)
- 2.2 (<https://docs.scipy.org/doc/scipy/tutorial/general.html>)
- 2.3 (<https://matplotlib.org/>)
- 2.4 (https://en.wikipedia.org/wiki/Project_Jupyter)
(<https://www.andreaminini.com/datascience/anaconda/jupyter-notebook>)
(<https://techbynet.it/jupyter-notebook-la-guida-pratica-definitiva>)

Capitolo 3:

Tutte le informazioni riguardanti i problemi elettromagnetici, dalla legge di Coulomb alle proprietà elettriche dei materiali fino alla propagazione delle onde sono state ricavate da *Fawwaz T. Ulaby. Fondamenti di campi elettromagnetici. 2004. McGraw-Hill paragrafi 4.3- 4.3.1- 4.3.2- 4.6- 4.8- Capitolo 7-8.*

- 3.9 (<https://www.webnir.eu/launcher.php?id=22&area=CEM>)