

# Fisica II

UniVR - Dipartimento di Informatica

**Fabio Irimie**

2° Semestre 2024/2025

# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>2</b>
1.1	Campo e forza . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Elettrostatica</b>	<b>2</b>
2.1	Materia . . . . .	3
2.2	Elettrificazione . . . . .	4
2.3	Elettrostatica nel vuoto . . . . .	7
2.3.1	Interazione di Coulomb . . . . .	8
2.3.2	Sistema di più cariche . . . . .	9
2.3.3	Campo elettrostatico . . . . .	11
2.4	Energia potenziale elettrostatica . . . . .	13
2.5	(Campo) Potenziale elettrostatico . . . . .	14
2.5.1	Calcolo del potenziale . . . . .	15
2.5.2	Potenziale della carica puntiforme . . . . .	15
2.5.3	Potenziale di più cariche . . . . .	16
2.6	Linee di campo . . . . .	17
2.7	Superfici equipotenziali . . . . .	18
2.8	Teorema di Gauss . . . . .	18
2.8.1	Flusso del campo $\vec{E}$ . . . . .	20
2.9	Applicazione del teorema di Gauss . . . . .	23
2.9.1	Simmetria sferica . . . . .	23
2.9.2	Simmetria cilindrica . . . . .	28
2.9.3	Simmetria rispetto ad un piano indefinito . . . . .	31
2.10	Elettrostatica nei conduttori . . . . .	32
2.10.1	Proprietà dei conduttori in equilibrio elettrostatico . . . . .	32

# 1 Introduzione

L'oggetto principale dello studio di questo corso è la **forza elettromagnetica**  $\vec{F}_{em}$ , più precisamente la **teoria di campo**.

**Definizione utile 1.1.** La forza è l'interazione tra due oggetti.

In natura esistono solo 4 forze che governano tutto ciò che è misurabile:

- Forza di gravità (osservata quando negli oggetti interagenti c'è massa)
- Forza elettromagnetica (osservata quando negli oggetti interagenti c'è carica)
- Forza elettrodebole forte
- Forza elettrodebole debole

Le ultime due riguardano la materia microscopica. Le prime due invece riguardano la materia macroscopica e sono forze **a lungo raggio**, cioè ha effetto anche a distanza.

Lo studio della forza elettromagnetica si può fare attraverso degli strumenti che approssimano il comportamento delle entità al livello macroscopico senza preoccuparci della natura microscopica.

## 1.1 Campo e forza

In fisica 1 si sono studiati i concetti delle forze, cioè ciò che agisce su un corpo con una massa, ad esempio la caduta di un grave che è attratto dalla Terra per la forza di gravità. La visione dei campi è una visione più generale e rappresenta la proprietà di un ambiente di interagire con un corpo, ad esempio un **campo** di gravità.

# 2 Elettrostatica

Facendo esperimenti che non sono analizzabili con i concetti della fisica 1 si arriva a capire che c'è una nuova interazione, la **forza elettrostatica** che ha 2 forme:

- Forza attrattiva
- Forza repulsiva

Gli oggetti sono divisi in due classi:

- Carica positiva
- Carica negativa

Gli oggetti della stessa classe si respingono, mentre quelli di classe diversa si attraggono.

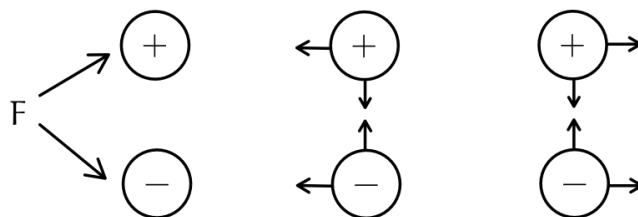


Figura 1: Tipi di carica

**Definizione 2.1** (Carica elettrica). È chiamata **carica elettrica**  $q$  la proprietà che ha il corpo di esprimere la forza elettrostatica. Le proprietà di questa carica elettrica sono **indipendenti** dal meccanismo che l'ha generata, cioè può essere generata in modo diverso, ma ha sempre le stesse proprietà. Questo implica che la carica è **preesistente** in natura.

