

Elettrostatica

Marco Ambrosini¹ Andrea Bruno²
Luca Francesco D'Alessandro³ Matteo Dell'Acqua⁴

5 febbraio 2020

Sommario

Legge di Coulomb, principio di sovrapposizione. Leggi di Gauss, potenziale elettrostatico ed energia elettrostatica. Campo di Dipolo. Materiali conduttori, metodo delle cariche immagini. Condensatori, capacità elettrica. Dielettrici.

¹marco.ambrosini@sns.it

²andrea.bruno@sns.it

³luca.dalessandro@sns.it

⁴matteo.dellacqua@sns.it

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Legge di Coulomb	3
1.2	Principio di sovrapposizione	3
1.3	Simmetrie	4
1.4	Energia elettrostatica	5
2	Legge di Gauss	7
2.1	Enunciato e proprietà	7
2.2	Applicazioni	10
2.3	Dipolo elettrostatico	11
3	Conduttori	16
3.1	Definizione	16
3.2	Disposizione delle cariche	18
3.3	Metodo delle cariche immagine	23
3.4	Capacità	26
4	Elettricità nei materiali	28
4.1	Introduzione	28
4.2	Polarizzazione	31
4.3	Leggi di Maxwell in presenza di dielettrici	32
4.4	Dielettrici lineari	33
5	Esercizi	35
6	Soluzioni	48
7	Appendice A	69
7.1	Teorema della divergenza	69
7.2	Calcolo dell'energia potenziale	70
7.3	Calcolo dell'energia di interazione	70
8	Appendice B	71
8.1	Legge di Gauss in forma locale	71
8.2	Teorema di unicità di Poisson	72

1 Introduzione

1.1 Legge di Coulomb

In natura esistono corpi dotati di una certa proprietà, detta carica elettrica. Esistono due tipi di carica elettrica, che per convenzione si identificano come carica positiva e carica negativa. Si può osservare sperimentalmente che due corpi carichi, posti a grande distanza rispetto alle proprie dimensioni (in modo che possano essere trattati a tutti gli effetti come puntiformi) interagiscono tramite una forza. In particolare, se si pone una carica q_1 nella posizione $\mathbf{r}_1$ e una carica q_2 nella posizione $\mathbf{r}_2$, la forza di cui risente la carica q_2 è

$$\mathbf{F}_{2,1} = k \frac{q_1 q_2}{r_{2,1}^2} \hat{\mathbf{r}}_{2,1} \quad (1)$$

dove si è posto $\mathbf{r}_{2,1} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$ e $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \times 10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$ costante positiva, chiamata costante elettrostatica nel vuoto.

1.2 Principio di sovrapposizione

Si osserva che in una configurazione di 3 cariche q_1, q_2, q_3 , la forza sulla terza carica in presenza delle altre due, $\mathbf{F}_{3,12}$, vale

$$\mathbf{F}_{3,12} = \mathbf{F}_{3,1} + \mathbf{F}_{3,2}$$

In particolare, non compaiono altri termini di interazione, come ad esempio un termine $\mathcal{F}(q_1 q_2 q_3)$ dipendente dal prodotto delle cariche. Questo fatto è fondamentale e assolutamente non banale, perché la conoscenza della sola legge di Coulomb non ci fornisce informazioni su come si comporta la forza in presenza di un numero di cariche maggiore di 2. La teoria che andremo a trattare sarà quindi lineare e vedremo che questo sarà di importanza stratosferica per i metodi matematici che useremo per risolvere gli esercizi.

Dall'equazione sopra deriva anche che se consideriamo varie cariche puntiformi (inteso come spiegato all'inizio) $q_1, \dots, q_N$, posizionate rispettivamente in $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N$, allora la forza di cui risente una carica q posta in $\mathbf{r}$ (con $\mathbf{r} \neq \mathbf{r}_j$ per ogni $j = 1, \dots, N$) è

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}) = k \sum_{j=1}^N \frac{q q_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) = k q \sum_{j=1}^N \frac{q_j}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \equiv q \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

Il vettore $\mathbf{E}(\mathbf{r})$, chiamato campo elettrico, definisce una proprietà del punto $\mathbf{r}$ che dipende solo dalla geometria del sistema di cariche $q_1, \dots, q_N$ ed è

indipendente da q . Questa definizione, che per il momento è una semplice riscrittura in forma compatta della legge di Coulomb, sarà fondamentale nell'interpretazione dell'elettrodinamica come teoria di campo. In particolare, la legge di Coulomb predice un'azione a distanza tra due cariche, mentre la (2) può essere vista come un'interazione tra la carica q e il campo elettrico, che a sua volta interagisce con la collezione di cariche $q_1, \dots, q_N$. Parliamo quindi di $\mathbf{E}$ come un *mediatore* dell'interazione tra cariche.

Possiamo ovviamente considerare distribuzioni di cariche continue, oltre che puntiformi, e quindi introdurre il concetto di densità di carica. Usualmente vengono utilizzate le lettere ρ, σ, λ per la densità di carica rispettivamente volumica, superficiale e lineare. In particolare, il campo elettrico generato da una densità volumica di carica è

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = k \int \frac{\rho(\mathbf{r}') (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} d^3 x'$$

L'integrale è chiaramente esteso a tutti i punti in cui ρ è non nulla, eventualmente tutto lo spazio.

1.3 Simmetrie

Se una distribuzione di carica gode di una certa simmetria (ad esempio sotto riflessione o rotazione), allora a causa del principio di sovrapposizione lineare, anche il campo elettrico da essa generato deve godere della stessa simmetria.

Esempio 1.1 (Filo infinito uniformemente carico). Consideriamo un filo rettilineo con densità di carica uniforme λ , e supponiamo per semplicità che sia infinito. Fissiamo un sistema di riferimento cartesiano in cui l'asse x coincide con il filo. Consideriamo un punto P sull'asse z a distanza D dal filo. Se facciamo una riflessione rispetto al piano contenente gli assi x e z , sia il filo che P vengono mandati in se stessi. Ciò significa che il vettore campo elettrico in P è contenuto nel piano xz . Inoltre, se consideriamo una riflessione rispetto al piano ortogonale al piano xz e contenente l'asse z , sia il filo che P rimangono fissi. Allora il campo elettrico in P deve essere della forma $\mathbf{E} = E_z(D)\hat{z}$. In un qualunque altro punto Q del piano xz valgono le medesime considerazioni, poiché il filo è invariante per traslazioni lungo l'asse x (dato che è infinito). Inoltre, la simmetria cilindrica del sistema ci permette di ripetere questo ragionamento per un qualunque piano contenente l'asse x . Procediamo ora con il calcolo. Si ha

$$E_z(D) = k \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\lambda}{D^2} \cos^3 \theta dx = \frac{k\lambda}{D} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta d\theta = \frac{2k\lambda}{D}$$

dove si è posto $x = D \tan \theta$.

Esempio 1.2 (Piano uniformemente carico). Conserviamo un piano con densità di carica uniforme σ , e supponiamo a meno di rotazioni che sia il piano xy . Sia P è un punto dell'asse z a distanza D dal piano. Anche in questo caso, la distribuzione di carica è invariante per rotazioni intorno all'asse z , quindi $\mathbf{E} = E_z(D)\hat{z}$. Tale ragionamento si può adattare a un qualunque altro punto dello spazio, grazie all'invarianza della distribuzione di carica rispetto a traslazioni su rette parallele al piano xy . Allora si ha

$$E_z(D) = k \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \frac{\sigma}{D^2} \cos^3 \theta r \, dr \, d\theta = 2k\pi\sigma = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

1.4 Energia elettrostatica

Si noti come il campo elettrostatico sia conservativo, poiché è possibile esprimerlo come gradiente ($-\nabla$ gradiente in fisica) di una funzione scalare che chiameremo potenziale. Per chi fosse alle prime armi è come se avessimo una funzione $f(x)$ che in realtà è una derivata $f(x) = \frac{\partial g}{\partial x}$ e quindi integrandola tra due punti tutto ciò che è rilevante è il valore della funzione g agli estremi. Consideriamo una distribuzione di carica localizzata $\rho(\mathbf{r})$ e sia $V(\mathbf{r})$ il potenziale generato:

$$V(\mathbf{r}) = k \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3r'$$

Potete verificare che $-\nabla V = \mathbf{E}$.

Il lavoro compiuto per contrastare la forza elettrostatica per portare una carica puntiforme dall'infinito nel punto $\mathbf{R}$ è

$$L = - \int_{-\infty}^{\mathbf{R}} \mathbf{F}(\mathbf{r}) \cdot d\mathbf{l} = qV(\mathbf{R})$$

Dunque l'energia potenziale della carica q è

$$U(\mathbf{R}) = qV(\mathbf{R}) \tag{3}$$

Consideriamo ora una collezione di N cariche puntiformi $q_1, \dots, q_N$ poste in $\mathbf{r}_1, \dots, \mathbf{r}_N$ e, per ogni $1 \leq i, j \leq N$, sia $r_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$. L'energia del sistema può essere calcolata nel seguente modo: la carica q_1 viene portata dall'infinito a $\mathbf{r}_1$ senza compiere lavoro. La seconda carica viene portata dall'infinito a $\mathbf{r}_2$ compiendo un lavoro

$$L_2 = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

Il lavoro compiuto per spostare q_3 dall'infinito a $\mathbf{r}_3$ è per linearità dell'integrale e principio di sovrapposizione:

$$L_3 = k \frac{q_1 q_3}{r_{13}} + k \frac{q_2 q_3}{r_{23}}$$

Generalizzando, sulla base del conto sopra, l'energia della configurazione di cariche, che è uguale alla somma dei lavori precedenti, è

$$U_n = k \sum_{i=1}^n \sum_{j < i} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} = \frac{k}{2} \sum_{i \neq j} \frac{q_i q_j}{r_{ij}} \quad (4)$$

Per distribuzioni continue di carica si definisce l'energia potenziale del sistema come

$$U = \frac{k}{2} \iint \frac{\rho(\mathbf{r}) \rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} d^3 r d^3 r' = \frac{1}{2} \int \rho(\mathbf{r}) V(\mathbf{r}) d^3 r \quad (5)$$

Prima di procedere vorrei sottolineare come le due formule non siano esattamente una l'estensione dell'altra poiché nel caso continuo stiamo integrando anche sulla “diagonale”, ovvero il corrispettivo discreto di $i = j$. Questo sottoinsieme contiene zeri al denominatore e quindi è un oggetto critico che, come vedremo in seguito, ha proprietà particolari. Vogliamo ora riscrivere l'ultima relazione in funzione del solo campo elettrico $\mathbf{E}$, con lo scopo di vedere il campo elettrico come lui stesso portatore di energia. Tuttavia far ciò in maniera elementare e rigorosa non è possibile quindi qui ne daremo un'idea intuitiva e svolgeremo il calcolo nell'appendice A. Il risultato è

$$U = \frac{1}{2} \int \rho(\mathbf{r}) V(\mathbf{r}) d^3 r = \frac{\epsilon_0}{2} \int |\mathbf{E}|^2 d^3 r \quad (6)$$

Mostriamo che funziona con un esempio.

Esempio 1.3 (esempio energia del campo elettrico). Consideriamo un condensatore quadrato di carica Q , lato L e distanza tra le facce d . Calcoliamo l'energia secondo l'equazione (4).

Essendo il condensatore un conduttore vale $V(q) = \frac{q}{C}$.

L'energia immagazzinata nel condensatore è pari al lavoro fatto per caricarlo:

$$U = W = \int dW = \int_0^Q V dq = \int_0^Q \frac{q}{C} dq = \frac{Q^2}{2C} \quad (7)$$

Ora calcoliamo sempre questa energia integrando il campo elettrico nello spazio, come nel secondo membro dell'equazione (8).

Notiamo intanto che fuori dal condensatore il campo è trascurabile, quindi

integriamo solo nel volume del condensatore Ω . Trascurando gli effetti di bordo, il campo all'interno è uniforme di intensità $\frac{V}{d}$ e quindi

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_{\Omega} \frac{V^2}{d^2} = \frac{\epsilon_0 V^2 L^2}{2d} = \frac{CV^2}{2} = \frac{Q^2}{2C}$$

ovvero il risultato di prima.

Quindi ripartiamo da

$$U = \frac{1}{2} \int \rho(\mathbf{r}) V(\mathbf{r}) d^3r = \frac{\epsilon_0}{2} \int |\mathbf{E}|^2 d^3r \quad (8)$$

La (8) permette anche di interpretare U come l'energia necessaria a creare il campo elettrico stesso. Inoltre, non è del tutto equivalente alla (4), come si deduce subito considerando una coppia di cariche di segno opposto (infatti l'energia trovata in (8) è sempre positiva, al contrario della (4)).

L'equazione (5), da cui deriva la (8), è stata ottenuta immaginando di portare dei volumetti dall'infinito contenenti una carica infinitesima, e non finita. In altre parole, la (8) tiene conto anche dell'energia spesa per creare effettivamente la carica, mentre nella (4) si suppone che le cariche puntiformi siano preesistenti, e tale equazione esprime solamente l'energia di interazione tra coppie di cariche. Per verificare la coerenza di questa affermazione, consideriamo due cariche puntiformi (il caso generico segue immediatamente per il principio di sovrapposizione). Siano q_1 e q_2 tali cariche, poste rispettivamente in $\mathbf{r}_1$ e $\mathbf{r}_2$. Allora per il campo elettrico si ha, con ovvio significato dei simboli

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$$

Di conseguenza usando la (8) si ottiene

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int_{V_S} (|\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + 2\mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2) d^3r$$

Ora i primi due integrali non sono fisicamente riconducibili all'**interazione** tra le due cariche (poiché ognuno dei due è indipendente dalla presenza dell'altra carica) e quindi non li considereremo. Come mostrato nell'appendice B invece il termine misto è proprio uguale all'equazione (4).

2 Legge di Gauss

2.1 Enunciato e proprietà

In questa sezione andremo a dimostrare uno dei teoremi cardine dell'elettrostatica e vedremo come applicarlo in alcuni casi semplici.

Iniziamo presentando uno strumento matematico fondamentale in molti ambiti della fisica: il flusso. Immaginiamo di avere un fluido e una funzione che ci dice qual è il suo vettore velocità in ogni punto dello spazio. Ci chiediamo quanto fluido attraversa una superficie infinitesimale dA in un piccolo intervallo di tempo dt (chiameremo questa quantità $d\Phi$). Sicuramente $d\Phi$ è proporzionale alla velocità del flusso nelle vicinanze della superficie, ed essendo questa infinitesima possiamo immaginare la velocità costante nell'intornino (e dunque dipendente solo dalla posizione del baricentro della superficie dA). Ma, pensandoci meglio ci interessa solo la componente della velocità perpendicolare alla superficie (le altre componenti fanno muovere il fluido *lungo* la superficie, non *attraverso*). Indicando, allora, questa direzione con $\hat{n}$ avremo $d\Phi \propto \mathbf{v} \cdot \hat{n} dA$ ¹. Se la superficie non fosse infinitesima, basta integrare.

Definizione (flusso): dato un campo vettoriale $\mathbf{F}$ (ossia un insieme di vettori che ricoprono lo spazio e le cui componenti dipendono dalla posizione, i.e. il campo elettrico) e una superficie chiusa S , si dice flusso $\Phi_S(\mathbf{F})$ di $\mathbf{F}$ attraverso S

$$\Phi_S(\mathbf{F}) = \oint_S \mathbf{F} \cdot \hat{n} dA \quad (9)$$

dove $\hat{n}$ è il versore normale uscente dalla superficie.

Rimanendo all'interno dell'esempio del fluido (incomprimibile) è facile convincersi del fatto che un flusso positivo indica una sorgente (ossia una regione da cui esce più fluido di quanto ne entri), uno negativo un pozzo (ossia una regione in cui entra più fluido di quanto ne esca), mentre il flusso nullo è la condizione di conservazione della materia (ossia una regione in cui entra tanto fluido quanto ne esce).

L'operatore flusso gode di alcune proprietà di linearità (derivanti dalla linearità dell'integrale) che tornano spesso comode e che quindi è utile sapere:

$$\Phi_S(\mathbf{v}_1 + \mathbf{v}_2) = \Phi_S(\mathbf{v}_1) + \Phi_S(\mathbf{v}_2) \quad (10)$$

$$\Phi_{S_1+S_2}(\mathbf{F}) = \Phi_{S_1}(\mathbf{F}) + \Phi_{S_2}(\mathbf{F}) \quad (11)$$

la prima equazione ci dice cosa succede al flusso della somma di due campi vettoriali (dove si intende che ad ogni punto associo la somma dei vettori associati a quel punto da due campi di partenza), mentre la seconda tratta del caso in cui divido la mia area di interesse in due (per esempio tagliandola con un piano): in questo caso il contributo della nuova superficie di separazione (nel nostro esempio il piano) è nullo in quanto nel calcolo dei due flussi il vettore normale è in direzione opposta.

¹Talvolta troverete dA al posto di $\hat{n} dA$

Vediamo ora che informazioni ci dà questo nuovo operatore sul nostro caro campo elettrico. Partiamo dal caso più semplice possibile: prendiamo una superficie sferica di raggio R e mettiamoci una carica puntiforme al centro.

$$\Phi_S(\mathbf{E}) = \oint_S \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} = \oint_S k \frac{q}{R^2} dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (12)$$

Dove $\mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}}$ si calcola facilmente essendo i due vettori paralleli (entrambi radiali) ed essendo $\mathbf{E}$ in funzione della sola distanza tra il punto in cui lo calcolo e la carica sorgente, che nel nostro caso è costante e pari a R . Notare che il flusso attraverso una superficie sferica centrata nella carica non dipende dalle dimensioni della sfera. Complichiamo un attimo le cose, considerando sempre una carica puntiforme q , ma ora come S prendiamo una superficie convessa generica.

Calcoliamo il contributo $d\Phi$ di un singolo elemento dA a distanza R dalla carica:

$$d\Phi = \mathbf{E} \cdot \hat{\mathbf{n}} dA = E \cos \theta dA = k \frac{q}{R^2} R^2 d\Omega = kq d\Omega$$

Dove ho prima proiettato l'elemento dA lungo la direzione perpendicolare al campo (aggiungendo il fattore $\cos \theta$ e poi usato la definizione di angolo solido²). Integrando ora su tutto lo spazio otteniamo il risultato cercato.

Nel caso la superficie non sia convessa con un po' di intuito si nota che se la carica è interna alla superficie, per un dato angolo solido questa viene intersecata un numero dispari di volte e il contributo cambia sempre di segno (cambia la direzione del vettore normale) per cui il contributo netto è lo stesso di prima. Con un ragionamento analogo si deduce che il campo di una carica esterna alla superficie non contribuisce al flusso in quanto questa volta, per un dato angolo solido, si incontra la superficie un numero pari di volte.

Per la linearità del campo elettrico e per le proprietà dell'operatore flusso, si può generalizzare questo risultato per una qualunque distribuzione di cariche (anche continua) ottenendo così la prima legge di Maxwell (anche detta teorema di Gauss):

$$\Phi_S(\mathbf{E}) = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad (13)$$

Notare che in tutta la dimostrazione ho usato solo che il campo è centrale, proporzionale a r^{-2} e gode della proprietà di sovrapposizione lineare, quindi lo stesso risultato vale anche per il campo gravitazionale dove la massa gioca il ruolo della carica.

²Estensione tridimensionale dell'angolo piano. Dato un elemento di superficie A tutto a distanza R dal punto a partire dal quale vogliamo calcolare l'angolo, questo si definisce come il rapporto A/R^2 . Si misura in steradiani ed è facile notare che l'angolo sotteso dalla superficie sferica ("l'angolo giro") vale 4π .

2.2 Applicazioni

Filo infinito. Per i ragionamenti visti all'inizio della lezione sappiamo già che il campo è della forma: $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = E_r(r)\hat{\mathbf{r}}$.

Scegliamo come superficie su cui calcolare il flusso un cilindro di raggio a , altezza h e coassiale con il filo (come detto prima, la coordinata z non ci interessa).

$$\frac{\lambda h}{\epsilon_0} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \Phi_S(\mathbf{E}) = \int_0^h \int_0^{2\pi} \pi E_r(a) a \, d\theta \, dz = 2\pi a h E_r(a)$$

Dove i contributi delle due basi sono nulli il quanto il campo è radiale mentre per quelle due superfici $\hat{\mathbf{n}}$ è diretto lungo z .

Otteniamo così $\mathbf{E}(\mathbf{r}) = E_r(r)\hat{\mathbf{r}} = \frac{\lambda}{2\pi r\epsilon_0}\hat{\mathbf{r}}$.

Piano infinito. Si chiede di calcolare il campo generato da un piano infinito con densità superficiale di carica σ e posto sul piano $z = 0$.

Come prima, facciamo delle osservazioni intelligenti: la simmetria per traslazioni in x e in y e l'invarianza per trasformazioni $x \rightarrow -x$ e $y \rightarrow -y$ implicano $\mathbf{E}(x, y, z) = E_z(z)\hat{\mathbf{z}}$, inoltre l'invarianza per $z \rightarrow -z$ ci fa concludere $\mathbf{E}(x, y, z) = \text{sgn}(z)E_z(|z|)\hat{\mathbf{z}}$.

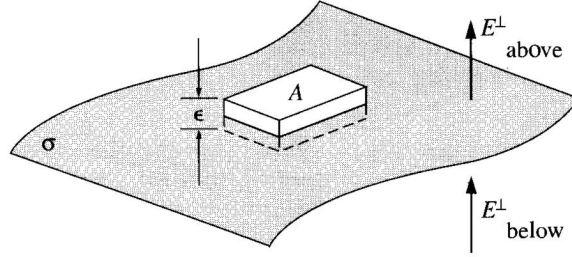
Scegliamo come superficie un qualsiasi prisma retto di altezza $\epsilon = 2h$ e area di base A e posto con le facce parallele al piano infinito e tale che il piano lo bisechi (confronta 1a).

$$\frac{\sigma A}{\epsilon_0} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \Phi_S(\mathbf{E}) = 2 \oint_A E_z(h) \, dA = 2AE_z(h)$$

Il contributo delle facce laterali è nullo il quanto il campo è diretto lungo z , e le due basi danno lo stesso contributo perché sia $\mathbf{E}$ che $\hat{\mathbf{n}}$ cambiano verso mantenendo invariato modulo e direzione.

Otteniamo così $\mathbf{E}(x, y, z) = \text{sgn}(z)E_z(z)\hat{\mathbf{z}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}\hat{\mathbf{z}}$.

Con un procedimento analogo, si può ottenere un risultato che sarà molto utile quando si parlerà di conduttori: una superficie con densità di carica non nulla (non necessariamente uniforme) causa una discontinuità a salto nella componente della campo elettrico perpendicolare alla superficie stessa in un punto, proporzionale alla densità di carica in quel punto: basta infatti applicare la legge di Gauss al parallelepipedo in figura (1a), tale che $A \gg \epsilon$ e tale che A sia così piccolo che le facce del parallelepipedo possano essere considerate parallele al piano tangente alla superficie nel punto in cui voglio calcolare $\Delta\mathbf{E}_\perp$. Mandando al limite $A \rightarrow 0$ i contributi delle facce laterali saranno trascurabili per la condizione su ϵ , mentre quelli sulle basi saranno $\pm A\Delta E_{1,\perp}(\mathbf{r}^\pm)$ in quanto per una regione molto piccola di spazio si può



(a) *Flusso infinitesimo.*

Figura 1: Flusso infinitesimo sulla superficie di un conduttore (presa dal [Gri17]).

considerare il campo costante (con $\mathbf{r}^\pm$ indico la posizione di un punto appena fuori/dentro la superficie in analisi). Si ottiene pertanto:

$$\Delta \mathbf{E}_\perp(\mathbf{r}) = \frac{\sigma(\mathbf{r})}{\epsilon_0} \hat{\mathbf{n}} \quad (14)$$

2.3 Dipolo elettrostatico

Il potenziale di una distribuzione di carica è teoricamente calcolabile con la seguente formula:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int d^3r' \frac{\rho(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|}$$

dunque di ogni distribuzione di carica si può almeno a livello teorico conoscere il potenziale esatto in ogni punto.

L'applicazione di questa formula è spesso molto complessa, tanto che in pratica risulta difficile calcolare esplicitamente il valore di tale potenziale. In genere verrà richiesta un'approssimazione del potenziale “a grandi distanze”, in modo da renderne più agevole la determinazione. Se la quantità complessiva di carica Q_{tot} è non nulla, un osservatore posto a grande distanza dal sistema³ percepirà in prima approssimazione un campo proveniente dal sistema pari a quello generato da una carica puntiforme di valore Q_{tot} posizionata nel baricentro delle cariche: infatti se $\mathbf{R}$ è la distanza dal baricentro delle cariche

³Più formalmente, sia la distanza d_G dell'osservatore dal baricentro delle cariche, e sia r_{min} il minimo raggio di una superficie sferica centrato nel baricentro delle cariche. Diremo che il nostro sistema è osservato a grandi distanze quando $d_G \gg r_{\text{min}}$. Inoltre, diremo che le distanze fra le cariche sono considerate trascurabili se nello sviluppo in serie di Taylor del potenziale ci interessa solamente il termine dell'ordine di $\frac{r_{\text{min}}}{d_G}$.

all'osservatore e $\mathbf{r}_i$ è la distanza della i -esima carica dal baricentro,

$$V(\mathbf{R}) = \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{R^2 + r_i^2 - 2\mathbf{R} \cdot \mathbf{r}_i}} \approx \sum_i \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{\sum_i q_i}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{Q_{\text{tot}}}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (15)$$

dove l'approssimazione è giustificata dal fatto che $R \gg r_i$.

Se invece la carica totale è nulla, il valore del potenziale a grande distanza è approssimabile a quello di due cariche, opposte in segno e di valore uguale alla quantità complessiva di carica dello stesso segno, posizionate rispettivamente nel baricentro delle cariche negative e nel baricentro delle cariche positive. Effettueremo qui il calcolo a grande distanza per la configurazione non banale più semplice, ovvero due cariche di segno opposto a distanza d l'una dall'altra: questa configurazione, denominata comunemente *dipolo*, risulta centrale nello studio dell'elettrostatica, ed il risultato che otterremo ha un'applicazione più vasta di quella del semplice problema proposto.

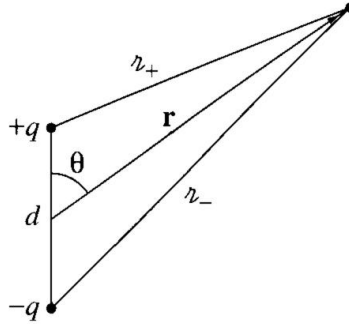


Figura 2: Calcolo del campo di un dipolo in un punto dello spazio.

Il campo del dipolo. Come da figura 2, consideriamo due cariche puntiformi di carica $+q$ e $-q$ che si trovano sull'asse $\hat{z}$ rispettivamente in posizione $-a\hat{z}$ e $a\hat{z}$, dove $d = 2a$ è la distanza fra le due cariche e $\mathbf{d}$ il vettore che collega la posizione della carica negativa a quella della carica positiva. Siano ora $\mathbf{r}_-$ ed $\mathbf{r}_+$ la distanza fra il nostro punto dello spazio e rispettivamente la carica negativa e la carica positiva. Sia $\mathbf{r}$ il vettore distanza dall'origine. Il potenziale in ogni punto dello spazio si può scrivere pertanto come:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_+} - \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_-} \quad (16)$$

Ma, come possiamo notare, vale che

$$r_+ = \left| \mathbf{r} - \frac{1}{2} \mathbf{d} \right|$$

$$r_- = \left| \mathbf{r} + \frac{1}{2} \mathbf{d} \right|$$

Pertanto, usando la formula trigonometrica di Carnot⁴ e chiamato θ l'angolo fra l'asse $\hat{z}$ (parallelo a $\mathbf{d}$) e il vettore $\mathbf{r}$, si può scrivere

$$r_+ = \sqrt{r^2 + d^2 - 2 \mathbf{r} \cdot \left(-\frac{1}{2} \mathbf{d}\right)} = \sqrt{1 - \frac{d \cos \theta}{r} + \frac{d^2}{r^2}}$$

e quindi, per $r \gg d$ si può approssimare come segue, utilizzando l'approssimazione al primo ordine in 0 per le potenze di binomio⁵ $((1+x)^\alpha \approx 1 + \alpha x$ se $x \ll 1$):

$$\frac{1}{r_+} \approx \frac{1}{r} \left(1 + \frac{d \cos \theta}{2r} \right)$$

dove si sono trascurati i termini di ordine superiore al primo, ovvero dove compaiono potenze di $\frac{r}{d}$ con esponente maggiore di 1.

Facendo lo stesso ragionamento per r_- si ottiene analogamente

$$\frac{1}{r_-} \approx \frac{1}{r} \left(1 - \frac{d \cos \theta}{2r} \right)$$

Sostituendo le due relazioni trovate in (2.3) e (2.3) nell'equazione (2.3) si ricava che per $r \gg d$:

$$V(\mathbf{r}) \approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \left(1 + \frac{d \cos \theta}{2r} - 1 + \frac{d \cos \theta}{2r} \right) = \frac{qd \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (17)$$

Se indichiamo con $\mathbf{p} = +qd\mathbf{d}$, allora si ha che il potenziale può essere riscritto come:

$$V(\mathbf{r}) \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^3} \quad (18)$$

In genere il vettore $\mathbf{p}$ viene chiamato *momento di dipolo*, ha unità di misura della carica moltiplicata per l'unità di lunghezza [Cm] e per una configurazione spaziale di cariche si può calcolare come segue:

$$\mathbf{p} = \int \mathbf{r}' \rho(\mathbf{r}') d^3 r' \quad (19)$$

⁴https://it.wikipedia.org/wiki/Teorema_del_coseno

⁵Vedi anche disuguaglianza di Bernoulli: https://it.wikipedia.org/wiki/Disuguaglianza_di_Bernoulli.

Nel caso di cariche puntiformi, questo vettore è nullo se il baricentro delle cariche negative coincide con il baricentro delle cariche positive.

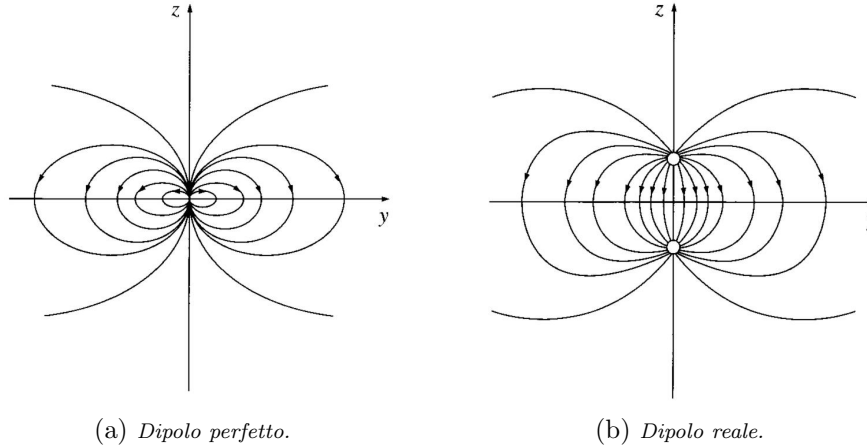


Figura 3: Confronto dei campi di un dipolo perfetto e di un dipolo reale.

Il potenziale così trovato in generale viene chiamato *potenziale di dipolo*, e in modo più formale si definisce “*dipolo perfetto*” una configurazione tale che il campo in ogni punto sia proprio uguale a quello espresso dalla (18). Tale potenziale può essere pensato come il risultato di un processo di limite, in cui la distanza fra le due cariche tende a zero, ma tale che si mantiene costante il valore del modulo di $\mathbf{p}$ (dunque $qd = p$ costante, con $d \rightarrow 0$ e $q \rightarrow \infty$). Nella figura 3 possiamo vedere il confronto fra i campi di un dipolo perfetto e di un dipolo reale.

Nella realtà una tale configurazione è impossibile da ottenere, ed esistono solo dipoli fisici, nei quali la distanza fra le due cariche è molto piccola ma finita: un esempio tipico è la molecola d’acqua, che ha un momento di dipolo pari a 6.17×10^{-30} C m.

Campo elettrico del dipolo a grande distanza. Riscrivendo in cartesiane il potenziale di dipolo, si ottiene:

$$V(x, y, z) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{pz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{3}{2}}}$$

dove si è supposto che il momento di dipolo fosse diretto nella direzione positiva dell'asse $\hat{z}$. Ricordando che $\mathbf{E} = -\nabla V$ ⁶ si ha allora che:

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_x &= -\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3xz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^5} x \\ \mathbf{E}_y &= -\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3yz}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^5} y \\ \mathbf{E}_z &= -\frac{\partial V}{\partial z} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{3z^2 - r^2}{r^5} = \frac{3}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^5} z - \frac{p}{3r^3} \right)\end{aligned}$$

da cui segue che il campo vale:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\left(\frac{3\mathbf{p} \cdot \mathbf{r}}{r^5} \right) \mathbf{r} - \frac{\mathbf{p}}{r^3} \right] \quad (20)$$

Momento torcente, energia e forza netta su un dipolo. Supponiamo ora di avere un dipolo costituito da un bilanciere ai cui estremi vi siano due cariche uguali ed opposte separate da una distanza fissa d . Se questo bilanciere si trova immerso in un campo elettrico esterno, su di esso agiscono delle forze esterne. Consideriamo il caso semplice nel quale il campo elettrico esterno è omogeneo. Come si evince dalla figura 4 la somma delle forze agenti sul dipolo è nulla.

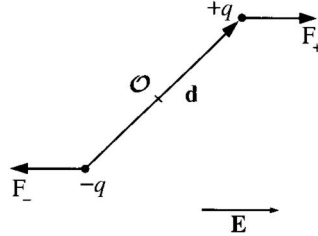


Figura 4: Schema delle forze su un dipolo in campo costante.

Sia ora $\mathbf{F}_- = -q\mathbf{E}$ la forza agente sulla carica negativa e sia $\mathbf{F}_+ = q\mathbf{E}$ la forza agente sulla carica positiva. Se si calcola il momento torcente sul dipolo rispetto al punto medio della distanza fra le due cariche, si ottiene la seguente espressione:

$$\boldsymbol{\tau} = \left(+\frac{\mathbf{d}}{2} \right) \wedge \mathbf{F}_+ + \left(-\frac{\mathbf{d}}{2} \right) \wedge \mathbf{F}_- \Rightarrow \boldsymbol{\tau} = q\mathbf{d} \wedge \mathbf{E}$$

⁶Con quest'espressione si intende che il campo elettrico è l'opposto del gradiente del potenziale, dove il gradiente è espresso come $\nabla V = (\partial_x V, \partial_y V, \partial_z V)$.

Che può essere riscritta come

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{p} \wedge \mathbf{E} \quad (21)$$

È interessante notare come il momento torcente cerchi di allineare il momento di dipolo con il campo elettrico esterno.

Se il campo non è uniforme (e di conseguenza neanche il potenziale lo è), allora il dipolo possiederà un'energia potenziale dovuta alla sua disposizione nello spazio: infatti, ricordando che $r \gg d$, se si considera l'energia del dipolo come somma delle energie delle due cariche e si usa la formula (3) si ha:

$$U_{\text{dipolo}} = -qV(\mathbf{r}) + qV(\mathbf{r} + \mathbf{d}) \approx q dV(\mathbf{r}) \quad (22)$$

Ma ora, se la distanza fra due punti è sufficientemente piccola, la variazione del potenziale può essere pensata come una variazione lineare, e dunque si può scrivere che $dV(\mathbf{r}) = -\mathbf{E} \cdot \mathbf{d}$. Ricordando anche $\mathbf{p} = q\mathbf{d}$, si ha che l'equazione (22)

$$U_{\text{dipolo}} = -\mathbf{E} \cdot \mathbf{p} \quad (23)$$

Per ottenere la forza agente sul dipolo, basterà allora ricordare che $\mathbf{F} = -\nabla U_{\text{dipolo}}$.

Fermiamoci ora un attimo a riflettere sul significato fisico delle espressioni (23) e (21). La (23) si può riscrivere anche come $U_{\text{dipolo}} = -Ep \cos \theta$: è evidente che il minimo dell'energia si ha quando il dipolo è allineato nel verso del campo elettrico, mentre il massimo si ha quando il dipolo ha verso opposto a quello del campo elettrico. L'espressione (21) ci dice invece che il campo elettrico tende a torcere il dipolo e a farlo allineare con il campo elettrico esterno. Dunque, tramite il momento torcente, il campo esterno può convertire l'energia potenziale del dipolo in energia cinetica rotazionale dello stesso. Su questo principio si basano i forni a microonde, che utilizzano campi elettrici alternati per aumentare l'energia cinetica delle molecole d'acqua polari all'interno del cibo ed addirittura arrivare a scongelarlo: elettrizzante, non trovate?

3 Conduttori

3.1 Definizione

Un altro tipo di problema che viene studiato spesso in elettrostatica consiste nel determinare il comportamento dei corpi sottoposti ad un campo elettrico esterno o in presenza di cariche posizionate nelle loro prossimità.

I materiali più comuni possono essere classificati come *isolanti* oppure *conduttori*, a seconda della possibilità o meno per le cariche interne di muoversi liberamente. Più formalmente:

Definizione 3.1. Si definisce *isolante perfetto* un materiale nel quale le cariche non si muovono, indipendentemente dall'intensità del campo elettrico.

Definizione 3.2. Si definisce *conduttore perfetto* un materiale⁷ che contiene un numero illimitato di cariche di entrambi i segni, libere di muoversi sotto l'azione di un campo elettrico applicato, qualunque sia l'intensità del campo stesso.

Da questa definizione seguono alcune proprietà dei conduttori quando questi si trovano in condizione di equilibrio elettrostatico.

1. **Il campo elettrico è nullo all'interno del conduttore.** Se così non fosse, allora *non* potremmo trovarci in una condizione di equilibrio statico: dato che tutte le cariche presenti nel conduttore possono muoversi liberamente al suo interno, un elettrone che si trovi in un punto all'interno risentirebbe di una forza netta data dal campo interno, $\mathbf{F} = e\mathbf{E}_{\text{int}}$, e dato che non risentirebbe di altre forze per ipotesi, non ci troveremmo in condizione di equilibrio. Da questo fatto segue anche che l'intero volume del conduttore è equipotenziale:

$$V(B) - V(A) = - \int_A^B \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_A^B \mathbf{0} \cdot d\mathbf{l} = 0$$

dove il percorso che collega A a B è interno al conduttore.

2. **La densità di carica netta all'interno è nulla.** Questo risultato segue dalla legge di Gauss: presa infatti una qualunque superficie chiusa S contenuta all'interno del condensatore, si avrebbe che

$$\Phi_S(\mathbf{E}) = \oint_S \mathbf{E}_{\text{int}} \cdot d\mathbf{A} = \oint_S \mathbf{0} \cdot d\mathbf{A} = 0 = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

e dunque la carica netta interna è sempre nulla. Pertanto, la carica sarà sempre localizzata sulla superficie esterna.

3. **Il campo elettrico esterno, sulla superficie, è perpendicolare alla superficie stessa.** Se in un punto della superficie il campo elettrico

⁷Nella realtà non esiste un conduttore perfetto, ma per i nostri propositi i metalli ne sono una buona approssimazione

avesse una componente tangenziale, allora questa spingerebbe una qualunque carica localizzata in quel punto verso una posizione diversa, contraddicendo il fatto che il conduttore si trova all'equilibrio elettrostatico. Un altro metodo è considerare una circuitazione su una curva γ come in figura (5b), ovvero una circuitazione su un rettangolo infinitesimo, in cui i due lati lunghi ℓ si trovano appena fuori e appena dentro il conduttore, paralleli alla superficie, mentre gli altri due lati sono lunghi a e sono perpendicolari alla superficie. Su questa curva, la circuitazione del campo è nulla. Supponendo che $a \ll \ell$, e dunque la circuitazione sui due lati perpendicolari alla superficie è trascurabile, facendo il limite di $\ell \rightarrow 0$ (e dunque supponendo il campo elettrico costante sul lato) si ottiene che

$$\int_{\gamma} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = E_{\text{in}}^{\parallel} \ell - E_{\text{out}}^{\parallel} \ell = 0 \quad (24)$$

$$\Rightarrow E_{\text{in}}^{\parallel} = E_{\text{out}}^{\parallel} \quad (25)$$

dove con $E_{\text{in}}^{\parallel}$ si intende il modulo del campo elettrico parallelo alla superficie all'interno della superficie del conduttore, mentre con $E_{\text{out}}^{\parallel}$ lo stesso fuori dalla superficie del conduttore. Ma per ipotesi vale $E_{\text{in}}^{\parallel} = 0$, dunque il campo elettrico sarà solo perpendicolare alla superficie. Nota bene: in generale il risultato ottenuto in (25) è un risultato generale, ovvero che incontrando una superficie carica con una densità superficiale la componente del campo elettrico parallela alla superficie non ha discontinuità.

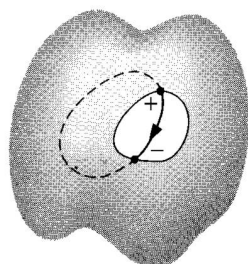
4. È utile ricordare un interessante risultato che lega la densità superficiale locale all'intensità del campo elettrico relativa al punto considerato: confrontando infatti l'equazione (14) e ricordando che all'interno del conduttore il campo è nullo e la componente parallela è nulla, allora il campo elettrico in prossimità della superficie vale:

$$\frac{\sigma A}{\epsilon_0} = \Phi_S(\mathbf{E}) = \mathbf{E}_{\text{sup}} \cdot A \hat{\mathbf{n}} = E \cdot A \quad (26)$$

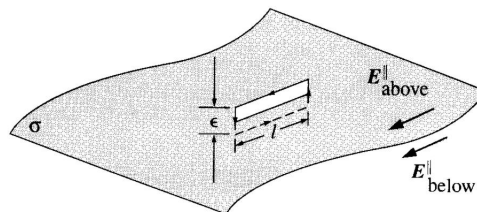
$$\mathbf{E}_{\text{sup}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{\mathbf{n}} \quad (27)$$

3.2 Disposizione delle cariche

Tratteremo ora il comportamento dei conduttori in varie situazioni, puntualizzando alcuni risultati notevoli. In particolare, discuteremo come si



(a) Conduttore cavo in cui è disegnata la curva per la circuitazione.



(b) Circuitazione infinitesima.

Figura 5: Notare che la curva all'interno della cavità inizia in una carica positiva e termina su una carica negativa.

comporta un conduttore con una cavità all'interno in presenza di carica localizzata all'esterno o all'interno.

Gabbia di Faraday. Considerate la figura 5a. Il conduttore è immerso in un campo esterno, in condizione di equilibrio elettrostatico, al suo interno è presente una cavità priva di carica. Le cariche si dispongono dunque sulla superficie esterna in modo da renderla una superficie equipotenziale. Se è presente una cavità nel conduttore, un osservatore posto al suo interno non percepisce alcun campo elettrico, e sulla superficie interna non compare alcuna densità di carica. Se per assurdo non fosse vero, dato che per Gauss la carica sulla superficie interna è nulla, consideriamo una curva chiusa costruita in questo modo: all'interno della cavità segue una linea di campo che parte dalla parete della cavità in corrispondenza di una carica positiva e termina sulla parete della cavità in corrispondenza di una carica negativa, il resto della curva si trova all'interno del conduttore. Calcolando la circuitazione del campo lungo questa curva, essa sarà non nulla: lungo la linea di campo, per definizione, il campo stesso è parallelo e concorde alla curva e dunque dà contributo solo positivo alla circuitazione, mentre all'interno del conduttore il campo è nullo, e dunque tale è il suo contributo alla circuitazione. Si avrebbe così una curva chiusa su cui la circuitazione del campo è positiva, assurdo.

Questo effetto, a dir poco contro-intuitivo, è alla base della gabbia di Faraday, ed è il motivo per cui se un fulmine colpisce la vostra auto mentre siete al suo interno, la corrente non scorre attraverso di voi ma solo sulla superficie esterna dell'auto, o per cui in ascensore il cellulare “non prende”⁸.

⁸Un'altra applicazione a dir poco elettrizzante di questo principio si può trovare a questo link: <https://www.youtube.com/watch?v=syAwqBLmng>. In questo video una band suona musica “elettronica” ben al sicuro all'interno di tute metalliche che sfruttano proprio il

Gabbia di Faraday inversa Ci si può ora chiedere come si distribuirà la carica indotta sulle superfici del conduttore se viene posta una carica puntiforme all'interno di una cavità del conduttore stesso. Notiamo intanto che la quantità di carica totale presente sulla superficie della cavità deve essere uguale e opposta a quella puntiforme posizionata al suo interno. Infatti, consideriamo una superficie chiusa S appena dentro il conduttore che racchiuda la cavità interna del conduttore: il flusso attraverso questa superficie è nullo perché il campo nella parte piena del conduttore è nullo, pertanto dalla legge di Gauss segue che la carica totale racchiusa dalla superficie deve anch'essa essere nulla.

È possibile che sulla parete interna del conduttore all'equilibrio ci siano cariche di entrambi i segni? No: riapplicando infatti lo stesso ragionamento che abbiamo usato per la gabbia di Faraday, se ci sono due cariche di segno opposto sulla parete, esiste una linea di campo che le congiunge. Considerando allora una curva chiusa composta dalla linea di campo e da un arco di curva che la renda chiusa e che passi tutta all'interno del conduttore, avremmo che la circuitazione su questa curva è non nulla, assurdo. Dunque sulla parete interna compaiono solo cariche di segno opposto a quello della carica q posta nella cavità.

La distribuzione di carica sulla superficie esterna del materiale dipende dalla forma della cavità, oppure dalla posizione della carica posta al cui interno? Come mostreremo, la densità superficiale esterna è indipendente dalla posizione della carica all'interno, o dalla forma della cavità, ma dipende solo dalla forma della superficie esterna, e si dispone come se il conduttore fosse pieno e carico di carica q (Vedi figura 6). Infatti, considerate le seguenti

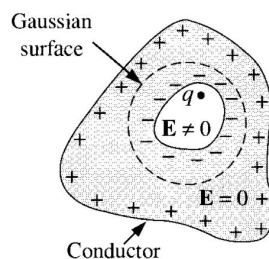


Figura 6: Conduttore cavo, e curva per la circuitazione.

configurazioni:

principio della gabbia di Faraday. Questo video è un estratto di una puntata di “*Te l’avevo detto*”, che potete trovare qui in versione integrale: <https://it.dplay.com/dmax/te-lavevo-detto/strani-poteri/>

1. tutto lo spazio è fatto del materiale conduttore, tranne per una cavità vuota, identica a quella del problema originale, con la carica puntiforme q posizionata all'interno;
2. nello spazio c'è solo il conduttore dotato di una carica q .

Nella prima delle due configurazioni, la carica si distribuisce sulla superficie in modo tale da produrre fuori della cavità⁹ un campo elettrico nullo. Considerando invece la seconda delle due configurazioni, la carica superficiale si dispone in modo che all'interno del materiale conduttore il campo elettrico sia nullo. Ritornando al problema originale, se la densità di carica superficiale interna si disponesse come nella configurazione (1), la carica presente sulla superficie esterna non può essere influenzata in alcun modo dalla disposizione della carica sulla superficie interna della cavità. Perciò la carica superficiale esterna, ignara di tutto, si disporrà sulla superficie esterna come se si trovasse nella situazione della seconda configurazione. Pertanto, in generale la disposizione delle cariche sulla superficie esterna è indipendente da quella sulla parete esterna.

Si potrebbe dubitare del ragionamento qui riportato, pretendendo che questa è sì una soluzione di come si dispongono le cariche superficiali data la forma del conduttore, la posizione e la quantità di carica della carica puntiforme, ma che potrebbero esistere altre soluzioni diverse da quella proposta, magari la cui configurazione dipende proprio dalla posizione della carica puntiforme.

Questo non può accadere, e la soluzione proposta è l'unica possibile per un motivo profondo, ovvero per *unicità della soluzione* del problema dell'elettrostatica. Cosa significa? A grandi linee, la formulazione matematica dell'elettrostatica garantisce quest'unicità, cosa che si riscontra molto facilmente in natura: in fisica se si ripete una stessa esperienza, a parità di condizioni iniziali la configurazione finale è una sola, ed è l'unica possibile¹⁰.

Effetto delle punte. Abbiamo appena mostrato che la disposizione delle cariche in un conduttore dipende dal campo elettrico a cui è sottoposto in modo tale che la superficie del conduttore sia una superficie equipotenziale. Un effetto interessante legato a questo è l'effetto delle punte: la densità

⁹Quindi in particolare anche nella parte di spazio che nel problema originale è occupata dal conduttore.

¹⁰Vi è un motivo più profondo legato alla parte matematica della determinazione della soluzione, che vi invito a guardare nell'appendice [8.2].

superficiale di carica è maggiore in corrispondenza delle parti della superficie più spigolose ¹¹.

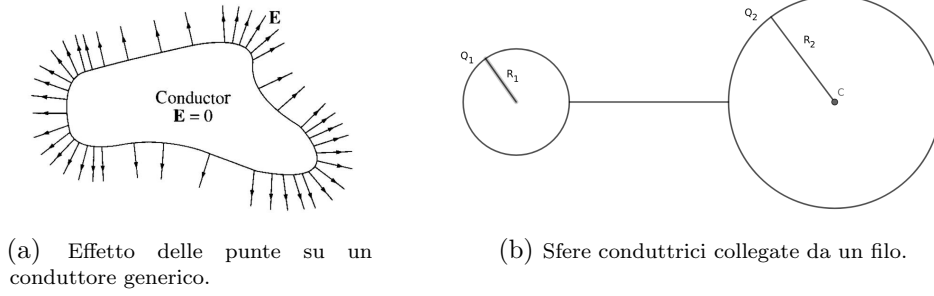


Figura 7: effetto delle punte.

Per dimostrarlo, consideriamo due sfere come in figura di raggio R_1 ed R_2 , cariche di carica Q_1 e Q_2 rispettivamente (confronta la figura 7b). Poniamole ora a contatto tramite un filo sottilissimo conduttore: la carica si distribuirà fra le due sfere in modo da farle avere lo stesso potenziale, per definizione di conduttore. Dopo il contatto, dette le cariche sulle sfere rispettivamente Q'_1 e Q'_2 , si può scrivere:

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 = Q'_1 + Q'_2 \\ \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q'_1}{R_1} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q'_2}{R_2} \end{cases}$$

Risolvendo il sistema, si ricava:

$$Q'_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} (Q_1 + Q_2) \Rightarrow \sigma'_1 = \frac{Q'_1}{4\pi\epsilon_0 R_1^2} \propto \frac{1}{R_1} \quad (28)$$

$$Q'_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (Q_1 + Q_2) \Rightarrow \sigma'_2 = \frac{Q'_2}{4\pi\epsilon_0 R_2^2} \propto \frac{1}{R_2} \quad (29)$$

Dal risultato si può pensare di dedurre che la carica tende a spostarsi in punti del corpo dove la superficie è “più curva”, più appuntita.

¹¹Questo equivale a dire nei punti della superficie il cui raggio di curvatura è minore. Il raggio di curvatura di una superficie in un punto P si definisce come il raggio del *cerchio osculatore* alla curva nel punto. Come si definisce il cerchio osculatore? Data una curva qualsiasi nello spazio, piana o sghemba, consideriamo il punto P su di essa. Prendiamo allora altri due punti: A prima di P , e B dopo P . Per tre punti passa un piano, e nel piano per tre punti si può disegnare una circonferenza. Ora facciamo “tendere” sia A che B verso P . In generale, cambierà sia il piano che la circonferenza detta. Il limite della posizione di questa circonferenza è proprio il *cerchio osculatore* della curva in P .

3.3 Metodo delle cariche immagine

Andiamo ora ad analizzare un metodo standard di risoluzione di molti problemi di elettrostatica. In particolare ci poniamo l'obiettivo di studiare l'effetto della presenza di un materiale conduttore sul campo elettrico. Illustriamo il tutto con un semplice esempio.

Esempio 3.1. Calcolare il campo elettrico $\mathbf{E}$ e il potenziale V in presenza di una carica q in $(d, 0, 0)$ e di un materiale conduttore nel semispazio $x < 0$.

Soluzione 3.1. Soluzione: raggiunta la configurazione di equilibrio, sul condensatore ci sarà una certa densità di carica superficiale σ tale da “schermare” la carica q , ossia rendere costante il potenziale sulla frontiera e nullo il campo elettrico all'interno ($x < 0$).

Calcolare questa densità con un metodo “*brute force*” risulta molto laborioso, perciò ci piacerebbe schematizzare l'effetto del conduttore con la presenza di alcune cariche fittizie (dette appunto cariche immagine) poste nella regione di spazio in cui c'è il nostro metallo, in quanto i campi e potenziali generati da una carica puntiforme sono ben noti e facilmente trattabili.

In particolare, ponendo una carica q' in posizione r' si avrà (posto $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$):

$$V(\mathbf{r}) = k \frac{q'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \quad (30)$$

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = k \frac{q'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}') \quad (31)$$

Prima di fare calcoli alla cieca, facciamo qualche considerazione saggia. Sappiamo che la superficie del conduttore è equipotenziale, ma non sappiamo ancora quanto vale tale potenziale (in particolare non abbiamo ancora fissato lo zero). Poniamo lo zero del potenziale all'infinito e, poiché il piano va all'infinito, anch'esso sarà a potenziale nullo (a posteriori si può verificare che la soluzione trovata rispetta queste condizioni poste da noi). Inoltre, data la simmetria del problema per rotazioni attorno all'asse x , tutte le cariche immagine che andremo a mettere saranno poste proprio su questo asse.

Ritorniamo dunque al caso con una carica immagine q' , sapendo ora che è posta in posizione $(d', 0, 0)$ con $d' < 0$. Calcoliamo dunque il potenziale sulla superficie del conduttore:

$$0 = V(0, y, z) = k \frac{q'}{\sqrt{d'^2 + y^2 + z^2}} - k \frac{q}{\sqrt{d^2 + y^2 + z^2}} \quad (32)$$

È facile notare che $q' = -q$ e $d' = -d$ è una soluzione del problema (e per quanto detto sopra è l'unica). Abbiamo dunque:

$$V(x, y, z) = kq \left(\frac{1}{\sqrt{(x-d)^2 + y^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+d)^2 + y^2 + z^2}} \right) \quad (33)$$

$$\mathbf{E}(x, y, z) = kq \left(\frac{(x-d)\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}}}{[(x-d)^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} - \frac{(x+d)\hat{\mathbf{x}} + y\hat{\mathbf{y}} + z\hat{\mathbf{z}}}{[(x+d)^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \right) \quad (34)$$

In particolare, sulla superficie del conduttore:

$$\mathbf{E}(0, y, z) = -2k \frac{qd\hat{\mathbf{x}}}{[d^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (35)$$

Quindi il campo elettrico è perpendicolare alla superficie, come da aspettarsi dalla sua equipotenzialità. Possiamo ora calcolare la densità di carica ricordandoci che per una superficie $\Delta E_{\perp} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ e che il campo elettrico è nullo all'interno di un conduttore.

$$\sigma(0, y, z) = -\frac{qd\hat{\mathbf{x}}}{2\pi[d^2 + y^2 + z^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (36)$$

Con un semplice integrale si può verificare che la carica totale sulla superficie è pari a $-q$ (da provare a fare come esercizio). Tale risultato si sarebbe potuto ottenere anche usando la legge di Gauss: consideriamo una calotta emisferica centrata nell'origine e di raggio R . Facendo tendere il raggio a $+\infty$ si nota che il flusso va a 0 (in quanto l'area scala come R^2 , mentre il campo va come R^{-3} essendo un quello di un dipolo a grande distanza), e dunque anche la carica interna (che tende alla somma algebrica di q e la carica totale sulla superficie del conduttore). Visto che però il conduttore non è in grado di produrre magicamente della carica netta dal nulla ci deve essere per forza una stessa carica $-q$ da qualche parte: possiamo dire che essa è "all'infinito".

Un occhio attento potrebbe notare che nel sistema *carica + carica immagine*, nella regione dove era posto il conduttore, il campo non è nullo e potrebbe esserne turbato. Questo tuttavia non è un problema: noi stiamo cercando una soluzione che segua tutte le leggi della fisica dove non c'è il conduttore. Una volta trovata la soluzione e calcolata la densità superficiale, sarà questa ad assicurare che per $x > 0$ si abbia lo stesso campo di prima, mentre per $x < 0$ la carica sia totalmente schermata e dunque il campo sia nullo. Un altro modo di vederlo è che, dal momento che la densità superficiale è concentrata sul piano $x = 0$ (e dunque simmetrica per $x \rightarrow -x$) agirà allo stesso modo sui due semispazi: se quando consideriamo il semispazio destro possiamo immaginarci una carica immagine a sinistra che genera il campo

che abbiamo calcolato prima, quando consideriamo il semispazio sinistro la carica immagine andrà messa a destra andando a sovrapporsi con la carica reale e generando dunque un campo nullo.

Con un ragionamento simile possiamo giustificare la regola precedentemente solo accennata: *le cariche immagine si possono posizionare solo fuori dalla regione di interesse (ossia solo dove c'è il conduttore)*. Se per assurdo mettessimo una carica immagine fuori dal condensatore, calcolando poi σ e togliendo le cariche immagine, staremmo chiedendo al conduttore di simulare la presenza di una sorgente di campo (per gli amici, una carica puntiforme¹²). In altre parole, calcolando il flusso di $\mathbf{E}$ in un volumetto abbastanza piccolo contenente la posizione in cui avevamo messo la carica immagine, otterremmo un flusso non nullo, che secondo il teorema di Gauss implicherebbe una carica interna non nulla dove invece non c'è nulla!

Esempio 3.2. calcolare il campo elettrico $\mathbf{E}$ e il potenziale V in presenza di una carica q in $(d, 0, 0)$ e di una sfera conduttrice centrata nell'origine e di raggio $a < d$ messa a terra (che equivale a imporre che abbia potenziale nullo).

Soluzione 3.2. Anche qui iniziamo con una sola carica immagine. Sempre per la simmetria cilindrica attorno all'asse delle x , posizioniamo la carica sullo stesso asse, diciamo in $(d', 0, 0)$, e analizziamo il problema ristretto al piano xy . Procediamo ora al calcolo di q' e d' . Dal fatto che la sfera è a terra ($V = 0$ sulla superficie) otteniamo che

$$\frac{r'}{r} = \left| \frac{q'}{q} \right| = \text{cost}$$

dove r e r' sono rispettivamente le distanze di un punto generico della sfera dalla carica reale e immagine. Questo risultato ci rassicura in quanto sappiamo dalla geometria euclidea che il luogo di punti tali che il rapporto delle loro distanze da due punti fissati è costante è proprio una sfera (in due dimensioni prende il nome di Cerchio di Apollonio¹³). Visto che una sfera è univocamente determinata da due qualsiasi punti antipodali basta imporre l'uguaglianza $V(a, 0, 0) = V(-a, 0, 0) = 0$ che porta al risultato:

$$d' = \frac{a^2}{d} \quad q' = -q \frac{a}{d}$$

Se la sfera non fosse messa a terra ma fosse a un potenziale V_0 basterebbe aggiungere una carica $q'' = aV_0/k$ nell'origine (in quanto, per sovrapposizione

¹²Per i più formali, una singolarità nel potenziale

¹³cfr. https://it.wikipedia.org/wiki/Cerchio_di_Apollonio

lineare, il potenziale in tutto lo spazio coincide con la somma dei potenziali delle due distribuzioni e il potenziale della configurazione iniziale si annulla sulla superficie della sfera, mentre quello di una carica puntiforme è inversamente proporzionale alla distanza e direttamente proporzionale alla carica con coefficiente di proporzionalità k), se invece fosse isolata e neutra si avrebbe $q'' = -q'$ sempre nell'origine (in questo modo la sfera è neutra, il potenziale alla superficie del conduttore è sempre costante in quanto somma del potenziale nella situazione originale che era nullo e quello dovuto alla carica q'' che dipendendo solo dalla distanza dalla carica è costante sulla superficie sferica). In entrambi i casi abbiamo usato il principio di sovrapposizione lineare: una volta trovata la soluzione con condizione a contorno $V = 0$ ci limitiamo a trovare la soluzione a un problema in cui nello spazio c'è solo il conduttore (senza cariche esterne) per poi “sovrapporla” a quella di prima.

Il calcolo della densità superficiale e del campo elettrico nello spazio sono lasciati come esercizio al lettore.

A partire da questo risultato si possono analizzare due casi limite interessanti:

- Sfera a terra, $a \rightarrow \infty$ mantenendo fissa la distanza tra la carica e la sfera (che per comodità chiameremo D). Dunque anche $d \rightarrow \infty$ ma $d - a = D$ costante. In questo modo il nostro sistema tende ad assomigliare ad un piano conduttore infinito davanti al quale pongo una carica a distanza D . Con dei semplici conti (ricordandoci che $(1 + \epsilon)^{-1} \approx 1 - \epsilon$ per $\epsilon \ll 1$) si vede che $d' \rightarrow a - D$ e $q' \rightarrow -q$. Questo risultato è effettivamente quello che ci aspettavamo.
- Sfera neutra $d \rightarrow \infty$ ma tenendo $\frac{q}{d^2} = E_0 4\pi\epsilon_0 = \text{costante}$. In questo limite la sfera è immersa in un campo elettrico costante pari a $-E_0 \hat{\mathbf{x}}$. Le due cariche immagine si avvicinano (tendono a coincidere) e generano un dipolo

$$\mathbf{p} = q'd'\hat{\mathbf{x}} = \frac{qa^3}{d^2}\hat{\mathbf{x}} = 4\pi\epsilon_0 \mathbf{E}_0 a^3 \quad (37)$$

3.4 Capacità

Richiamiamo la definizione di capacità del condensatore, ovvero il rapporto tra la carica sulle armature e la differenza di potenziale fra esse. Nella seguente sezione si vuole provare a generalizzare questo concetto.

Proviamo a definire la capacità di un conduttore nello spazio. Esaminiamo prima il caso di un solo conduttore con carica Q_1 a potenziale V_1 , allora possiamo ragionevolmente supporre che C_1 sia tale che $Q_1 = C_1 V_1$. Questo *claim* è suggerito dalla forma della capacità del condensatore (che si ricorda

essere la capacità di un **sistema** di 2 conduttori) e rigorosamente ottenibile dalla linearità e omogeneità delle leggi di Maxwell. Consideriamo ora il caso di due conduttori di cariche Q_1 e Q_2 a potenziale V_1 e V_2 nello spazio, a configurazione fissata. Per gli stessi motivi di sopra dovrò allora avere che $Q_1 = C_{11}V_1 + C_{12}V_2$ e $Q_2 = C_{21}V_1 + C_{22}V_2$. Ho che C_{11} e C_{22} sono le capacità rispettivamente del primo e secondo conduttore, mentre C_{12} e C_{21} sono detti coefficienti di induzione. Consideriamo ora un insieme di n conduttori con cariche Q_i e a potenziale V_i disposti in una data configurazione nello spazio vuoto, abbiamo che $Q_i = \sum_{j=1}^n C_{ij}V_j$. I C_{ii} sono i coefficienti di capacità (e sono sempre positivi), i C_{ij} con $i \neq j$ coefficienti di induzione (simmetrici per scambio di i e j e sempre negativi), entrambi dipendono solamente dalla geometria dei conduttori. Dunque abbiamo ora definito la capacità del singolo conduttore come la carica totale sul conduttore stesso mantenuto a potenziale unitario mentre tutti gli altri conduttori sono messi a terra. Possiamo definire anche la capacità di un sistema di conduttori; in particolare il caso di 2 conduttori tra i quali c'è induzione completa (i.e. tutte le linee di campo che escono da uno terminano sull'altro) è un condensatore. Come detto sopra si definisce la capacità reciproca C del sistema di 2 conduttori aventi cariche Q e $-Q$ come $C = Q/\Delta V$ con ΔV la differenza di potenziale tra il conduttore a potenziale maggiore e quello a potenziale minore (ricordiamo che C deve essere positiva).

Esercizio: Determinare C in funzione dei coefficienti C_{ij} .

Da ora in poi smettiamo di trattare sistemi di conduttori in maniera generale per soffermarci sul caso oltremodo rilevante del condensatore. Ai fini pratici avremmo potuto definire tutto usando solamente la capacità reciproca, difatti la capacità di un conduttore singolo sarebbe allora stata quella di un condensatore con armature il conduttore in questione e un altro all'infinito.

Se non siete pratici con il calcolo delle capacità potete calcolare, quella dei condensatori più semplici (piano, cilindrico, sferico) come esercizio propeudeutico. Basta usare la definizione di capacità e integrare il campo elettrico per trovare ΔV .

Ricaviamo brevemente l'energia del condensatore (corrisponde al lavoro per caricarlo cambiato di segno). Chiamando con q la carica sulle armature del condensatore durante la carica e Q quella alla fine di tale processo:

$$dU = q dV = q dq/C \implies \int_0^U dU = \int_0^Q q dq/C \implies U = \frac{Q^2}{2C} \quad (38)$$

4 Eletticità nei materiali

4.1 Introduzione

In buona approssimazione ogni materiale appartiene o alla classe dei conduttori o a quella degli isolanti (detti anche dielettrici). Come si è già visto nei conduttori si considera una riserva ‘illimitata’ di cariche, provenienti da ionizzazione, libere di muoversi. Questo oggetto ideale modella bene la situazione più reale, in cui alcuni elettroni (tipicamente 1 o 2 per atomo) non sono vincolati ad un singolo nucleo. Negli isolanti invece ciascuna carica è fissata ad un dato atomo o ad una data molecola, e dunque non ha la libertà di movimento propria delle cariche nei conduttori. Gli effetti macroscopici causati dal moto vincolato di queste cariche danno luogo al tipico comportamento dei dielettrici. I modi principali in cui un campo elettrico esterno può cambiare la distribuzione microscopica di carica di un dielettrico sono due: deformazione ed orientazione delle molecole che formano il materiale.

Dipoli indotti. Introduciamo la polarizzabilità atomica (molecolare), per atomi (molecole) neutri. Iniziamo pensando a questo esercizio:

Problema 4.1. Si consideri un modello atomico semplificato dato da un nucleo puntiforme di carica positiva q , circondato da una sfera di raggio a con densità di carica uniforme e carica totale $-q$, immerso in un campo esterno uniforme E . Cosa succede all’atomo?

Soluzione 4.1. In presenza del campo esterno (diretto verso destra) il nucleo viene spostato leggermente a destra, la sfera leggermente a sinistra, e per spostamenti piccoli possiamo assumere che mantenga la sua forma. Chiamando d la distanza tra il centro della nuvola elettronica e il nucleo, per avere l’equilibrio il campo elettrico esterno E deve essere bilanciato da quello della sfera $E_s = \frac{qd}{4\pi\epsilon_0 a^3}$. Nota che l’atomo (sfera+nucleo), in origine totalmente neutro, ha ora un momento di dipolo $p = qd$, detto dunque dipolo indotto da E . Tipicamente p è proporzionale al campo che l’ha indotto, dunque chiamando la costante di proporzionalità α (detta polarizzabilità atomica) si ha $p = \alpha E$. Per questo modello atomico si ottiene allora $\alpha = 4\pi\epsilon_0 a^3$.

Finora abbiamo solo parlato di atomi a simmetria sferica, ma nel caso di molecole è possibile, a seconda delle asimmetrie, che sia più facile polarizzarle lungo certe direzioni piuttosto che altre. Nel caso generale, ovvero quello di una molecola di cui trascuriamo possibili simmetrie, si ottiene che per le componenti di $\mathbf{p}$ vale $p_i = \sum_{ij} \alpha_{ij} E_j$, dove quindi α è un oggetto con nove componenti (una per ogni coppia di coordinate cartesiane). La trattazione

non cambia di molto, e possiamo comunque scrivere $\mathbf{p} = \overline{\alpha} \mathbf{E}$, dove la matrice α è detta tensore di polarizzazione.

Molecole polari. Consideriamo ora il comportamento di molecole polari, ovvero le molecole con un momento di dipolo $\mathbf{p}$ permanente (ad esempio l'acqua), in un campo elettrico. Si noti che in questo caso $\mathbf{p}$ non è necessariamente parallelo ad $\mathbf{E}$.

Se il campo è uniforme l'accelerazione del c.d.m. del dipolo è nulla, ma si ha momento torcente (rispetto al centro del dipolo) $\mathbf{N} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}$ (si noti che un tale momento tende ad allineare $\mathbf{p}$ con il campo esterno $\mathbf{E}$).

Se il campo non è uniforme allora si ha una forza netta non nulla $\mathbf{F} = q(\mathbf{E}_+ - \mathbf{E}_-)$, dove $\mathbf{E}_+$ e $\mathbf{E}_-$, è il campo nella posizione rispettivamente della carica positiva e negativa. In questo caso il momento torcente rispetto al centro rimane uguale al caso uniforme, mentre per calcolarlo rispetto ad altri punti bisogna aggiungere il termine $\mathbf{r} \times \mathbf{F}$ (come già visto nella sezione sui dipoli).

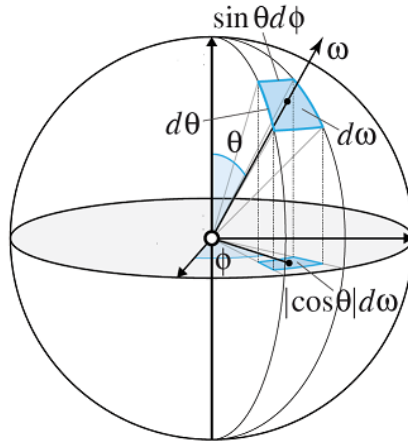


Figura 8: angolo solido infinitesimo in coordinate sferiche, si ricorda che $d\Omega = dA/r^2$, dove dA è l'elemento infinitesimo di area in sferiche $dA = r^2 \sin \theta d\theta d\phi$.

Polarizzabilità delle molecole polari. Consideriamo un gas rarefatto (ovvero uno in cui si possono trascurare le interazioni tra i vari dipoli) a temperatura T composto da molecole con dipolo permanente $\mathbf{p}_0$. Alla situazione iniziale le medie statistiche su volumetti (contenenti grande numero di dipoli ma comunque molto più piccoli del volume occupato dal gas) dei momenti di dipolo sono $\langle p_x \rangle = \langle p_y \rangle = \langle p_z \rangle = 0$. Introducendo $\mathbf{E} = E\hat{z}$ si avrà $\langle p_z \rangle \neq 0$. Un dipolo individuale avrà energia potenziale $U = -\mathbf{p}_0 \cdot \mathbf{E} = -p_0 E \cos \theta$, dove θ è l'angolo fra $\mathbf{p}_0$ e l'asse z (si noti che è minima per il

dipolo allineato col campo). Utilizzeremo il seguente fatto sulla statistica dei gas: la densità di probabilità $W(U)$ che un dipolo abbia energia U è data dalla distribuzione di Boltzman $W(U) = Ae^{\frac{-U}{k_b T}}$, dove A è una costante di normalizzazione. Il nostro obbiettivo è quello di trovare la probabilità che il suo momento di dipolo sia orientato in un certo angolo solido infinitesimo $d\Omega' = \sin \theta d\theta d\phi$. Notiamo che dato che quello che ci interessa è la componente z del momento di dipolo, ciò che in realtà stiamo cercando è la probabilità che il momento di dipolo abbia una certa componente in z dipendentemente dalla sua energia. Possiamo dunque direttamente considerare l'angolo solido 'dell'anello' $d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$ (è come aver già integrato in sferiche su ϕ), ed ottenere $dW = 2\pi \sin \theta d\theta W(U)$, che possiamo riscrivere considerando che $U \ll k_b T$ come:

$$dW \approx 2\pi A \sin \theta \left(1 + \frac{p_0 E \cos \theta}{k_b T} \right) d\theta \quad (39)$$

Per trovare A basta imporre la condizione di normalizzazione per le densità di probabilità $\int_0^\pi dW = 1 \implies A = 1/4\pi$. Infine abbiamo:

$$\langle p_z \rangle = \int p_z dW = \int_0^\pi \frac{1}{2} p_0 \cos \theta \sin \theta \left(1 + \frac{p_0 E \cos \theta}{k_b T} \right) d\theta \quad (40)$$

Con la sostituzione $x = \cos \theta$:

$$\begin{aligned} \langle p_z \rangle &= \int_0^\pi \frac{1}{2} p_0 \cos \theta \sin \theta \left(1 + \frac{p_0 E \cos \theta}{k_b T} \right) d\theta = \\ &= \int_{-1}^1 \frac{1}{2} p_0 x \left(1 + \frac{p_0 E x}{k_b T} \right) dx = \frac{p_0^2 E}{3k_b T} \end{aligned}$$

Otteniamo così infine una legge di proporzionalità rispetto ad E e la polarizzabilità per orientamento: $\alpha_o = \frac{p_0^2}{3k_b T}$.

Si noti che c'è una differenza sostanziale tra il caso di molecole apolari (dipolo indotto, polarizzazione per deformazione) e molecole polari (dipolo permanente, polarizzazione per orientamento). Nel primo caso ogni molecola (atomo) assume un momento di dipolo dato da $\alpha \mathbf{E}$, mentre nel secondo la media $\langle p_z \rangle$ è proporzionale ad $\mathbf{E}$ e, nel caso di saturazione, può assumere al massimo il valore del dipolo permanente della molecola.¹⁴

¹⁴In entrambi i casi il campo considerato è quello locale, ovvero la somma di quello applicato dall'esterno e di quello generato dal materiale, opportunamente mediato come descritto successivamente.

4.2 Polarizzazione

Nelle precedenti sezioni si è discusso cosa succede ai singoli atomi o molecole in presenza di un campo esterno. Possiamo immaginare che l'effetto su un dielettrico di un campo elettrico esterno, sia quello di indurre momenti di dipolo su ogni particella del dielettrico, se composto da atomi neutri o molecole non polari, oppure ruotare i dipoli permanenti nel verso di $\mathbf{E}$, se composto da molecole polari. Per molecole polari in realtà la polarizzabilità è data da $\alpha + \alpha_o$ ma il secondo termine è dominante quindi il primo viene trascurato. Questo accade per temperature del dielettrico ragionevolmente basse, dato che l'agitazione termica contrasta l'allineamento col campo riducendo α_o , come si può notare dalla dipendenza di α_o da T nell'esercizio sopra. In entrambi i casi si ottiene l'allineamento di tanti momenti di dipolo in direzione del campo esterno, fenomeno noto come polarizzazione del materiale. Definiamo la polarizzazione $\mathbf{P}$ come il momento di dipolo per unità di volume ovvero $\mathbf{P} = \frac{dN}{dV} \langle \mathbf{p} \rangle$. In primo luogo ci occuperemo del campo prodotto da un dielettrico polarizzato, dopodiché indagheremo il campo che causa la polarizzazione, ed infine combineremo i risultati.

Campo prodotto da un dielettrico polarizzato. Come già detto, un dielettrico polarizzato è costituito da tanti dipoli allineati, di cui sappiamo singolarmente calcolare il potenziale. Notiamo che se $\mathbf{P}$ è uniforme si ha un accumulo di carica sulla superficie di bordo, dovuta al fatto che le cariche dei dipoli estremali che si affacciano su questa superficie non sono neutralizzate dalle cariche di segno opposto dei dipoli interni (confronta figura 9). Se invece la polarizzazione non è uniforme anche alcuni dei dipoli interni non saranno controbilanciati, pertanto si creerà anche una densità di carica all'interno del volume del dielettrico.

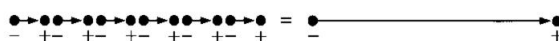


Figura 9: cariche di polarizzazione in un dielettrico monodimensionale.

Di fatto, si ha $\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$ sulla superficie del dielettrico, ed una densità volumica $\rho_b = -(\partial_x P_x + \partial_y P_y + \partial_z P_z) = -\nabla \cdot \mathbf{P}$ al suo interno, dove la 'b' al pedice indica il fatto che la carica è fissata all'interno del dielettrico. Si noti che, come visto sopra, la carica fissa non è solamente un artificio, ma ha significato fisico di una reale concentrazione di carica. Dunque conoscendo la polarizzazione è possibile, invece di ad esempio integrare su tutti i dipo-

li formanti il dielettrico¹⁵, descrivere il potenziale generato dal dielettrico polarizzato come quello generato dalle densità di carica σ_b e ρ_b aventi le espressioni di sopra.

4.3 Leggi di Maxwell in presenza di dielettrici

Campo elettrico interno al dielettrico. Discutiamo adesso un problema che abbiamo ignorato nella sezione precedente. L'espressione per il potenziale di dipolo (che abbiamo integrato nelle note a piè di pagina) vale solamente a grandi distanze dal dipolo stesso, tuttavia microscopicamente non possiamo escludere di essere arbitrariamente vicini ad un dato dipolo. Inoltre il potenziale è anche fortemente influenzato dai movimenti interni degli atomi, dunque sembra difficile ricavare informazioni a riguardo. Quello che in realtà si è fatto nella sezione precedente, senza dirlo, è mediare il potenziale in una regione del dielettrico di dimensione molto minore a quella del dielettrico stesso ma comunque grande abbastanza da contenere migliaia di atomi, analogamente a quanto si fa in termodinamica.

Legge di Gauss. Ora che abbiamo chiarito la natura del campo interno al dielettrico possiamo combinare gli effetti del campo che causa la polarizzazione e di quello che questa produce. Il campo dovuto alla polarizzazione è semplicemente quello prodotto dalle cariche fisse, mentre quello esterno è determinato dalla densità di cariche libere ρ_f , ovvero le cariche che non sono risultato della polarizzazione, ma che sono libere di muoversi. Definendo la densità totale $\rho = \rho_b + \rho_f$ si ha che la legge di Gauss diventa:

¹⁵Formalmente supponiamo nota la polarizzazione $\mathbf{P}$; allora integrando sul volume $\mathcal{V}$ dell'oggetto:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_{\mathcal{V}} \frac{\mathbf{P}(\mathbf{r}') \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3} dV' \quad (41)$$

Manipolando (sostituzione $\nabla' \left(\frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} \right) = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}'}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|^3}$ e usiamo il teorema divergenza) si ottiene che il potenziale del dielettrico polarizzato è lo stesso generato da una densità di carica superficiale $\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$ sulla superficie del dielettrico, e da una densità volumica $\rho_b = -\nabla \cdot \mathbf{P}$ al suo interno. Dunque posso scrivere il potenziale come:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\oint_S \frac{\sigma_b}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dA' + \int_{\mathcal{V}} \frac{\rho_b}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|} dV' \right) \quad (42)$$

$$\begin{aligned}\epsilon_0 \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} &= Q_{in} = \int_V \rho dV = \int_V (\rho_f - \nabla \cdot \mathbf{P}) dV \implies \\ &\implies \oint_V (\epsilon_0 \nabla \cdot \mathbf{E} + \nabla \cdot \mathbf{P}) dV = \int_V \rho_f\end{aligned}$$

Dove si è dovuto usare il teorema della divergenza. Possiamo definire lo spostamento elettrico $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P}$ e riscrivere la legge di Gauss nella forma più compatta:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = Q_{fin} \quad (43)$$

Dove con Q_{fin} si intende la carica libera nel volume d'interesse. Potrebbe sembrare che si sia trascurata la densità superficiale σ_b ¹⁶ nella densità ρ_b . Possiamo immaginare di considerare un modello di dielettrico con bordo di spessore non nullo in cui $\mathbf{P}$ decresce a 0 in maniera regolare invece di compiere un salto. In questo modo si giunge allo stesso risultato.

Conservatività. Superficialmente potrebbe sembrare che lo spostamento elettrico $\mathbf{D}$ sia analogo al campo elettrico. In realtà il parallelo fra i due non va molto oltre la legge di Gauss nel caso generale. In particolare:

- Non esiste un analogo della legge di Coulomb per $\mathbf{D}$.
- $\mathbf{D}$ non è necessariamente conservativo¹⁷.

4.4 Dielettrici lineari

Per molti materiali, detti dielettrici lineari, accade per campi ad intensità basse che $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$, dove χ_e è detta suscettività elettrica, ed $\mathbf{E}$ è il campo totale presente nel materiale (esterno+polarizzazione). Dunque si ha $\mathbf{D} = \epsilon_0(1 + \chi_e)\mathbf{E}$. Si definiscono quindi $\epsilon = \epsilon_0(1 + \chi_e)$ la permittività del materiale e $\epsilon_r = (1 + \chi_e)$ permittività relativa.

Anche per dielettrici lineari in generale $\mathbf{D}$ non è conservativo, se sono presenti interfacce fra dielettrici con permittività diverse. Tuttavia nel caso speciale di un dielettrico omogeneo in tutto lo spazio di interesse, si ha effettivamente che $\mathbf{D}$ è conservativo e $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0/\epsilon_r$, dove $\mathbf{E}_0$ è il campo prodotto dalla stessa ρ_f in assenza del dielettrico. Vale anche un'equivalente della legge di Coulomb, per cariche Q, q a distanza r in un dielettrico omogeneo vale $|F| = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Qq}{r^2}$.

¹⁶Modellizzabile altrimenti come una delta di Dirac https://it.wikipedia.org/wiki/Delta_di_Dirac.

¹⁷In particolare questo accade se il rotore di $\mathbf{P}$ non è nullo.

Energia Anzitutto bisogna specificare cosa si intende per energia del sistema quando siamo in presenza di un dielettrico. Solitamente si intende il lavoro necessario per assemblare il sistema nel seguente modo: partiamo con il dielettrico non polarizzato, poi disponiamo la carica libera lasciando rispondere il dielettrico. In questo caso l'energia risulta essere $\frac{\epsilon_0}{2} \int \epsilon_r E^2 dV = \frac{1}{2} \int \mathbf{D} \cdot \mathbf{E} dV$.¹⁸ Si noti che questa espressione non vale per dielettrici non lineari.

Forze In analogia al caso dei conduttori, le cariche fisse sui dielettrici tendono ad accumularsi nei pressi di cariche libere di segno opposto. Calcolare le forze su un dielettrico può essere tuttavia piuttosto complicato come vedremo nel prossimo esempio.

Forza fra dielettrico e condensatore Esaminiamo il problema di una lastra di dielettrico posta ad occupare parte dello spazio fra le lastre di un condensatore piano: il condensatore ha lastre rettangolari di lati a e b a distanza l , e la lastra di dielettrico ha uno spessore l e penetra il condensatore per un tratto x . La difficoltà nel calcolo delle forze, nell'approccio dinamico, segue dal fatto che le forze sul dielettrico sono causate dagli effetti di bordo del condensatore: se questi sono trascurati otteniamo un campo elettrico perpendicolare alla direzione lungo la quale può muoversi la lastra. Questo problema può essere qui aggirato usando un approccio energetico.

Si noti che è possibile modellizzare questo condensatore come due condensatori collegati in parallelo, uno vuoto e uno completamente riempito dal dielettrico. Allora dette C_1 e C_2 le loro capacità, e C la capacità del condensatore originale, si ha $C = C_1 + C_2$. Inoltre dalle espressioni per la capacità di un condensatore piano e del campo in presenza di un dielettrico lineare si ha: $C_1 = \frac{\epsilon_0(a-x)b}{l}$ e $C_2 = \frac{q}{V} = \frac{q}{El} = \frac{\epsilon_0\epsilon_r bx}{l}$. La sua energia potenziale è dunque:

$$U = \frac{q^2}{2C} = \frac{q^2 l}{2\epsilon_0 b(a + (\epsilon_r - 1)x)} \quad (44)$$

Allora la forza sul dielettrico è data da:

$$F = -\frac{dU}{dx} = \frac{(\epsilon_r - 1)ql}{2\epsilon_0 b(a + (\epsilon_r - 1)x)^2} \quad (45)$$

Si noti che F è positiva, dunque per come si è scelto x , vuol dire che il dielettrico viene 'risucchiato' all'interno del condensatore.

¹⁸Se invece si intende il lavoro per assemblare cariche libere e fisse (non includendo dunque il lavoro per deformare o ruotare i dipoli) allora l'espressione dell'energia è come visto precedentemente $\frac{\epsilon_0}{2} \int E^2 dV$.

5 Esercizi

Di seguito trovate alcuni esercizi di elettrostatica. Le soluzioni verranno pubblicate sul sito dello stage.

Problema 5.1 (Cariche immagini). Trovare l'espressione del potenziale e della carica superficiale nei seguenti casi:

1. Una carica q è posta in posizione $(d, 0, 0)$ davanti a un conduttore la cui superficie coincide in parte con il piano yz ma che presenta una sporgenza semisferica centrata nell'origine e di raggio $a < d$. E se la carica fosse in posizione generica $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ con $\bar{x} > 0$ e $\sqrt{\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + \bar{z}^2} > a$
2. Una carica q è posta in posizione $(a, b, 0)$ con $a, b > 0$ ed è presente un conduttore nella regione di spazio $x < 0 \vee y < 0$.
E se invece il conduttore fosse in $x < 0 \wedge y < 0$?
3. Usando ora un sistema di coordinate cilindriche, studiare il sistema il cui è presente un conduttore nella regione di spazio $\theta \in [\alpha, 2\pi]$ con $\alpha = \pi/2n$ per qualche $n \in \mathbb{N}^+$ e una carica q in posizione $(r, \alpha/2, z = 0)$. Studiare lo stesso sistema di prima dove però q è in posizione $(r, \bar{\theta}, z = 0)$ con $\bar{\theta} \in [0, \alpha]$ qualunque¹⁹.
4. Due cariche q sono poste rispettivamente in posizione $(a, b, 0)$ e $(-a, -b, 0)$ con $a, b > 0$ ed è presente un conduttore (messo a terra) nella regione di spazio $-d < x < d$ (ovviamente con $d < a$)

Problema 5.2 (Sfere conduttrici nello spazio). Due sfere conduttrici di raggio a distano $d \gg a$ l'una dall'altra. Su entrambe le sfere è presente una carica di ugual modulo Q ma segno opposto. Calcolare al primo ordine in a/d la forza di interazione elettrostatica.

Problema 5.3 (Cilindri conduttori nello spazio). Due cilindri infiniti conduttori di raggio R sono posti in modo tale da avere gli assi paralleli e distanti d l'uno dall'altro (ovviamente con $d > 2R$). Sapendo che la differenza di potenziale tra di essi è V_0 , calcolare la forza di interazione elettrostatica (per unità di lunghezza).

[*Hint*: può essere utile dimostrare che, chiamate r ed r' le distanze di un punto P da due punti fissati nel piano, il luogo dei punti per cui $r/r' = K$ con K una costante arbitraria, è una circonferenza.]

¹⁹Hint: si osservi cosa succede per $\alpha' = 2\alpha$.

Problema 5.4 (Facciamo scontrare palline!). Si ponga una carica q e massa m ferma a distanza d da un semispazio conduttore. Calcolare il tempo che impiega a collidere con il piano.

Considera ora tre piccole palline caricate positivamente che giacciono una ad ogni vertice di un triangolo. Le loro masse sono m_1 , m_2 e m_3 e le loro cariche sono rispettivamente Q_1 , Q_2 e Q_3 . Quando le perle vengono rilasciate dal riposo, ognuna si muove lungo una diversa linea retta (il tutto si svolge nel vuoto e si possono trascurare gli effetti gravitazionali). Quali condizioni speciali devono essere soddisfatte affinché ciò accada? Trova gli angoli del triangolo formato dalle perle, se i rapporti carica-massa delle tre palline sono nella proporzione:

$$\frac{Q_1}{m_1} : \frac{Q_2}{m_2} : \frac{Q_3}{m_3} = 1 : 2 : 3$$

Problema 5.5 (Oscillazioni di Mie). Una sfera metallica di raggio R è formata da ioni ed elettroni con carica $+Ze$ ed $-e$ rispettivamente, e densità numerica uniforme n_i e n_e . La carica totale è zero. La sfera è posizionata in un campo elettrico costante e uniforme $\mathbf{E}_0$. Vogliamo determinare la distribuzione della carica sulla sfera e il relativo campo elettrico, supponendo che a causa del campo esterno tutti gli elettroni siano si sono spostati di $-\delta$ rispetto agli ioni, con $\delta \ll R$, e che le sfere ioniche ed elettroniche mantengano la loro forma.

1. Trova il campo elettrostatico nella regione in cui gli ioni e gli elettroni si sovrappongono.
2. Trova il campo elettrostatico nella regione al di fuori di entrambe le sfere.
3. Assumendo che δ sia abbastanza piccolo da assumere la densità di carica distribuita sulla superficie di una sfera, trovare la densità di carica superficiale.

Il campo esterno è ora rimosso in un tempo trascurabile.

1. Trovare l'energia elettrostatica della sfera polarizzata in funzione di δ .
2. Senza il campo esterno, gli elettroni iniziano a oscillare attorno alle loro posizioni di equilibrio. Trova la frequenza di oscillazione

Problema 5.6 (Carica in campo elettrico a simmetria sferica di modulo costante (Senigallia 2011 P3)). Si considerino due superfici sferiche concentriche di raggi $R_1 = R$ ed $R_2 = 2R$ che delimitano un volume V ; un'opportuna distribuzione di cariche, in posizione determinata, è tale da generare un campo

elettrico radiale uscente, il cui modulo (E_0 noto) è uguale in tutti punti del volume V .

Il campo elettrico è nullo nei punti interni alla prima superficie (quella di raggio minore) e nei punti esterni alla seconda superficie. Per ottenere questo è necessario porre una distribuzione di carica positiva sulla superficie interna, una negativa sulla superficie esterna ed un'ulteriore distribuzione volumetrica nello spazio tra le due superfici, in modo tale che la carica totale sia nulla.

1. Quanto valgono le densità di carica superficiale (uniformi) sulle due superfici sferiche di raggio R_1 ed R_2 ?
2. Quanto vale la densità media di carica spaziale tra le due superfici sferiche di raggio R_1 ed R_2 ?

Si può facilmente verificare (per esempio considerando due corone sferiche di uguale volume) che la densità di carica spaziale non può essere uniforme; essa sarà quindi funzione della distanza dal centro: $\rho = \rho(r)$.

1. Determinare l'andamento della densità volumetrica di carica $\rho(r)$ al variare della distanza dal centro.
2. Tracciare i grafici del campo elettrico $E(r)$, della densità di carica (volumetrica) $\rho(r)$ e del potenziale elettrostatico $V(r)$, con $V_\infty = 0$, per ogni r compreso nell'intervallo $[0, 5R]$.

Una particella di massa m e carica $q > 0$, lanciata radialmente dall'esterno verso il centro della distribuzione sferica, riesce ad attraversare la sfera se la sua velocità iniziale ha un valore qualunque maggiore di v_0 (e la conservazione dell'energia mostra che $v_0^2 = 2qE_0R/m$). La stessa particella viene lanciata, da fuori, con velocità di modulo v_0 in modo che nel punto di ingresso la direzione sia ruotata di 45° rispetto a quella radiale; la particella raggiunge una distanza minima dal centro della distribuzione ($r_{\min}$) per poi uscire di nuovo all'esterno.

1. Spiegare perchè la traiettoria della particella è certamente una curva piana.
2. Scrivere l'equazione che dà il valore di $r_{\min}$ e risolverla in termini della variabile $z = r/R$ con un'opportuna tecnica numerica e con l'approssimazione dell'1%.

Problema 5.7 (L'attrazione dell'induzione elettrostatica (Senigallia 2013 P2)). Una sferetta di massa m possiede una carica q ed è appesa ad un

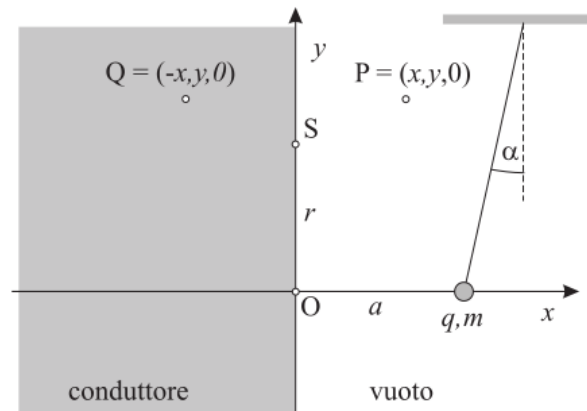


Figura 10: *Senigallia 2013, P3*: una carica davanti ad un piano conduttore.

lungo filo. Se si dispone la sferetta vicino ad una lastra conduttrice scarica, si osserva che la sferetta viene attratta dalla lastra; questo accade perché, per induzione, sulla superficie della lastra si forma una distribuzione di cariche di segno opposto a q . Si supponga che, all'equilibrio, la sferetta si trovi ad una distanza a dalla lastra e che il filo formi un angolo α con la verticale. Rispetto alla distanza a tra carica e lastra le dimensioni della sferetta sono molto piccole cosicché la carica q può essere sempre considerata **puntiforme**; inoltre le dimensioni della lastra, molto maggiori di a , possono essere considerate **infinite**. Si può quindi considerare un piano (di equazione $x = 0$) come superficie di separazione tra un mezzo conduttore nel semispazio $x < 0$ e il vuoto nel semispazio $x > 0$, entro cui si trova la sferetta. Nella figura è indicato anche il sistema di coordinate consigliato, in modo che la sferetta si trovi sull'asse $\hat{x}$, quindi nel punto di coordinate $(a, 0, 0)$, che l'asse $\hat{y}$ sia verticale e orientato verso l'alto e l'asse $\hat{z}$ perpendicolare al piano della figura ed uscente. Relativamente alla distribuzione delle cariche indotte, sarà sufficiente studiare la situazione lungo l'asse $y > 0$. Infatti, per simmetria, la densità di carica, σ , dipenderà solo dalla distanza r del punto considerato dall'origine ($r^2 = y^2 + z^2$).

1. Per determinare il campo elettrostatico in un generico punto $P = (x, y, 0)$ nel semispazio vuoto $x > 0$ si consideri inizialmente il punto $Q = (-x, y, 0)$ all'interno del materiale conduttore e simmetrico di P rispetto al piano di separazione tra i due mezzi. Si scrivano il vettore campo e.s. $\mathbf{E}(Q)$ prodotto da tutte le cariche presenti e il vettore $\mathbf{E}_1(Q)$ prodotto dalle sole cariche indotte che si formano sulla superficie della lastra (piano $x = 0$).
2. Si scriva adesso il campo e.s. $\mathbf{E}_1$ (prodotto dalle sole cariche indotte

presenti sulla superficie della lastra) nel punto P nel semispazio $x > 0$, mostrando che, limitatamente a questo semispazio, il campo $\mathbf{E}_1$ è identico a quello generato da una singola carica puntiforme q di cui si chiede il valore e la posizione.

3. A titolo d'esempio, si scriva il campo e.s. (totale) $\mathbf{E}$, nel punto $A = (a, a, 0)$.
4. Si scriva il campo e.s. (totale) $\mathbf{E}$, in prossimità del punto $S = (0, r, 0)$ nel semispazio vuoto, cioè in un punto vicinissimo alla superficie della lastra, a distanza r dall'origine O ; in altri termini, il limite dell'espressione del campo per $x \rightarrow 0^+$, $y = r$, $z = 0$.
5. Si calcoli la densità di carica indotta $\sigma(r)$ nel punto S e si dica quanto vale nel punto della superficie della lastra dove il suo modulo è massimo.
6. Si calcoli il valore della carica q in funzione di m , a ed α .
7. Si calcoli la quantità totale di carica indotta sul piano conduttore.

Problema 5.8 (Carica immagine in un oggetto metallico (IPhO 2010 P1)).

Una particella puntiforme di carica elettrica q è posizionata nelle vicinanze di una superficie sferica metallica collegata elettricamente a terra e di raggio R . Di conseguenza, sulla sfera viene indotta una distribuzione superficiale di carica. Riuscire a calcolare il campo elettrico ed il potenziale elettrostatico prodotti dalla distribuzione della carica superficiale è un compito assai improbo. Tuttavia tale calcolo può essere considerevolmente semplificato utilizzando un metodo matematico chiamato metodo delle immagini. In questo metodo il campo elettrico ed il potenziale elettrostatico prodotti dalla carica distribuita sulla sfera sono equivalenti a quelli prodotti da una singola carica puntiforme q' posta dentro la sfera (non devi dimostrare ciò).

Nota: Il campo elettrico ed il potenziale elettrostatico di questa carica immagine q' riproducono il campo elettrico ed il potenziale elettrostatico solamente all'esterno della sfera (compresa la sua superficie).

- **Parte 1** – *La carica immagine.* Per la simmetria del sistema la carica q' si trova sulla linea congiungente la carica puntiforme q e il centro della sfera (confronta la figura 11).

1. Qual è il valore del potenziale elettrostatico della sfera? (0.3 punti)
2. Esprimi q' e la distanza d' della carica q' dal centro della sfera, in funzione di q , d e R . (1.9 punti)

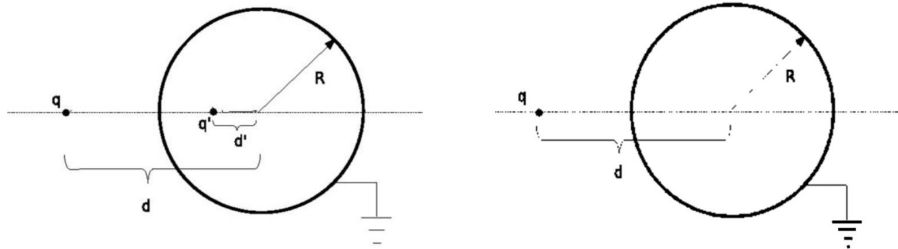


Figura 11: Sfera messa a terra

3. Trova l'espressione dell'intensità della forza che agisce sulla carica q . Si tratta di una forza repulsiva? (0.5 punti)
- **Parte 2– Schermaggio di un campo elettrostatico.** Considera una particella puntiforme di carica q posizionata a distanza d dal centro di una sfera metallica di raggio R collegata elettricamente a terra (confronta la figura 12). Siamo interessati a come la presenza della sfera

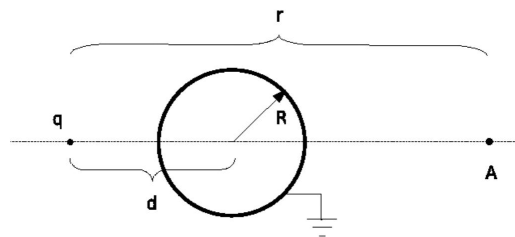


Figura 12: Schermo alla carica.

metallica collegata elettricamente a terra modifica il campo elettrico in un punto A posizionato sul lato opposto della sfera. Il punto A è sulla retta che unisce la carica q al centro della sfera; la distanza di A dalla carica puntiforme q è r .

1. Trova il vettore campo elettrico totale nel punto A . (0.6 punti)
2. Se la distanza r è molto maggiore di d , trova l'espressione approssimata per il campo elettrico nel punto A utilizzando l'approssimazione $(1 + a)^{-2} \approx 1 - 2a$, dove $a \ll 1$. (0.6 punti)
3. A che limite deve tendere d perché la sfera metallica collegata elettricamente a terra schermi completamente il campo generato dalla carica q , in modo che il campo elettrico totale in A sia esattamente nullo? (0.3 punti)

- **Parte 3–** *Piccole oscillazioni nel campo elettrico generato dalla sfera metallica.* Una particella puntiforme di carica q e massa m è legata a un filo di lunghezza L che ha l'altra estremità fissata a un muro nelle vicinanze della sfera metallica collegata elettricamente a terra (confronta la figura 13). Nelle tue considerazioni, ignora tutti gli effetti

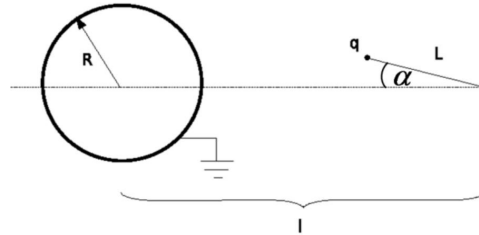


Figura 13: Oscillazioni della carica.

elettrostatici prodotti dal muro. La particella puntiforme si comporta come un pendolo matematico. Il punto al quale il filo è fissato al muro si trova a distanza l dal centro della sfera. Trascura gli effetti della gravità.

1. Trova il modulo della forza elettrica che agisce sulla carica puntiforme q per un certo angolo α e indicane chiaramente la direzione in un disegno (0.8 punti)
 2. Per questa forza, esprimi la componente perpendicolare al filo in funzione di l , L , R , q e α . (0.8 punti)
 3. Trova la frequenza delle piccole oscillazioni del pendolo. (1.0 punti)
- **Parte 4–** *L'energia elettrostatica del sistema.* Data una distribuzione di cariche elettriche, è importante calcolare l'energia elettrostatica del sistema. Nel nostro problema, c'è interazione elettrostatica tra la carica q esterna alla sfera e le cariche indotte sulla superficie della sfera ed è presente un'interazione elettrostatica anche tra le cariche indotte sulla sfera (fai riferimento alla seconda delle figure 11). In funzione della carica q , del raggio R della sfera e della distanza d determina le seguenti energie elettrostatiche:
 1. l'energia elettrostatica dovuta all'interazione tra la carica q e le cariche indotte sulla sfera; (1.0 punti)
 2. l'energia elettrostatica dovuta all'interazione tra le cariche indotte sulla sfera; (1.2 punti)

3. l'energia elettrostatica totale del sistema dovuta all'interazione.
(1.0 punti)

Hints

1.

$$\int_d^\infty \frac{x \, dx}{(x^2 - R^2)^2} = \frac{1}{2} \frac{1}{d^2 - R^2}$$

2. Una famiglia di N cariche puntiformi q_i posizionate nei punti $\mathbf{r}_i$, l'energia elettrostatica è la semisomma su tutte le coppie di cariche diverse:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{q_i q_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|}$$

Problema 5.9 (Gocciolatore di Kelvin (IPhO 2012 P2)). Per la soluzione di questo problema possono essere utili le seguenti informazioni sulla tensione superficiale. Per le molecole di un liquido, le posizioni all'interfaccia liquido-aria sono meno favorevoli rispetto alle posizioni all'interno del liquido. Perciò a questa interfaccia è associata la cosiddetta energia superficiale $U = \sigma S$ dove S è l'area della superficie dell'interfaccia e σ è la tensione superficiale del liquido. Inoltre due parti adiacenti della superficie del liquido si attirano reciprocamente con una forza $F = \sigma l$ dove l è la lunghezza del bordo che separa le due parti. Un lungo capillare metallico con diametro interno d è disposto verticalmente; l'acqua sgocciola lentamente dal forellino della sua estremità inferiore, come puoi vedere in figura. Si può considerare l'acqua come un conduttore elettrico; la sua tensione superficiale è σ e la sua densità è ρ . Assumi sempre che $d \ll r$. Con r si indica il raggio di una goccia che pende dal forellino e che cresce lentamente nel tempo fino a quando si separa dal capillare a causa dell'accelerazione di gravità g .

Parte A. Capillare singolo (4 punti)

1. (1.2 punti) Trova il raggio $r_{\max}$ di una goccia subito prima che si stacchi dal capillare.
2. (1.2 punti) Sia ϕ il potenziale elettrostatico del capillare, avendo posto a zero il potenziale elettrico a grande distanza. Trova la carica Q quando il raggio della goccia è r .
3. (1.6 punti) In questa domanda, assumi che r sia mantenuto costante e che ϕ venga aumentato lentamente. Se la pressione idrostatica al suo interno diventa più piccola della pressione atmosferica allora la goccia diventa instabile e si rompe in più parti. Trova il potenziale critico $\phi_{\max}$ a cui accadrà ciò.

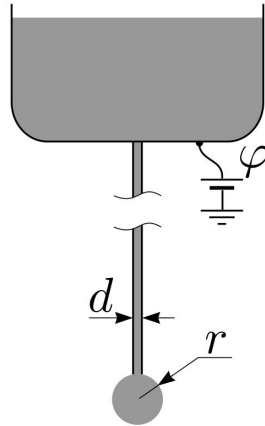


Figura 14: Gocciolatore di Kelvin, parte A.

Parte B. Due capillari (4 punti) Un apparato chiamato “Gocciolatore di Kelvin” consiste di due capillari (identici a quello descritto nella Parte A), collegati attraverso una giunzione a T , come in figura. Le estremità di entrambi i capillari sono al centro di due elettrodi cilindrici (con altezza L e diametro D , $L \gg D \gg r$); da entrambi i capillari cadono n gocce per unità di tempo. Le gocce cadono da una altezza H all’interno di recipienti conduttori

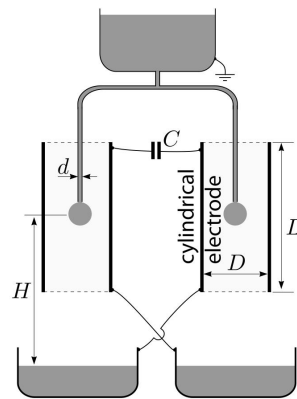


Figura 15: Gocciolatore di kelvin, parte B.

posti sotto i forellini, e collegati agli elettrodi come mostrato in figura; gli elettrodi sono connessi attraverso una capacità C . Non c’è alcuna carica netta sul sistema dei recipienti e degli elettrodi. Si noti che il contenitore superiore dell’acqua è posto a terra. La prima goccia a cadere avrà una carica molto piccola che provocherà uno sbilanciamento tra le due parti del sistema e di conseguenza una piccola separazione di carica attraverso il condensatore.

1. (1.2 punti) Esprimi il modulo della carica Q_0 delle gocce che si staccano dai capillari nell'istante in cui la carica nel condensatore è q in funzione di $r_{\max}$ (della Parte A1). Trascura gli effetti descritti nella Parte A3.
2. (1.5 punti) Trova la dipendenza di q dal tempo t approssimandola con una funzione continua $q(t)$ e assumendo che $q(0) = q_0$.
3. (1.3 punti) Il funzionamento del gocciolatore può essere ostacolato dall'effetto mostrato nella Parte A3. Inoltre, la repulsione elettrostatica fra una goccia e il recipiente sottostante fa sì che la differenza di potenziale fra i due elettrodi abbia un limite superiore $U_{\max}$; trova $U_{\max}$.

Problema 5.10 (Potenziale in un cubo (200 More Physics Puzzling Problems 141)). Considera un cubo con densità di carica volumica uniforme ρ . Prendendo lo 0 del potenziale all'infinito ($V(\infty) = 0$) trova il rapporto fra il potenziale al centro del cubo e quello su uno dei vertici.

Problema 5.11 (Aureola bella carica (200 More Physics Puzzling Problems 151)). Considero un anello e una sfera conduttori di raggi rispettivamente R e r . L'anello è caricato in modo che al suo centro il potenziale sia V_0 , mentre la sfera è messa a terra. Ora avvicino l'anello alla sfera in modo tale che il piano in cui giace l'anello sia tangente nel centro dell'anello alla sfera. Calcola la carica totale indotta sulla sfera.

Problema 5.12 (Methane is so mundane (200 More Physics Puzzling Problems 152)). Quattro piccole sfere identiche conduttrici A , B , C e D sono posizionate ai vertici di un tetraedro regolare. Se metto q su A questa ha potenziale V . La sfera A ha potenziale V anche se metto $3q/4$ su A e su una delle altre sfere.

1. Calcola la carica che va messa su A e altre due sfere per avere nuovamente il potenziale di A uguale a V (nel senso che su ciascuna delle tre sfere ci deve essere la stessa carica).
2. Stessa domanda di sopra ma utilizzando tutte le sfere.

Problema 5.13 (Carica nel condensatore (200 More Physics Puzzling Problems 146)). Considera un condensatore, con le armature messe a terra e distanti d fra loro, e una carica puntiforme q posta a distanza d_1 e d_2 dalle armature. Sia $\delta = d_1 - d/2$, trova la forza sulla carica in funzione di Q , δ e d .

Problema 5.14 (Sfera polarizzata). Considerate una sfera di raggio R con polarizzazione P uniforme.

1. Trova il campo elettrico che produce all'interno della sfera.

2. Si rimuove ora dalla sfera la sua porzione contenuta in un cilindro di raggio a , lunghezza $2R$ con $a \ll R$ e asse coincidente con un diametro della sfera. Qual'è il campo nella cavità? (Potete arrivare all'ordine 0 o 1 in a/h a seconda di quale metodo usate).
3. Ora rimuovo dalla sfera la sua intersezione con un disco di spessore h e raggio R con $h \ll R$, che abbia il diametro coincidente col diametro della sfera. Calcola il campo nella cavità.

Problema 5.15 (Condensatori e dielettrici). Un condensatore piano avente armature quadrate di lato a poste a distanza $h \ll a$ è riempito da due lastre di materiali dielettrici differenti, aventi permeabilità ϵ_1 e ϵ_2 con $\epsilon_2 > \epsilon_1$. La superficie di contatto tra le due lastre si trova in posizione x . Sulle due armature si trovano le cariche $\pm Q$ rispettivamente.

1. Calcolare il campo elettrico all'interno del condensatore, trascurando gli effetti di bordo.
2. Determinare la forza che tende a spostare le due lastre di dielettrico.
3. Ripetere il calcolo per la superficie di separazione tra i dielettrici parallela alle armature del condensatore e a metà del suo spessore.

Problema 5.16 (Capacitors suck! (IPHO 1972 P3)). Un condensatore piano con armature rettangolari di altezza H è fissato in posizione verticale e produce inizialmente un campo elettrico E . Alla base è in contatto con un liquido dielettrico di permeabilità relativa ϵ_r e densità ρ . Assumi che la distanza tra le armature sia molto minore delle dimensioni lineari delle stesse. Trascurando effetti di capillarità, trova l'altezza dalla base del condensatore h di cui il liquido è risalito nella condizione di equilibrio.

Problema 5.17 (Rutherford era un grand'uomo (IPHO 2011 - 3)). Uno ione di massa m e carica Q , inizialmente molto lontano, si muove con velocità iniziale non relativistica v_0 verso un atomo neutro di massa $M \gg m$ e polarizzabilità α . Il parametro di impatto è b come illustrato in figura 16.

L'atomo è istantaneamente polarizzato (dunque acquista momento di dipolo $\mathbf{p}$ dal campo elettrico dello ione che si avvicina. In questo problema si trascuri qualsiasi perdita di energia per radiazione.

1. Calcolare il campo elettrico $\mathbf{E}_p$ ad una distanza r dal dipolo elettrico ideale $\mathbf{p}$ situato nell'origine O , lungo la direzione individuata da $\mathbf{p}$ nella Figura 2.

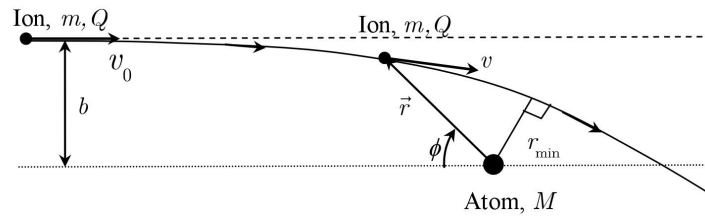


Figura 16: Problema della deviazione coulombiana di un atomo, tratto dalle IPhO 2011.

2. Trovare l'espressione della forza $\mathbf{f}$ che l'atomo polarizzato esercita sullo ione. Dimostrare che la forza è attrattiva indipendentemente dalla carica dello ione.
3. Qual è l'energia potenziale elettrica dell'interazione ione-atomo in funzione di α , Q e r ?
4. Trovare l'espressione di $r_{\min}$, cioè la distanza di massimo avvicinamento (vedi Figura 1).
5. Se il parametro d'urto b è minore di un valore critico b_c , lo ione cadrà sull'atomo descrivendo un percorso a spirale. In tale caso, lo ione sarà neutralizzato e l'atomo, invece, si caricherà. Questo processo è conosciuto con il nome di interazione di "scambio di carica". Qual è l'area della sezione d'urto, $A = \pi b_c^2$, dello "scambio di carica" della collisione tra atomo e ione?

Problema 5.18 (Dipolo di fronte ad un dielettrico). Pongo nella regione $x < 0$ un dielettrico con permeabilità relativa ϵ_r , il resto dello spazio è vuoto.

1. Considera una carica puntiforme q a distanza d dal dielettrico. Trova il campo in tutto lo spazio.
2. Considera un dipolo (inclinato di θ rispetto all'orizzontale) posto a distanza d dal dielettrico. Trova il campo in tutto lo spazio.

Problema 5.19 (4.31 Griffiths). Su una circonferenza sono presenti due cariche che formano un dipolo, che sono vincolate a muoversi su di essa e nell'istante $t = 0$ hanno velocità parallela a $\mathbf{p}$ e concorde in verso. Al centro di questa c'è invece una carica Q (confronta la figura 17). Trova la forza sul dipolo e spiega qualitativamente perché questo non può essere un moto perpetuo.

Problema 5.20 (Dielettrico Artificiale). Consideriamo un liquido isolante con suscettività elettrica trascurabile nel quale vengono buttate tante piccole

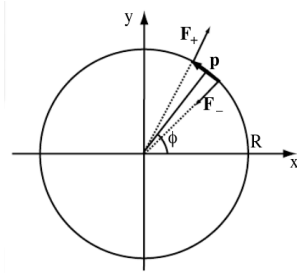


Figura 17: esercizio 4.31 del Griffiths [Gri17].

palline metalliche. Ognuna ha raggio a e la densità di palline per unità di volume è n . In approssimazione di campo medio, ovvero nel caso in cui il campo creato da una particella nella posizione di una vicina è trascurabile rispetto al campo totale presente, trovare la suscettività del dielettrico costruito artificialmente. Trovare ora una condizione sotto la quale vale nel nostro caso l'approssimazione di campo medio assunta al punto precedente.

Problema 5.21 (Esplosione Coulombiana). Una nube sferica uniformemente carica di raggio R e carica totale Q inizia a espandersi al tempo $t = 0$ a causa della repulsione coulombiana. Mostrare che se per due particelle vale $r_1(0) < r_2(0)$ allora varrà $r_1(t) < r_2(t)$ sempre (confronta la figura 18). Trovare inoltre l'equazione differenziale del moto e dimostrare che la densità di carica rimane uniforme durante l'espansione.

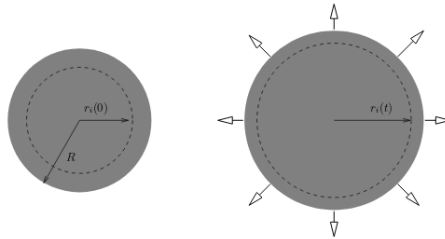


Figura 18: esplosione coulombiana.

6 Soluzioni

Per tutti i problemi presi da gare nazionali o internazionali si rimanda a [OLI]. I dielettrici non sono veramente interessanti come problemi, dirigete le vostre forze altrove.

Soluzione 6.1 (Problema 5.1). In tutti i problemi ci limiteremo a trovare la disposizione delle cariche immagine in quanto da lì in poi è un semplice problema di conti. Infatti basta usare il principio di sovrapposizione per avere $E = \sum E_i$ con E_i sono i campi delle cariche puntiformi q_i in posizioni x_i (immagini e reale) con $E_i(\mathbf{x}) = \frac{kq_i\hat{\mathbf{x}}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_i|^2}$ e $\sigma = \epsilon_0 E$.

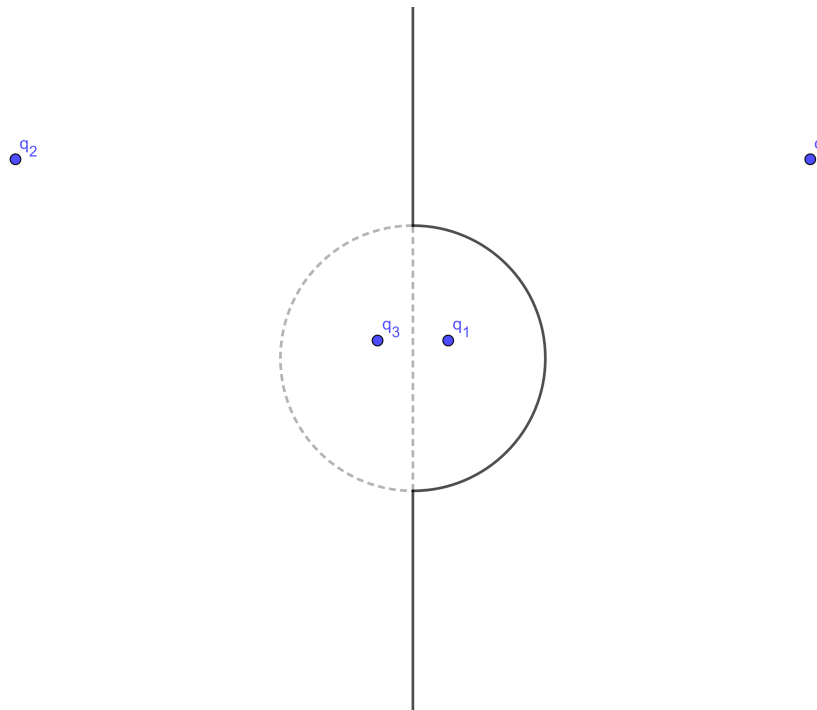
1. L'idea di base è di provare a mettere insieme i due risultati che abbiamo ottenuto per i problemi di cariche immagini con solo il piano e con solo la sfera (immaginando di continuare la semisfera dentro al conduttore, magari solo tratteggiandola).

Partiamo con il caso facile in cui la carica è posta in posizione $(d, 0, 0)$ e proviamo a mettere solo la carica immagine dovuta alla sfera, ossia $q_1 = -q \cdot \frac{a}{d}$ in posizione $(\frac{a^2}{d}, 0, 0)$ e guardiamo cosa otteniamo: la superficie della sfera (se immaginiamo di continuare la semisfera anche dentro al conduttore) è effettivamente a terra ma il piano assolutamente no!

Fino ad ora abbiamo considerato solo la presenza della sfera, adesso dimentichiamoci un attimo di questa e consideriamo la sola presenza del piano, mettendo le cariche immagini corrispondenti alle due cariche finora presenti (quella reale e quella immagine q_1 che è anch'essa a destra del piano).

Dobbiamo quindi aggiungere due cariche $q_2 = -q$ in posizione $(-d, 0, 0)$ e $q_3 = -q_1$ in posizione $(\frac{a^2}{d}, 0, 0)$.

Convinciamoci di aver effettivamente ottenuto la soluzione: il piano è a terra in quanto il contributo di q è cancellato dal quello della sua immagine rispetto al piano q_2 mentre quello di q_1 è cancellato da q_3 ; la sfera è a terra in quanto il contributo di q è cancellato dal quello della sua immagine rispetto al piano q_1 mentre quello di q_3 è cancellato da q_2 (qui sto usando il principio di sovrapposizione lineare: divido il sistema fisico come due sistemi ciascuno con solo due cariche e dico che il potenziale totale è la somma dei potenziali nei due casi). Inoltre se avessimo tentato di fare lo stesso giochetto di prima non avremmo comunque ottenuto nulla di fatto: provando a fare la carica immagine di una qualsiasi delle quattro cariche presenti rispetto al piano o alla sfera otterrei solo un'altra delle quattro cariche (in particolare la sfera manda $q \rightarrow q_1$ $q_2 \rightarrow q_3$ e viceversa, mentre il piano manda $q \rightarrow q_2$ $q_1 \rightarrow q_3$ e



viceversa).

Facciamo ora il caso con la carica in posizione generica. Il concetto è lo stesso: continuare a fare riflessioni e inversioni circolari²⁰ fino a che non ne posso fare più e verificare che ottengo effettivamente la soluzione.

Inizio riflettendo la mia carica rispetto al piano, poi faccio l'inversione circolare di entrambe le cariche rispetto alla sfera. Un rapido controllo mi convince di aver finito.

Una piccola osservazione: in questo caso non ho problemi, ma in teoria dovrei sempre controllare che tutte le cariche immagine siano nella zona conduttrice.

2. Come prima immagino di continuare i due semispazi che delimitano la superficie del conduttore e faccio le cariche immagine della mia carica rispetto ai due piani, ottenendo così $q_1 = q_2 = -q$ rispettivamente in posizioni $(-a, b, 0)$ e $(a, -b, 0)$ e riflettendole ciascuna rispetto all'altro piano (non quello usato per ottenerle a partire dalla carica originale) si ottiene $q_3 = q$ in posizione $(-a, -b, 0)$. Osservando che per ciascun piano

²⁰È semplicemente un modo fancy per chiamare la trasformazione che data una carica mi dice dove si trova la sua carica immagine rispetto alla sfera. [Qui](#) potete trovare qualche informazione in più e convincervi di quanto ho appena detto

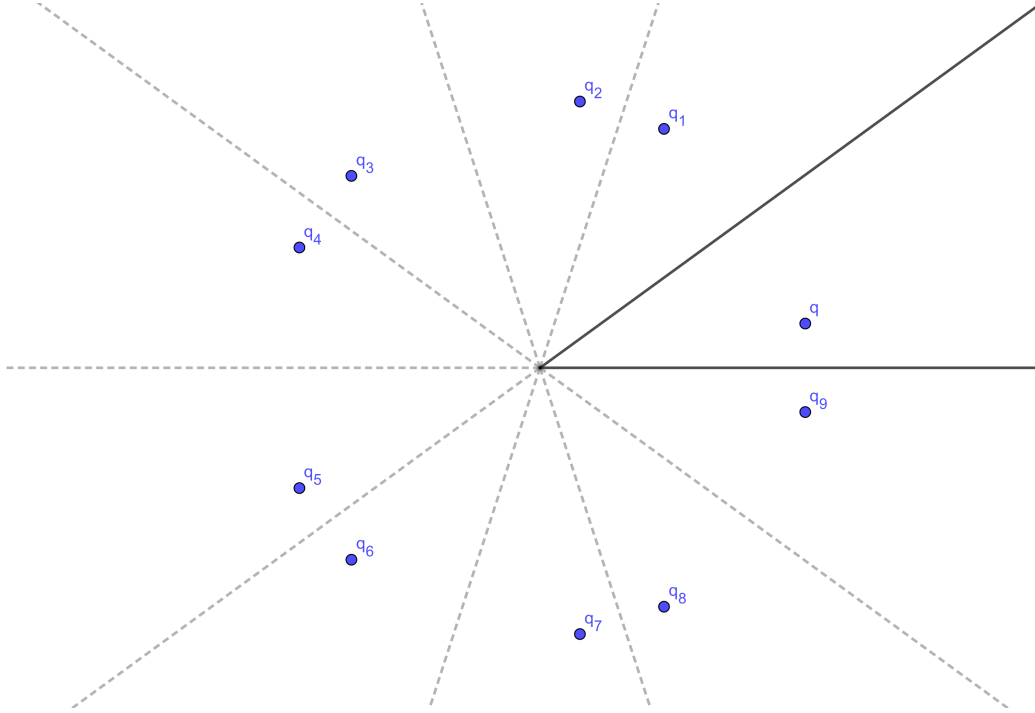
esistono due coppie di cariche (diverse per i due piani) in cui il contributo di una carica è annullato da quello dell'altra carica della coppia, ci si convince di aver finito (sempre per principio di sovrapposizione lineare). Consideriamo ora il caso analogo in cui il conduttore occupa solo uno dei quattro quadranti e la carica è posta nel quadrante opposto. Saremmo tentati di fare lo stesso ragionamento di prima e ottenere le stesse quattro cariche disposte a rettangolo. Effettivamente questa soluzione rende la superficie del conduttore equipotenziale, tuttavia avrei due cariche immagine fuori dalla zona conduttrice e quindi è da scartare. Questo è un esempio di problema non risolvibile con questo metodo.

3. Immaginiamo di suddividere lo spazio "a spicchi di torta" ossia inserendo dei piani contenenti l'asse delle z e ciascuno ottenuto da quello precedente ruotandolo di α rispetto all'asse stesso e iterativamente la carica immagine q_{i+1} la si ottiene riflettendo la carica immagine q_i rispetto al piano successivo (osserviamo che questa operazione coincide con una rotazione di un angolo α). Il processo termina grazie all'ipotesi $\frac{\pi}{\alpha} \in \mathbb{N}^+$ inoltre l'ipotesi che il denominatore sia pari serve perchè ogni riflessione cambia il segno della carica e voglio che la prima carica immagine in senso orario abbia lo stesso segno della prima in senso antiorario (entrambi opposti alla carica reale perchè ottenute con una sola riflessione a partire dalla reale, ossia rispetto ai piani effettivamente esistenti).

Ancora una volta ci convinciamo di aver ottenuto il risultato perchè i contributi delle cariche si cancellano a vicenda.

Lo stesso metodo vale anche quando la carica è posta in una posizione generica (ma in questo caso l'ipotesi sul denominatore serve anche per non avere più di una carica per ogni "fetta" di spazio)

4. Il primo istinto porterebbe a riflettere le cariche rispetto ai piani e continuare questo processo con le cariche immagini. Tuttavia, questa soluzione è problematica per vari motivi tra cui il fatto che dovrei calcolare il campo generato da un numero infinito di cariche puntiformi (che oltre a essere difficile, non so neanche se converge) e tutte nella zona fuori dal conduttore. Proviamo a guardare al problema come alla sovrapposizione di due casi più semplici: un semispazio conduttore nella zona $x \leq d$ davanti al quale c'è una carica q in posizione $(a, b, 0)$ e il problema simmetrico con il conduttore in $x \geq -d$ e carica q in $(-a, -b, 0)$.



Come abbiamo già visto, le soluzioni sono rispettivamente:

$$V_1 = \begin{cases} kq \left(\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+a-2d)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) & \text{per } x \geq d \\ 0 & \text{per } x < d \end{cases}$$

$$V_2 = \begin{cases} kq \left(\frac{1}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-a+2d)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right) & \text{per } x \leq -d \\ 0 & \text{per } x > -d \end{cases}$$

che sommate danno come soluzione al problema originale:

$$V = \begin{cases} kq \left(\frac{1}{\sqrt{(x-a)^2 + (y-b)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x+a-2d)^2 + (y-b)^2 + z^2}} \right) & \text{per } x \geq d \\ 0 & \text{per } -d < x < d \\ kq \left(\frac{1}{\sqrt{(x+a)^2 + (y+b)^2 + z^2}} - \frac{1}{\sqrt{(x-a+2d)^2 + (y+b)^2 + z^2}} \right) & \text{per } x \leq -d \end{cases}$$

Questa soluzione è valida perché soddisfa sia le leggi di Maxwell che le condizioni dati dalla presenza dei conduttori (che in realtà sono solo una conseguenza di Maxwell). Chiariamo qualche dubbio che

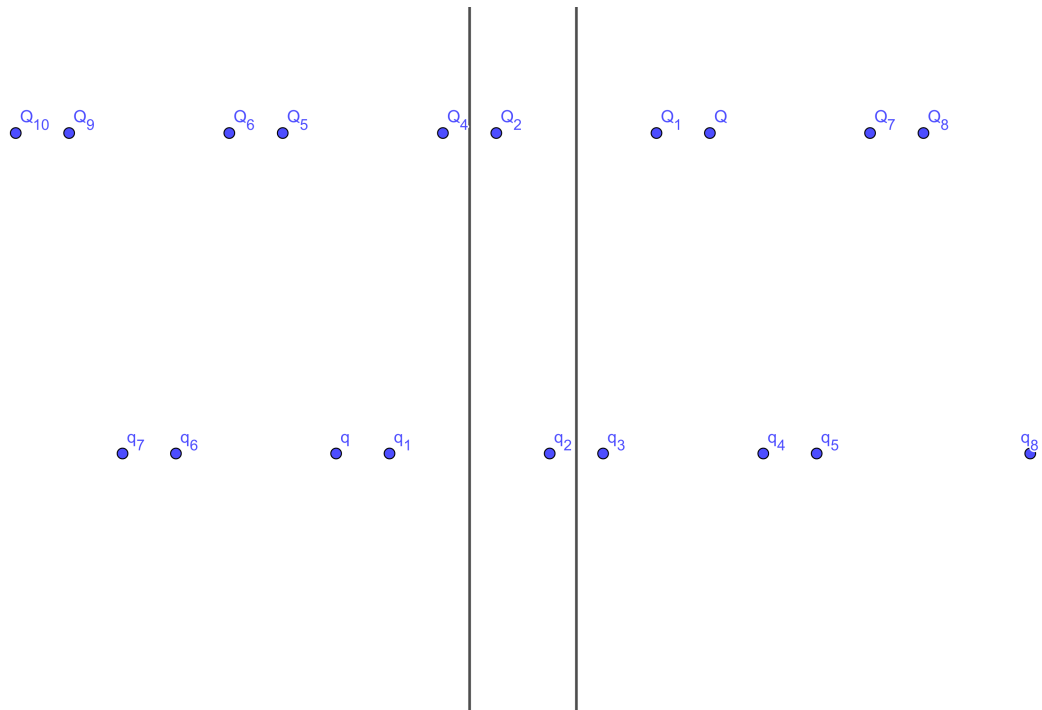


Figura 19: come NON risolvere il problema

potrebbe sorgere: perché la soluzione è legale anche se quando guardo il sistema nel complesso mi sembra ci siano delle cariche immagine in $(-a + 2d, b, 0)$ e $(a - 2d, -b, 0)$, ossia fuori dal conduttore? In realtà quando guardando l'espressione del potenziale noto che l'effetto della prima carica immagine "si sente" solo nella regione $x > d$ in cui però non c'è la carica stessa e viceversa l'effetto della seconda carica immagine "si sente" solo nella regione $x < -d$. Quindi non c'è nessun punto in cui facendo Gauss posso ottenere un assurdo (si veda pag TOT). Detto in un altro modo, la densità di carica che c'è su una delle due superfici schermo completamente la carica e quindi l'altra superficie è ignara della sua presenza.

Soluzione 6.2 (Problemi 5.2). Risolveremo il problema iterativamente, considerando all'inizio una soluzione grezza e migliorandone via via il grado di approssimazione. Inoltre, vale l'assunzione che la forza che una sfera esercita sull'altra all'ordine di approssimazione scelto è pari alla forza totale che agisce sulle cariche immagine posta dentro la sfera che subisce la forza, come sarà spiegato meglio in fondo a questa soluzione. Di seguito si farà riferimento alla figura (20).

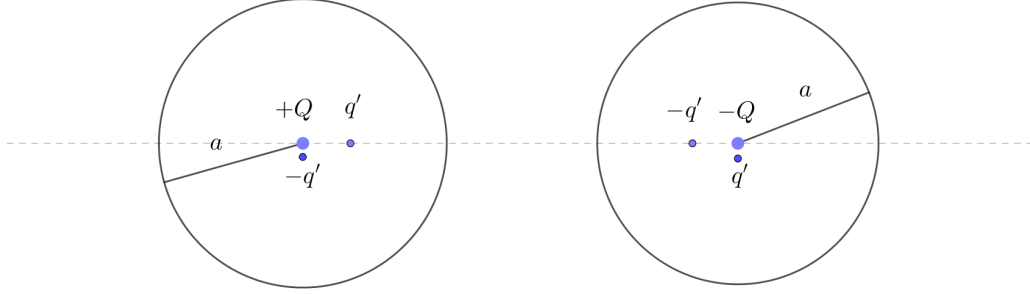


Figura 20: Immagine del problema 5.2.

Nell'approssimazione all'ordine costante, le due sfere possono essere approssimate come due cariche $+Q$ e $-Q$ centrate nei centri delle rispettive sfere a distanza d l'una dall'altra. La forza fra le due sfere, a questo ordine di approssimazione, vale $F = \frac{Q^2}{d^2}$ in modulo ed è diretta lungo la congiungente dei centri, con verso attrattivo.

Consideriamo ora la sfera di destra. La disposizione delle cariche nel centro delle due sfere non lascia il potenziale costante sulla superficie della sfera, come invece dovrebbe essere dato che la sfera è conduttrice. Per rendere il potenziale costante sulla superficie della sfera di destra, se supponiamo che l'unica carica esterna sia quella posta nel centro della sfera di sinistra, allora richiamando il risultato ottenuto a lezione (confronta 3.2) posizioneremmo due nuove cariche, $q_1 = q' = Q \frac{a}{d}$ e $q_2 = -q' = -Q \frac{a}{d}$, rispettivamente nel centro e a distanza $d' = \frac{a^2}{d}$ dal centro. Per la simmetria del problema, se avessimo fatto le stesse considerazioni per la sfera di sinistra, avremmo ottenuto altre due cariche $q'_1 = -q_1 = -q'$ e $q'_2 = -q_2 = q'$ posizionate nel centro della seconda sfera e a distanza $d' = \frac{a^2}{d}$. In questo caso, il modulo della forza vale

$$F = k_e \left(\frac{(Q - q')^2}{d^2} + 2 \frac{(Q - q')q'}{(d - d')^2} + \frac{q'^2}{(d - 2d')^2} \right) \quad (46)$$

Se ora chiamiamo $x = \frac{a}{d}$, allora $q' = Qx$ e $d' = dx^2$, perciò, sviluppando i conti in (46) e sostituendo, possiamo scrivere:

$$F = \frac{Q^2}{d^2} \left((1 - x)^2 + 2 \frac{x(1 - x)}{(1 - x^2)^2} + \frac{x^2}{(1 - 2x^2)^2} \right) \text{ siamo} \quad (47)$$

e ricordando lo sviluppo di Taylor $(1 - x^2)^{-2} \approx 1 + 2x^2$ si ha che (46) diventa

$$\begin{aligned} F &\approx \frac{Q^2}{d^2} \left(1 - 2x + x^2 + 2x(1 + 2x^2) - 2x^2(1 + 2x^2) + x^2(1 + 4x^2) \right) \\ &\approx \frac{Q^2}{d^2} (1 + 4x^3) \end{aligned}$$

dove si è trascurato tutti i termini dello sviluppo di ordine superiore al terzo (dipendenti pertanto da x^3). Notiamo che in tal modo la forza è già oltre l'ordine richiesto, e che dunque non è più necessario andare avanti nell'approssimazione. Puntualizziamo che la forza totale fra le due forze non è esattamente quella in (46), e la formula ricavata è solo l'approssimazione dovuta alla prima iterazione del procedimento delle cariche immagine. Questo ci garantisce che approssimare le sfere come cariche puntiformi è un'approssimazione più che buona per la maggiorparte dei problemi incontrati.

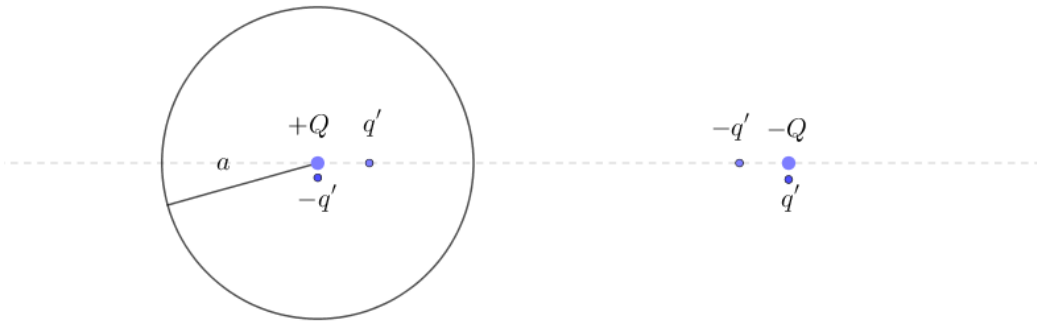
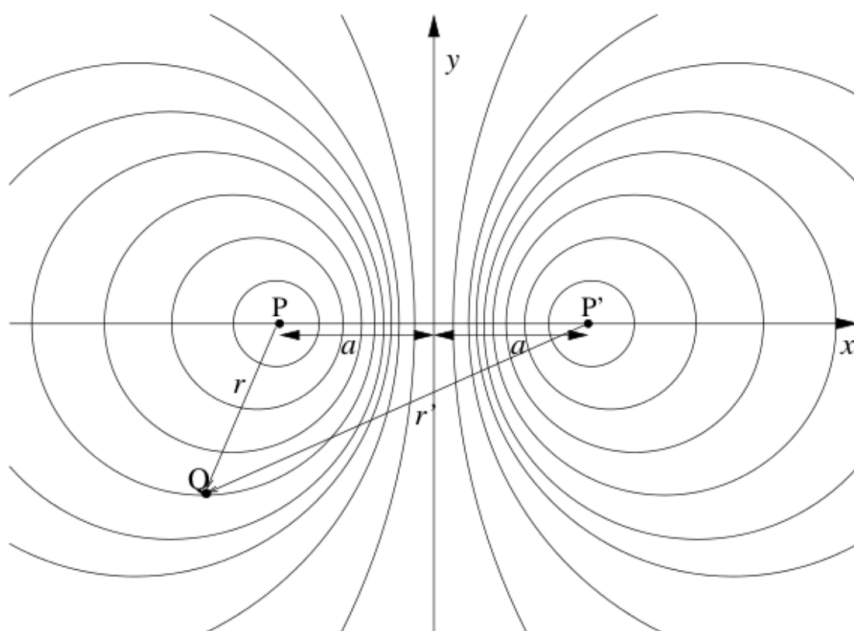


Figura 21: Problema 5.2, sostituzione della sfera conduttrice con le cariche immagine.

Perché la forza fra le sfere è proprio la forza fra le cariche immagine? Le cariche immagine sono un costrutto che realizzano il campo elettrico all'esterno dei conduttori. Ora, consideriamo una nuova configurazione, per cui abbiamo nello spazio che esiste solamente una delle due sfere conduttrici, per esempio quella di sinistra, ed al posto dell'altra poniamo solo le cariche immagini nelle stesse posizioni di figura (20), come mostrato in figura 21. A questo punto, dato che le cariche immagine della sfera rimanente sono un modo comodo per rappresentare una distribuzione di carica che genera lo stesso campo elettrico che la sfera produce. Pertanto, la forza esercitata sulle cariche che sostituiscono l'altra sfera è proprio la forza di interazione fra queste e le cariche immagine. Per la terza legge di Newton (principio di azione e reazione) questa forza è anche la stessa che le cariche immagine esercitano sulla sfera. Sostituiamo nuovamente le cariche con la sfera conduttrice. Il



campo elettrico che agisce sulla sfera di destra, nelle due configurazioni, è lo stesso, pertanto la forza che agisce sulla sfera *deve* essere la stessa. Del resto, si è supposto che il campo generato dalla sfera sia lo stesso, in prima approssimazione, di quello generato dalle cariche immagine, pertanto per la sfera di destra il fatto che ci siano cariche come in figura (21) o una sfera come in figura (20) è ininfluenza, l'importante è il campo elettrico che essa percepisce.

Soluzione 6.3 (Problema 5.3). Iniziamo dimostrando l'hint. Prendiamo un sistema di riferimento cartesiano e poniamo i due punti fissi in posizioni $(-a, 0)$ e $(a, 0)$, dunque, indicando con (x, y) le coordinate di P si ottiene $r = \sqrt{(x+a)^2 + y^2}$ e $r' = \sqrt{(x-a)^2 + y^2}$.

Elevando al quadrato entrambi i lati dell'equazione $r/r' = K$ e riarrangiando qualche termine si ha:

$$x^2 + y^2 + 2\frac{1+K^2}{1-K^2}ax = -a^2$$

da cui, completando il quadrato, si ottiene l'equazione di una circonferenza di centro $(\frac{1+K^2}{1-K^2}a, 0)$ e raggio $\frac{2Ka}{|K^2-1|}$.

Passiamo ora al problema vero e proprio. Notando l'analogia con il problema precedente vorrei iniziare a mettere qualche carica immagine, ma vista la

simmetria del problema sotto traslazioni lungo z opto per dei fili immagine paralleli all'asse z .

Da adesso in poi il problema è sostanzialmente diventato due dimensionale: devo solo dividere le coordinate x e y dei fili.

Iniziamo calcolando la forma del potenziale generato da due fili di densità di carica opposta λ e $-\lambda$ posti in posizioni $(-a, 0)$ e $(a, 0)$. Se per il teorema di Gauss il potenziale di un filo vale:

$$V(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r}{r_0}\right)$$

dove r è la distanza dal filo (sto implicitamente usando una sorta di sistema di coordinate cilindriche) e r_0 è una costante arbitraria, corrispondente alla distanza in cui abbiamo posto $V = 0$; allora il potenziale di due fili vale:

$$V = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r}{r_0}\right) - \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r'}{r'_0}\right) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r}{r'}\right) + \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r'_0}{r_0}\right)$$

con r' la distanza dal secondo filo e r'_0 analoga a r_0 . A questo punto però possiamo imporre il termine $\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r'_0}{r_0}\right)$ pari a zero, intanto r_0 e r'_0 sono costanti che posso scegliere arbitrariamente: sto semplicemente fissando lo zero del potenziale (che è infatti definito a meno di una costante) e in questo caso il luogo degli zeri coinciderà con il piano $x = 0$.

L'equazione che caratterizza le superfici equipotenziali diventa:

$$\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \log\left(\frac{r}{r'}\right) = V \quad \equiv \quad \frac{r}{r'} = e^{2\pi\epsilon_0 V/\lambda}$$

che, usando il risultato dell'hint, ci fa concludere che le superfici equipotenziali sono cilindri di centro e raggio rispettivamente:

$$x_0 = \frac{e^{4\pi\epsilon_0 V/\lambda} + 1}{e^{4\pi\epsilon_0 V/\lambda} - 1}a, \quad y_0 = 0 \quad R = \frac{2e^{2\pi\epsilon_0 V/\lambda}}{e^{4\pi\epsilon_0 V/\lambda} - 1}a$$

Moltiplicando numeratore e denominatore di x_0 e R per $e^{-2\pi\epsilon_0 V/\lambda}$ si ottiene:

$$x_0 = \frac{e^{2\pi\epsilon_0 V/\lambda} + e^{-2\pi\epsilon_0 V/\lambda}}{e^{2\pi\epsilon_0 V/\lambda} - e^{-2\pi\epsilon_0 V/\lambda}}a, \quad y_0 = 0 \quad R = \frac{2}{e^{2\pi\epsilon_0 V/\lambda} - e^{-2\pi\epsilon_0 V/\lambda}}a$$

Che si può riscrivere in termine di funzioni iperboliche come:

$$x_0 = a \coth\left(\frac{2\pi\epsilon_0 V}{\lambda}\right) \quad R = \frac{a}{\sinh\left(\frac{2\pi\epsilon_0 V}{\lambda}\right)}$$

Ora dobbiamo solo scegliere λ e a in modo che il cilindro equipotenziale a potenziale $V_0/2$ abbia raggio R e sia centrato in $(d/2, 0)$ mentre quello a potenziale $-V_0/2$ abbia raggio R e sia centrato in $(-d/2, 0)$. Dividendo membro a membro l'espressione del centro per quella del raggio otteniamo:

$$\frac{d}{2R} = \cosh\left(\frac{\pi\epsilon_0 V_0}{\lambda}\right) \Rightarrow \lambda = \frac{\pi\epsilon_0 V_0}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{d}{2R}\right)}$$

e quindi sostituendo nell'espressione del raggio (sapendo che $\cosh^2 x - \sinh^2 x = 1$ e quindi $\sinh(\operatorname{arcosh}(x)) = \sqrt{x^2 - 1}$):

$$a = R\sqrt{(d/2R)^2 - 1} = \frac{1}{2}\sqrt{d^2 - 4R^2}$$

dove la radice è ben definita perchè, per evitare compenetrazioni, $d > 2R$. Come già spiegato per il problema sopra, la forza (per unità di lunghezza) percepita da uno dei cilindri è la stessa che c'è tra i due fili immagine:

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\lambda^2}{2\pi\epsilon_0(2a)} = \frac{\lambda^2}{2\pi\epsilon_0\sqrt{d^2 - 4R^2}}$$

Soluzione 6.4 (Problema 5.4). Per il primo punto, il problema è analogo a quello di due pianeti che si schiantano nel loro centro di massa a causa della forza gravitazionale che attrae i due pianeti (confronta il problema 2 di [TBS19]). Nel nostro caso, invece, le equazioni del moto si scriveranno come segue. Ponendoci nel sistema di riferimento con assi $\hat{y}$ e $\hat{z}$ sul piano e con l'asse $\hat{x}$ ortogonale al piano e passante per la carica, la forza che agisce sulla carica a distanza x dal piano è esattamente quella che la carica immagine provocherebbe se fosse realmente esistente, ovvero (confronta 3.1)

$$\mathbf{F} = -\frac{q^2}{4x^2}\hat{x} \quad (48)$$

In questa configurazione, per il solo moto della carica a distanza x dal piano è come se ci fosse, posta nell'origine del nostro sistema di riferimento, una carica $q' = -q/4$, che appunto esercita una forza pari a quella di equazione 48. Questa configurazione è praticamente identica a quella di un pianeta che ruota intorno ad un "sole" fermo nell'origine del sistema. L'analogo della legge di Keplero per questa configurazione è:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{k_e q^2}{16\pi^2 m} \Rightarrow T = \pi \sqrt{\frac{16ma^3}{k_e q^2}} \quad (49)$$

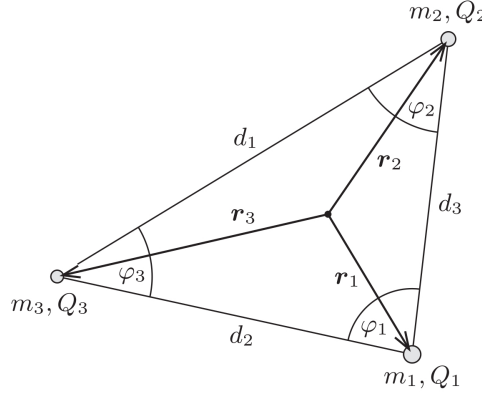


Figura 22: Figura del Problema 5.4, ispirato al Problema 130 di [HRGV16].

dove m è la massa della particella e a è il semiasse dell'orbita. Se supponiamo ora che l'orbita della particella è fortemente eccentrica, ovvero che il fuoco dell'ellisse intorno a cui orbita coincide praticamente con l'origine del nostro sistema di coordinate, allora possiamo scrivere che il tempo che la particella ci impiega ad arrivare nell'origine è pari a metà di tutto il periodo. Inoltre, dato che l'orbita è fortemente eccentrica, il semiasse principale dell'orbita sarà la semidistanza della carica dall'origine, dunque $a = \frac{1}{2}d$. Il tempo di caduta sul piano τ sarà pertanto

$$\tau = \frac{T}{2} = \pi \sqrt{\frac{md^3}{2k_e q^2}} \quad (50)$$

Consideriamo ora il problema delle tre palline²¹.

In assenza di forze esterne, il centro di massa (CM) del sistema fatto dalle tre palline cariche rimane fermo (o si muove a velocità costante, che è equivalente). Perciò è un buon punto da scegliere come origine del sistema di riferimento di un sistema di coordinate, in cui $\mathbf{r}_i$ sono le posizioni delle palline nel sistema di riferimento. Si chiamino le distanze d_i fra le palline come in figura.

La forza totale che agisce sulla prima particella è la somma delle forze elettrostatiche esercitate dalle altre due cariche:

$$\mathbf{F} = m_1 \mathbf{a}_1 = k_e \frac{Q_1 Q_2}{d_3^3} (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) + k_e \frac{Q_1 Q_3}{d_2^3} (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_3) \quad (51)$$

In conseguenza della scelta dell'origine nel centro di massa si ha che

$$m_1 \mathbf{r}_1 + m_2 \mathbf{r}_2 + m_3 \mathbf{r}_3 = 0$$

²¹Liberamente ispirato al problema 130 di [HRGV16].

E sostituendo $\mathbf{r}_3$ in (51) dà l'equazione del moto per la prima pallina:

$$m_1 \mathbf{a}_1 = k_e Q_1 \left(\frac{Q_2}{d_3^3} + \frac{Q_3}{d_2^3} \left[\frac{m_1}{m_3} + 1 \right] \right) \mathbf{r}_1 + k_e Q_1 \left(\frac{Q_3}{d_2^3} \frac{m_2}{m_3} + \frac{Q_2}{d_3^3} \right) \mathbf{r}_2 \quad (52)$$

La condizione per cui la traiettoria della prima pallina sia una linea retta è che l'accelerazione deve essere allineata ad ogni istante al vettore posizione. Pertanto, il fattore che moltiplica $\mathbf{r}_2$ deve annullarsi, ovvero $Q_2 d_2^3 / m_2 = Q_3 d_3^3 / m_3$. Similmente, data la simmetria del problema se si scambiano gli indici in modo ciclico, si ottiene che

$$\frac{Q_1}{m_1} d_1^3 = \frac{Q_2}{m_2} d_2^3 = \frac{Q_3}{m_3} d_3^3 = \lambda \quad (53)$$

Dove λ ha lo stesso valore per tutti e tre i corpi. Il valore di λ **non** è una costante del moto, ma cambia col tempo dato che la distanza fra le palline aumenta.

Se le uguaglianze in (53) sono soddisfatte, allora l'accelerazione di ogni pallina può esprimersi come (segue dai conti):

$$\mathbf{a}_i = k_e \frac{Q_1 Q_2 Q_3 (m_1 + m_2 + m_3)}{\lambda m_1 m_2 m_3} \mathbf{r}_i \quad (54)$$

Perciò, ad ogni tempo fissato la proporzione del modulo dell'accelerazione è la stessa di quella dei moduli della posizione rispetto al CM. Di conseguenza, il rapporto delle distanze dall'origine delle tre palline rimane *costante nel tempo!*

Questi rapporti possono essere trovati dalla condizione (53 e dalla proporzione massa-carica delle tre palline data nel testo:

$$d_1 : d_2 : d_3 = \sqrt[3]{\frac{m_1}{Q_1}} : \sqrt[3]{\frac{m_2}{Q_2}} : \sqrt[3]{\frac{m_3}{Q_3}} = 1 : \frac{1}{\sqrt[3]{2}} : \frac{1}{\sqrt[3]{3}} \quad (55)$$

Con questo rapporto distanza e massa-carica, le tre palline si muovono in modo tale che in ogni momento il triangolo che formano è simile al triangolo iniziale, e usando il Teorema di Carnot so possono ricavare gli angoli del triangolo.

Soluzione 6.5 (Problema 5.5). Dentro un conduttore in situazione di equilibrio elettrostatico il campo elettrico è nullo. Ci si aspetta che una traslazione rigida delle cariche positive da una parte e negative dall'altra effettivamente possa essere la soluzione del problema in questione.

Ricordiamo che il campo elettrico all'interno di una sfera uniformemente carica di densità ρ vale $\mathbf{E} = \rho \mathbf{r} / (3\epsilon_0)$ (risultato che si può facilmente ottenere

con il teorema di Gauss). Avvalendoci del principio di sovrapposizione lineare per le due sfere rigide di sopra con $\mathbf{r} = \mathbf{r}_+ + \delta/2 = \mathbf{r}_- - \delta/2$ troviamo $\mathbf{E}_{int} = -\frac{\rho\delta}{3\epsilon_0}$. Ponendo $\mathbf{E} + \mathbf{E}_{int} = 0$ si trova $\delta = 3\epsilon_0 E/\rho$. Per trovare il campo fuori dalle due sfere basta ricordarsi che fuori da una sfera uniformemente carica il campo è pari a quello generato da una carica nel centro. Quindi il campo fuori è la somma vettoriale tra $\mathbf{E}$ e il campo di un dipolo formato da due cariche Q e $-Q$ a distanza δ a "cavallo" dell'origine. Quindi:

$$\mathbf{E}_{out} = \mathbf{E} + k \frac{\hat{r}(\hat{r} \cdot \mathbf{p}) - \mathbf{p}}{r^3}$$

Per trovare la densità sui bordi delle sfere non sovrapposte possiamo considerare al limite in $\delta \rightarrow 0$ come se queste fossero uno strato superficiale carico. Allora possiamo usare il risultato visto a lezione (che si dimostra banalmente con Gauss) che ci dice che $E_{out,\perp} - E_{in,\perp} = \sigma/\epsilon_0$, usando per $\mathbf{E}_{out}$ quella trovata al punto 2 e per $\mathbf{E}_{in}$ quella del punto 1 si trova $\sigma(\theta) = \rho\delta \cos\theta$. Veniamo ora al punto in cui il campo esterno viene rimosso e si chiede l'energia elettrostatica. Un modo per risolverlo è integrare la quantità $\epsilon_0/2|\mathbf{E}|^2$ su tutto lo spazio. Mentre all'interno l'integrale è ovvio poichè il campo è costante, fuori è necessario integrare in coordinate sferiche e si ottiene che l'energia elettrostatica esterna è il doppio di quella interna e quindi vale $U_{tot} = \frac{V(en_e\delta)^2}{6\epsilon_0}$. La forza vale $\mathbf{F} = -\frac{\partial U}{\partial \delta}$. Usando la seconda legge della dinamica $M\ddot{\delta} = \mathbf{F}$, dove $M = n_e e V$, si ottiene un oscillatore armonico di frequenza $\omega_p/\sqrt{3}$ con $\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}}$. Questo stesso risultato si poteva anche trovare guardando il moto di una singola carica $m_e \ddot{\delta} = -e\mathbf{E}_{int}$. Questa frequenza caratteristica si chiama frequenza di oscillazione di Mie, grandezza che spesso compare in fisica dei plasmi.

Soluzione 6.6 (problema 5.10). Sia Q la carica totale del cubo e l il suo lato. Costruiamo il cubo originale sovrapponendo 8 cubi che hanno uno spigolo $l/2$ e carica totale q . Indico con $V_c(a, p)$ e $V_v(a, p)$ il potenziale al centro e su un vertice in un cubo di lato a e carica totale p (con a e p generici). Dal principio di sovrapposizione allora ottengo $V_c(l, Q) = 8V_v(\frac{l}{2}, q)$. Se la densità di carica ρ è uniforme la carica q in uno dei cubi piccoli sarà $q = \rho(\frac{l}{2})^3 = Q/8$. Per linearità il potenziale può dipendere solo linearmente dalla carica, allora per analisi dimensionale troviamo che $V_v(a, p) = kp/a$, da cui $V_v(l, Q) = kQ/l = \frac{4kq}{l/2} = 4V_v(\frac{l}{2}, q)$. Il risultato cercato è $\frac{V_c(l, Q)}{V_v(l, Q)} = 2$.

Soluzione 6.7 (problema 5.11). Detta Q la carica dell'anello, quando questo è molto lontano dalla sfera, il potenziale al suo centro è $V_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{R} \implies Q = 4\pi\epsilon_0 R V_0$. Quando dispongo l'anello come descritto nel testo, sulla sfera

(che è connessa a terra) viene indotta una carica di polarizzazione. Il potenziale nel centro dell'anello, che ora appartiene alla sfera conduttrice, deve essere nullo. Sia $-q$ la carica totale sulla sfera (il segno meno è coerente con la scelta di $Q > 0$), voglio trovare un modo per utilizzare solamente le cariche totali su anello e sfera senza passare dalle loro distribuzioni superficiali. A questo scopo cerco un punto equidistante da tutti i punti della sfera e dell'anello. Il punto cercato è il centro della sfera, per principio di sovrapposizione il suo potenziale è somma di quello dato dalle cariche dell'anello e quello delle cariche della sfera. Il potenziale dato dalla carica sull'anello per equidistanza di tutti gli elementini di carica è $V_a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{\sqrt{r^2+R^2}}$, e come voluto dipende solo dalla carica totale sull'anello. Analogamente il potenziale al centro della sfera causato dalle cariche sulla sfera è $V_s = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$. La sfera è conduttrice dunque il suo potenziale al centro è uguale a quello sulla superficie, ovvero è nullo. Imponendo $V_a + V_s = 0$ si ottiene $q = 4\pi\epsilon_0 V_0 \frac{rR}{\sqrt{r^2+R^2}}$.

NOTA: questo problema si poteva risolvere anche con il metodo delle cariche immagine. Il risultato del problema di una carica davanti a una sfera è nota (vedere la lezione), disponendo le cariche immagine per ogni elemento di carica dell'anello ottengo un anello immagine interno alla sfera. Con qualche calcolo si giunge allo stesso risultato trovato tramite il principio di sovrapposizione.

Soluzione 6.8 (problema 5.12). Anzitutto notiamo che una configurazione di cariche in equilibrio, rimane in equilibrio se moltiplichiamo tutte le cariche per un fattore λ , e in tal caso per linearità campi elettrici e potenziali sono moltiplicati per λ . Vogliamo ottenere A al potenziale V mettendo una carica uguale su WLOG A, B e C. Chiamiamo il caso in cui si pone q su A configurazione 1, e configurazione 2 e 3 i casi in cui si pone $3q/4$ su rispettivamente A e B e su A e C. Vogliamo ottenere la nuova situazione di equilibrio per sovrapposizione delle vecchie configurazioni, sovrapponendo λ_1 volte la 1 e λ_2 volte la 2 e la 3 (che per simmetria devono contribuire in maniera uguale) abbiamo come condizioni:

$$q\lambda_1 + 2\frac{3}{4}q\lambda_2 = \frac{3}{4}q\lambda_2$$

$$\lambda_1 V + 2\lambda_2 V = V$$

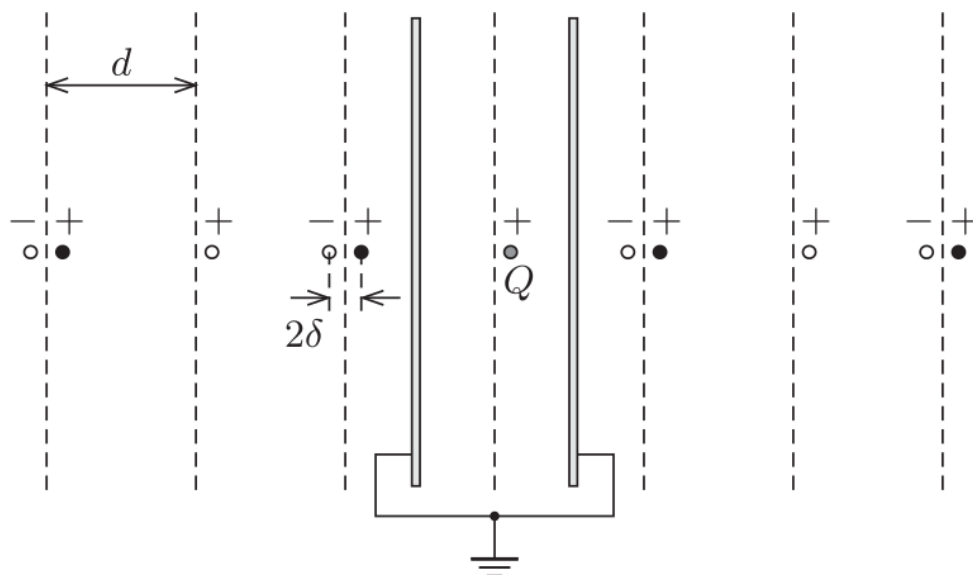
Da cui si ottiene $\lambda_1 = -3/5$, $\lambda_2 = 4/5$, dunque la carica che bisogna mettere su A, B e C è $3q\lambda_2/4 = 3q/5$. Per il secondo punto si procede allo stesso modo aggiungendo anche la configurazione 4 in cui si dispone $3q/4$ su A e D. Come sopra le condizioni 2, 3, e 4 devono contribuire in modo uguale per simmetria, allora si hanno le condizioni:

$$q\lambda_1 + 3\frac{3}{4}q\lambda_2 = \frac{3}{4}q\lambda_2$$

$$\lambda_1 V + 3\lambda_2 V = V$$

Da cui si ottiene $\lambda_1 = -1$ e $\lambda_2 = 2/3$, dunque la carica da mettere su tutte le sfere è $3/4\lambda_2 q = q/2$

Soluzione 6.9 (Problema 5.13). Questo problema è risolvibile utilizzando il metodo delle cariche immagini. Essendo necessario mantenere le facce del condensatore a potenziale nullo si inizia mettendo le due cariche immagini ovvie (ossia quelle rispetto alle due facce del condensatore stesso), ma queste alterano il potenziale sulla faccia opposta ed è quindi chiaro che è necessaria una sequenza infinita di cariche, come quelle bianche in figura. La configura-



zione di cariche bianche è quella quindi che ci determina la forza sulla carica Q . Però è evidentemente molto complicato calcolarla e quindi usiamo un piccolo stratagemma. Notando che le cariche bianche positive sono simmetriche rispetto alla carica Q possiamo non considerarle per il calcolo della forza (in quanto il loro contributo complessivo è nullo). Inoltre, questa osservazione ci conduce subito ad un'altra idea simile. Aggiungendo alla configurazione una serie di cariche positive in maniera simmetrica rispetto alla carica Q (come in figura), sicuramente altereremo il potenziale ma non la forza su Q , che è quello a cui siamo interessati in questo momento. Ma ora si vede che le cariche bianche negative e quelle nere aggiunte formano tanti dipoli di momento $2Q\delta$ identicamente orientati che con buona approssimazione sono a distanza $\pm d, \pm 3d, \pm 5d, \dots$ dalla nostra Q . Usando quindi l'espressione della

forza di dipolo che ricordiamo essere $F = 2k \frac{pQ}{r^3}$ troviamo

$$F = 2k \frac{2Q^2\delta}{r^3} \left(2 + \frac{2}{3^3} + \frac{2}{5^3} + \dots\right) = \frac{2}{\pi\epsilon_0} \frac{Q^2\delta}{r^3} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^3}$$

Per finire l'esercizio si potrebbero calcolare i primi termini e accorgersi che diventano piccoli in fretta oppure ricorrere alla funzione Zeta di Riemann.

Soluzione 6.10 (Problema 5.14). Di seguito la soluzione per i vari punti del problema.

1. Consideriamo un sistema di riferimento con l'origine nel centro della sfera e con l'asse $\hat{z}$ parallelo e concorde alla polarizzazione uniforme $\mathbf{P}$. Sia inoltre $\theta(\mathbf{x})$ l'angolo che un vettore $\mathbf{x}$ nello spazio forma con l'asse $\hat{z}$.

La polarizzazione è per definizione la densità di momento di dipolo per unità di volume, perciò il campo esterno è quello di un dipolo di momento $\mathbf{p} = \frac{4}{3}\pi r^3 \mathbf{P}$ con centro nel centro della sfera.

Dato che per ipotesi la polarizzazione è uniforme, calcoliamo la carica interna e la carica superficiale. Se la polarizzazione è uniforme, richiamando quanto fatto a lezione (cfr. le equazioni appena sotto 9), si ha che $\nabla \cdot \mathbf{P} = 0$, quindi la carica volumica fissata è nulla. La carica superficiale fissa, invece, è non nulla, e vale

$$\sigma_b = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}} = P \sin \theta \quad (56)$$

Questa disposizione di carica assomiglia a quella generata dal problema delle oscillazioni di Mie, per cui il campo dentro la sfera è costante, e vale $\mathbf{E} = \frac{1}{3\epsilon_0} \mathbf{P}$.

2. All'ordine 0, richiamando la formula 25, siccome si conserva la componente parallela di $\mathbf{E}$, il campo rimane uniforme su tutto il volume della sfera! In altri termini il campo elettrico è nullo all'interno di un cilindro uniformemente polarizzato nel limite $a/h \rightarrow 0$.

Per ottenere la variazione all'ordine uno, un altro ragionamento che si può fare è il seguente. Sulla superficie interna del cilindretto, dal fatto che $\sigma = \mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{n}}$, e dal fatto che il vettore normale della superficie laterale del cilindretto è ortogonale alla polarizzazione, si ha che non è presente alcuna densità superficiale. Perciò, la differenza del campo è dovuta alla mancanza delle cariche superficiali in corrispondenza delle basi del cilindro. Possiamo approssimare la calotta mancante dovuta

allo scavo cilindrico come se fosse piatta, poiché il raggio del cilindretto è molto minore del raggio della sfera. Su tale base, il vettore normale è parallelo alla polarizzazione, perciò si ha che la carica che manca in corrispondenza delle basi vale in modulo $|\sigma| = P$ e la carica totale è dunque $q = \pm P(\pi a^2)$, ed il segno della carica sulle due basi è opposto: la polarizzazione ha verso unico, ma il vettore normale cambia di verso. L'assenza di tali basi cariche è equivalente a posizionare sopra tali basi una distribuzione di carica di segno opposto a quella che c'era già. Questa distribuzione, all'interno del cilindretto cavo, genera una differenza di campo che nel centro può essere stimato come

$$\Delta E \simeq 2k_0 \frac{q}{(h/2)^2} = 8\pi k_0 P \left(\frac{a}{h}\right)^2 \ll \frac{1}{\epsilon_0} P$$

3. Se non togliamo la “fetta”, il campo all'interno della sfera è $E_{\text{int}} = -\frac{P}{3\epsilon_0}$. Togliendo la fetta, la cavità che rimane si comporta come un condensatore con densità di carica $\sigma = \pm P$, quindi con carica $Q \simeq \pi a^2 P$ e capacità $C = \epsilon_0 \pi a^2 / h$. La differenza di potenziale tra le due superfici del taglio è $V = Q/C = Ph/\epsilon_0$, mentre il campo generato dal “condensatore”, nullo fuori dal “condensatore” stesso, vale $E_{\text{cond}} = P/\epsilon_0$ tra le due superfici. Tra le due superfici di taglio il campo complessivo vale quindi

$$E = E_{\text{int}} + E_{\text{cond}} = \frac{2P}{3\epsilon_0}$$

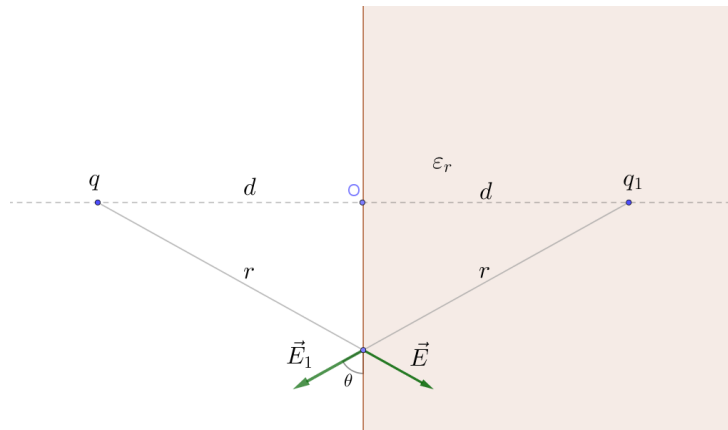
Allo stesso risultato si pu'ò giungere ricordando la continuità della componente perpendicolare di D . Nella sfera abbiamo infatti $D = \epsilon_0 E + P = -\frac{1}{3}P + P = \frac{2}{3}P$.

Soluzione 6.11 (Problema 5.15). Utilizzando la conservatività del campo elettrostatico nella sua espressione globale, ovvero circuitazione nulla, intorno a un cammino rettangolare con due lati paralleli all'interfaccia otteniamo $E_1 = E_2$ (con E_i i campi elettrici nei due diversi dielettrici). Inoltre sappiamo che vale $E_i h = V = Q/C$, ma qual è questa C ?

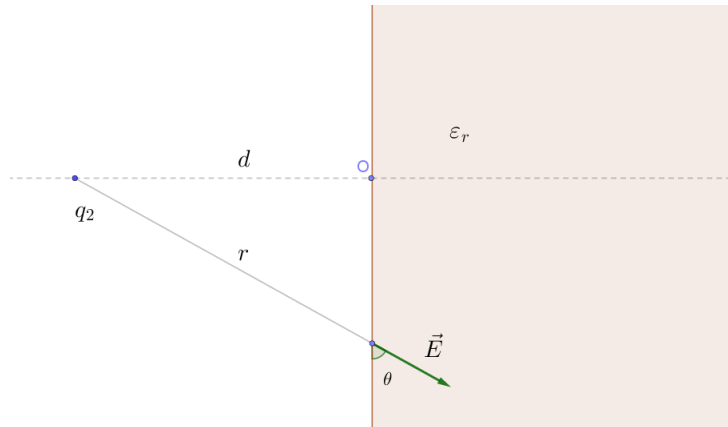
Si può facilmente osservare che, immaginando di vedere il condensatore come due condensatori appiccicati (dove la distinzione tra i due viene fatta in base al dielettrico che c'è tra le piastre), questi possono essere considerati come se fossero collegati in parallelo (infatti la d.d.p. è la stessa, visto che hanno le piastre in comune e queste sono equipotenziali). Quindi $C = C_1 + C_2 = \frac{\epsilon_1 x a}{h} + \frac{\epsilon_2 a(a-x)}{h}$.

Per calcolare la forza sugli strati dielettrici utilizziamo un approccio energetico $F = -\frac{dU}{dx}$ dove $U = \frac{Q^2}{2C}$ ed è quindi interessante notare che il dielettrico con ϵ_i

più alta viene tirato dentro, allo scopo di minimizzare l'energia del sistema. Nel caso dei due strati consecutivi con superficie di separazione parallela alle facce del condensatore ci basta usare il teorema di Gauss che ci dice che la componente perpendicolare all'interfaccia di D si conserva e quindi $\epsilon_1 E_1 = \epsilon_2 E_2$. Inoltre in questo caso abbiamo anche l'equazione $E_1 \frac{h}{2} + E_2 \frac{h}{2} = V = Q/C$ dove però C è data dalla serie di C_1 e C_2 e quindi $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$.



(a) Carica immagine all'esterno del dielettrico.



(b) Carica immagine all'interno del dielettrico.

Figura 23: Carica immagine davanti ad un dielettrico.

Soluzione 6.12 (Problema 5.18). Lo svolgimento di questo problema è analogo a quello della carica immagine per un piano conduttore. Considerate infatti la figura 23. Possiamo posizionare una carica immagine nella posizione mostrata. Perché a distanza d ? Per simmetria e per analogia al caso del piano conduttore. Il fatto che esso sia un dielettrico fa in modo che la carica

immagine posizionata non possa avere la stessa quantità di carica della carica originale.

Per essere una soluzione valida per il metodo delle immagini, dobbiamo richiedere che il campo elettrico parallelo si conservi, e che $D_\perp$ si conservi. Vicino al piano, all'esterno del dielettrico, detta r la distanza del punto sulla superficie da ognuna delle due cariche immagini, avremo che i campi saranno (confronta 23a):

$$E_1^\parallel = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin \theta (q + q_1)$$

$$E_1^\perp = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta (q - q_1)$$

Consideriamo invece la figura (23b): all'interno, il campo può essere visto come generato dalla carica q_2 , nella stessa posizione di q . Vicino alla superficie, questo campo sarà pari a

$$E_2^\parallel = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \sin \theta$$

$$E_2^\perp = \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta$$

Imponendo l'uguaglianza richiesta, si ha che

$$\begin{cases} E_1^\parallel = E_2^\parallel \\ E_1^\perp = \epsilon_r E_2^\perp \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q + q_1 = q_2 \\ q - q_1 = \epsilon_r q_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} q_1 = \frac{1 - \epsilon_r}{1 + \epsilon_r} q \\ q_2 = \frac{2}{1 + \epsilon_r} q \end{cases}$$

Nota: q_1 ha segno opposto a q , mentre q_2 è concorde.

Per un dipolo, confronta 24. Infatti, un dipolo può essere schematizzato come due cariche di segno opposto che si trovano a distanza δ l'un dall'altra. Facendo l'immagine di ognuna delle due cariche, otteniamo che il modulo del vettore momento di dipolo cambia di un fattore $\frac{1-\epsilon_r}{1+\epsilon_r}$, esattamente come le cariche. La cosa considerevole è invece che la direzione ed il verso del dipolo immagine sono speculari rispetto al piano dielettrico se confrontati a gli stessi del dipolo originale.

Soluzione 6.13 (Problema 5.19). Ruotiamo gli assi in modo che uno dei due (diciamo quello delle ascisse) divida in due l'angolo sotteso dal dipolo (che chiameremo $d\theta$). Il campo elettrico è radiale e di modulo kQ/R^2 uniforme sulla guida.

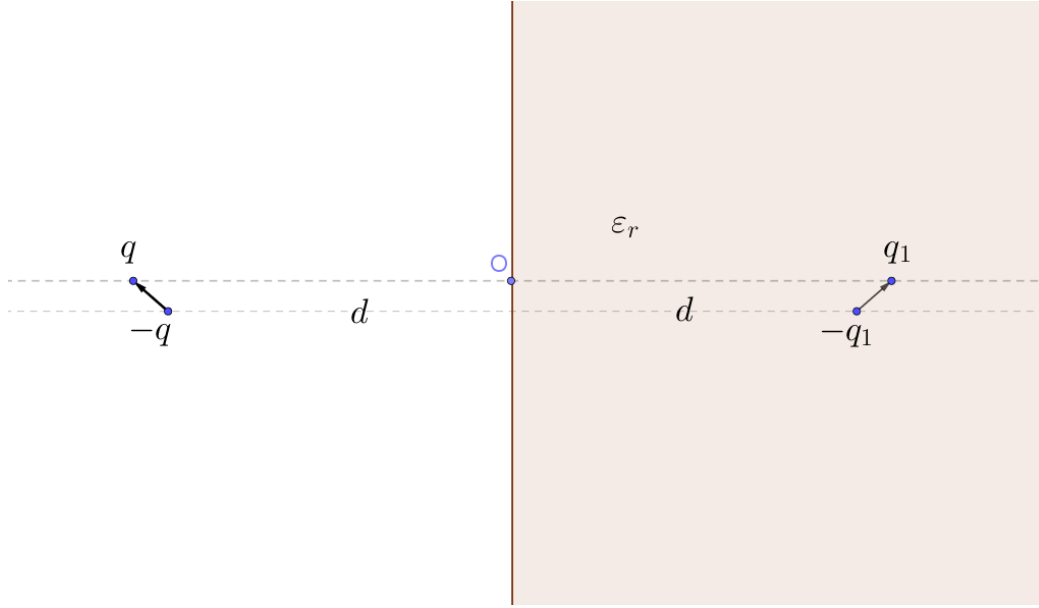


Figura 24: Dipolo davanti ad un dielettrico.

Scomponiamo le due forze mostrate in figura 17 lungo le due componenti (immaginiamo per semplicità il dipolo $\mathbf{p}$ effettivamente composto da due cariche di modulo q e distanti D , con ovviamente $p = qD$):

$$F_x = qE \cos(d\theta/2) - qE \cos(d\theta/2) = 0$$

$$F_y = qE \sin(d\theta/2) + qE \sin(d\theta/2) = 2qE \sin(d\theta/2) \approx qEd\theta \approx \frac{qED}{R} = \frac{pQ}{R^3}$$

Quindi sembrerebbe quasi ci fosse una forza tutta diretta lungo la guida (e dunque non contrastabile con la reazione vincolare, che è solo radiale) che causerebbe un moto perpetuo! Tuttavia, sebbene la reazione vincolare è solo radiale, anche la forza elettrica lo è. Inoltre, per far mantenere il moto circolare serve anche un momento torcente che tiene il dipolo orientato tangenzialmente alla guida. Come si vede dalla figura il momento torcente dovuto a Q è in senso orario mentre la rotazione del dipolo dev'essere antioraria, quindi le forze vincolari devono essere più grandi delle forze esercitate da Q e in particolare saranno frenanti per il dipolo.

Soluzione 6.14 (Problema 5.20). Una sfera metallica in un campo costante, come visto in un problema precedente, crea all'esterno di essa un campo pari a quello di un dipolo centrato in essa e di valore $\mathbf{p} = 3V\epsilon_0\mathbf{E}$, dove V è il volume della sferetta.

Dalla relazione $\mathbf{P} = \epsilon_0\chi\mathbf{E} = n\langle\mathbf{p}\rangle$ sostituendo la $\mathbf{p}$ trovata sopra (proprio per MFA: mean field approximation) si trova $\mathbf{P} = 3nV\epsilon_0\mathbf{E}$ e quindi

$$\chi = 3nV = 4n\pi a^3.$$

Troviamo ora la condizione perchè si possa usare la MFA. La distanza tra due sferette l è dell'ordine di $n^{\frac{1}{3}}$. Dobbiamo imporre quindi $E_{\text{dip}} \ll E$ a quella distanza ovvero $E_{\text{dip}} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{l^3} = a^3 n E \ll E$ ovvero $a^3 n \ll 1$.

Soluzione 6.15 (Problema 5.21). Calcoliamo il campo elettrico. Notando la simmetria radiale si ha $\mathbf{E} = E(r)\hat{r}$. Dove il valore di $E(r)$ si può trovare con il teorema di Gauss (scegliendo come superficie una sfera centrata nell'origine di raggio r): $4\pi r^2 E(r) = Q_{\text{int}}(r)/\epsilon_0$, dove $Q_{\text{int}} = Q \cdot r/R$ per $r < R$ e $Q_{\text{int}}(r) = Q$ per $r > R$. Otteniamo, infine:

$$E(r) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r}{R^3} & (r < R) \\ \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2} & (r > R) \end{cases}$$

Al tempo $t = 0$ il campo elettrico all'interno della nube sferica aumenta con r . Così, le particelle "esterne" situate a r più grandi avranno un'accelerazione più alta che le particelle "interne" situate a r più piccole, e dopo un intervallo di tempo infinitesimale le particelle "esterne" avranno una velocità più elevata (supponendo che tutte le particelle abbiano velocità nulla a $t = 0$) e non saranno superate dalle "interne". Inoltre, l'accelerazione ha anche una simmetria radiale e quindi qualsiasi strato sferico conserva la sua forma. Questi argomenti possono essere iterati per qualsiasi tempo successivo, in modo che le particelle non si superino l'un l'altra e la simmetria sferica sia preservata.

Poiché le particelle non si capovolgono tra loro, la carica all'interno di una sfera di raggio $r_i(t)$, cioè la superficie delimitata dallo strato di particelle che a $t = 0$ si trovavano a $r = r_{i0} = r_i(t = 0)$ ²², è una costante. Quindi, applicando il teorema di Gauss alla superficie sferica di tale raggio, si ha:

$$4\pi r_i^2 E(r_i) = \frac{Q}{\epsilon_0} \left(\frac{r_{i0}}{R}\right)^3$$

Da cui:

$$m \frac{d^2 r_i}{dt^2} = q E(r_i) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 r_i^2} \left(\frac{r_{i0}}{R}\right)^3$$

La forza sulle particelle, e quindi la loro accelerazione, aumenta con r_{i0} , il che è coerente con l'ipotesi del "non sorpasso".

²²Sostanzialmente è come se dipingessimo di rosso le cariche che all'istante $t = 0$ erano a un raggio fissato r_{i0} e a ogni istante temporale guardassimo la sfera delimitata dalle particelle rosse in quel momento

Introducendo ora una nuova variabile $x(t) = r_i(t)/r_{i0}$, l'equazione differenziale appena trovata può essere riscritta come:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = qE(r_i) = \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0 R^3 x^2}$$

Dove r_{i0} non compare più; questo significa che la soluzione $x(t)$ con $x(0) = 1$ descrive il moto di tutti gli strati. Come conseguenza si ha la definitiva conferma dell'ipotesi che se per due strati $r_2(0) > r_1(0)$, allora vale $r_2(t) > r_1(t) \forall t$. Infine il numero di particelle contenute tra gli strati 1 e 2 è costante ed è dato da:

$$\delta N_{12} = N \left[\left(\frac{r_2(0)}{R} \right)^3 - \left(\frac{r_1(0)}{R} \right)^3 \right]$$

E quindi la densità tra i due strati al tempo t è data da:

$$n(t) = \frac{\delta N_{12}}{(4\pi/3)[r_2^3(t) - r_1^3(t)]} = \frac{(N/r)[r_2^3(0) - r_1^3(0)]}{(4\pi/3)[r_2^3(t) - r_1^3(t)]x^3(t)} = \frac{n(0)}{x^3(t)}$$

Con $n(0) = N/(4\pi R^3/3)$ la densità iniziale. Questo risultato non dipende dalla scelta particolare dei due strati, quindi la densità è uniforme a qualsiasi t e diminuisce con il tempo come $x^{-3}(t)$.

7 Appendice A

7.1 Teorema della divergenza

Teorema 7.1 (della divergenza). *Consideriamo una superficie chiusa S e sia V_S il volume da essa racchiuso. Allora si ha*

$$\oint_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = \int_{V_S} \nabla \cdot \mathbf{v} d^3r$$

Dimostrazione. Consideriamo una partizione di V_S in n cubetti. Se V_i è il volume dell' i -esimo cubetto si ha per linearità dell'integrale

$$\int_{V_S} \nabla \cdot \mathbf{v} d^3r = \sum_{i=1}^n \int_{V_i} \nabla \cdot \mathbf{v} d^3r$$

Detta S_i la superficie dell' i -esimo cubetto, si ha anche

$$\oint_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} = \sum_{i=1}^n \oint_{S_i} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}$$

Infatti, se un cubetto ha una faccia interna a V_S , allora c'è un secondo cubetto che ha tale faccia in comune con il primo. Allora i due contributi al flusso si elidono, perché uguali e opposti. Se invece un cubetto ha una faccia appartenente alla superficie S , il suo contributo al flusso non si elide. Se ora consideriamo una suddivisione sufficientemente fitta e un cubetto con un vertice in (x, y, z) e con i lati lunghi $\Delta x, \Delta y$ e Δz , si ha al primo ordine

$$\begin{aligned}\oint_{S_i} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A} &= (v_x(x + \Delta x, y, z) - v_x(x, y, z)) \Delta y \Delta z + \\ &\quad + (v_x(x, y + \Delta y, z) - v_x(x, y, z)) \Delta x \Delta z + \\ &\quad + (v_x(x, y, z + \Delta z) - v_x(x, y, z)) \Delta x \Delta y = \\ &= \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \nabla \cdot \mathbf{v} \Delta x \Delta y \Delta z\end{aligned}$$

Sommando tutti i contributi si ottiene la tesi. $\square$

7.2 Calcolo dell'energia potenziale

Notiamo preliminarmente che, prese A funzione scalare e $\mathbf{B}$ funzione vettoriale, si ha

$$\nabla \cdot (A\mathbf{B}) = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial (AB_i)}{\partial x_i} = \sum_{i=1}^3 B_i \frac{\partial A}{\partial x_i} + A \frac{\partial B_i}{\partial x_i} = \mathbf{B} \cdot \nabla A + A \nabla \cdot \mathbf{B}$$

Usando la prima equazione di Maxwell e il teorema della divergenza si ottiene

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \oint_S V \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} + \frac{\epsilon_0}{2} \int_{V_S} |\mathbf{E}|^2 d^3r$$

Dato che supponiamo localizzata la nostra distribuzione di carica, ovvero di poter racchiudere tutte le cariche in un volume finito, possiamo supporre che S sia una sfera di raggio R sufficientemente elevato. Allora su tale superficie si ha $V|\mathbf{E}| \propto R^{-3}$, quindi nel limite $R \rightarrow \infty$ il primo integrale si annulla. Pertanto abbiamo

$$U = \frac{\epsilon_0}{2} \int |\mathbf{E}|^2 d^3r \quad (57)$$

L'integrale è esteso a tutto lo spazio.

7.3 Calcolo dell'energia di interazione

Sempre tenendo a mente che

$$\nabla \cdot (A\mathbf{B}) = \mathbf{B} \cdot \nabla A + A \nabla \cdot \mathbf{B}$$

si ha, ignorando gli integrali in $|\mathbf{E}_1|^2$ e $|\mathbf{E}_2|^2$, per il motivo spiegato nella sezione 1.3

$$U = -\epsilon_0 \int_{V_S} \mathbf{E}_1 \cdot \nabla V_2 d^3r = \epsilon_0 \int_{V_S} V_2 \nabla \cdot \mathbf{E}_1 d^3x - \epsilon_0 \oint_S V_2 \mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{A}$$

Scegliamo ora come V_S una sfera di raggio R che contiene le due cariche, privata di due sfere di raggio R_1 e R_2 centrate rispettivamente nelle due cariche. In tal modo, il primo integrale all'ultimo membro è nullo per la prima equazione di Maxwell ($\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ che è l'equivalente locale di $\Phi(\mathbf{E}) = Q_{\text{int}}/\epsilon_0$). Per il secondo, tenuto conto dei versi dei vettori superficie, si ha

$$U = -\epsilon_0 \oint_{S_R} V_2 \mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{A} + \epsilon_0 \oint_{S_{R_1}} V_2 \mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{A} + \epsilon_0 \oint_{S_{R_2}} V_2 \mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{A}$$

Il primo integrale si annulla quando $R \rightarrow \infty$. Su S_{R_2} il potenziale V_2 è costante, poiché è il potenziale della carica q_2 su una sfera centrata in q_2 , dunque il terzo integrale è nullo per la legge di Gauss. Infine, se R_1 è sufficientemente piccolo V_2 è pressoché costante sulla sfera S_{R_1} , quindi si ha per la legge di Gauss

$$U = \epsilon_0 \oint_{S_{R_1}} V_2 \mathbf{E}_1 \cdot d\mathbf{A} = q_1 V_2 = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

Quindi la (8) e la (4) danno come previsto lo stesso valore per l'energia di mutua interazione.

8 Appendice B

8.1 Legge di Gauss in forma locale

$$\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \frac{\rho(\mathbf{r})}{\epsilon_0} \quad (58)$$

Dimostrazione Data una regione di spazio V racchiusa da una superficie chiusa ∂V , scriviamo la legge di Gauss ricordandoci che $\int_V \rho(\mathbf{r}) d^3r$:

$$\frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho(\mathbf{r}) d^3r = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = \oint_{\partial V} \mathbf{E}(\mathbf{r}) \cdot \hat{\mathbf{n}} dA = \int_V \nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) d^3r$$

dove nell'ultimo passaggio si è usato il teorema della divergenza. Vista l'arbitrarietà della scelta di V , possiamo mandarne a zero il volume ottenendo in ogni punto la tesi.

Qualche osservazione: la relazione ottenuta è locale, non puntuale in quanto l'operatore di divergenza richiede l'esistenza della funzione in un intorno del punto in cui è applicato (la divergenza è un operatore differenziale, ovvero è una somma di derivate, e quindi agisce sull'andamento locale della funzione, e non sul suo valore in un punto). In secondo luogo, osserviamo che nella dimostrazione si è usato il teorema della divergenza, che richiede la continuità delle derivate del campo elettrico e la regolarità della superficie di integrazione: è quindi possibile costruire controesempi matematici alla forma locale della legge di Gauss, anche se questi non rappresentano delle effettive situazioni fisiche.

8.2 Teorema di unicità di Poisson

Dato il problema di Poisson $\nabla^2 V = -\rho/\epsilon_0$ su una regione di spazio Γ con bordo $\partial\Gamma$, sotto certe condizioni al bordo, se l'equazione ammette soluzione allora questa è unica (a meno di una costante). In particolare le condizioni al bordo che verificano l'unicità sono:

- È noto il valore di V sul bordo $\partial\Gamma$.
- È noto il valore di $\frac{\partial V}{\partial n}$ sul bordo $\partial\Gamma$, dove $\mathbf{n}$ è il versore normale uscente dalla superficie (che è come dire che è noto il valore di $\mathbf{E}_\perp$).
- Una combinazione delle precedenti (ossia, per ogni punto della superficie $\partial\Gamma$ è noto il valore di V oppure quello di $\frac{\partial V}{\partial n}$).

Dimostrazione Useremo la seguente identità vettoriale, ricavata nella sezione 7.2 ponendo $A = f$ e $\mathbf{B} = \nabla g$:

$$\nabla \cdot (f \nabla g) = f \nabla^2 g + \nabla f \cdot \nabla g$$

Supponiamo ora di avere due soluzioni V_1 e V_2 ; chiamiamo u la loro differenza ed integriamo su Γ l'identità appena vista ponendo $f = g = u$.

$$\int_{\Gamma} u \nabla^2 u + |\nabla u|^2 d^3r = \int_{\Gamma} \nabla \cdot (u \nabla u) d^3r = \oint_{\partial\Gamma} u \frac{\partial u}{\partial n} dA$$

Dove nell'ultimo passaggio si è usato il teorema della divergenza. Se V_1 e V_2 al bordo soddisfano una delle tre ipotesi allora il lato destro è nullo. Inoltre, essendo entrambe soluzioni del problema dentro a Γ , la loro differenza avrà laplaciano nullo (per linearità dell'operatore). Dunque otteniamo:

$$\int_{\Gamma} |\nabla u|^2 d^3r = 0$$

Ma poichè $|\nabla u|^2 \geq 0$ si ha $\nabla u = 0$ che implica u costante.

Riferimenti bibliografici

- [Gri17] David J. Griffiths. *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press, 2017.
- [HRGV16] Gyula Honyek, K. F. Riley, Péter Gnädig, and Máté Vigh. *200 More Puzzling Physics Problems*. 2016.
- [OLI] Sito delle olimpiadi di fisica, sezione problemi.
- [TBS19] Giovanni Maria Tomaselli, Giuseppe Bogna, and Veronica Sacchi. *Meccanica celeste*, 2019. Reperibile [qui](#).