## 2.1 Materia

L'atomo è formato da un nucleo centrale composto da protoni, carichi positivamente, e da neutroni, senza carica. Intorno al nucleo si ha una regione in cui si ha la probabilità di trovare un'altra particella, carica negativamente, chiamata elettrone.

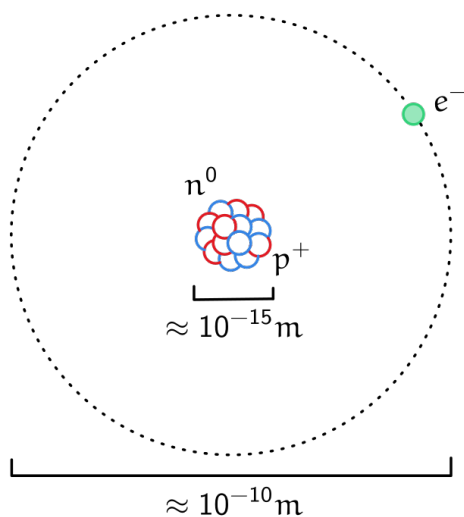


Figura 2: Struttura dell'atomo

La carica totale dell'atomo è nulla, quindi è **neutro** e di conseguenza la carica del nucleo è uguale alla carica degli elettroni, per la precisione il numero di protoni è uguale al numero di elettroni.  $Z$  è il numero atomico, cioè il numero di protoni.

Elettrone e protone hanno, in modulo, la stessa carica:

$$|q_{e^-}| = q_{p^+}$$

L'elettrone è una **particella elementare**, indivisibile e la sua carica è detta **carica elementare**, cioè la più piccola unità di carica osservabile e vale:

$$e^- = 1.6 \times 10^{-19} \text{C}$$

La **carica elettrica** in natura è quindi **quantizzata**, ovvero deve essere un multiplo della carica dell'elettrone. Inoltre la carica non si può generare, si può **solo trasferire**.

**Definizione 2.2** (Legge di conservazione della carica). In un sistema isolato, cioè che non interagisce con altri sistemi, la carica totale  $Q$  si conserva.

I componenti della materia hanno due comportamenti:

- **Conduttore**: ad esempio il metallo, in cui gli elettroni sono liberi di muoversi
- **Dielettrico** (isolante): ad esempio il vetro, in cui le cariche non sono libere di muoversi, quindi vincolate, cioè non si riesce a strappare gli elettroni dall'atomo. Se si avvicina una carica positiva al dielettrico si avrà una deformazione delle cariche, ma non si ha una separazione di carica:

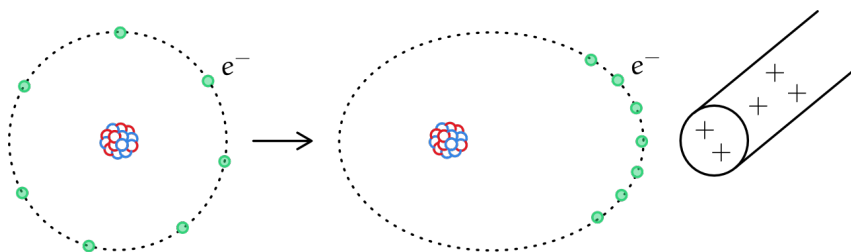


Figura 3: Deformazione delle cariche

## 2.2 Elettificazione

L'elettificazione è il trasferimento di carica da un corpo all'altro. Ci sono 3 meccanismi di elettificazione:

- **Strofinio**: Si prende una bacchetta di vetro e un panno di lana e si strofina la bacchetta. La bacchetta, inizialmente, non è carica e meccanicamente con lo strofinio si strappano gli elettroni dagli atomi. La bacchetta diventa carica positivamente e il panno negativamente. Si avranno quindi le cariche  $q^+$  della bacchetta e  $q^-$  del panno. Per la legge di conservazione della carica si ha:

$$|q^-| = q^+$$

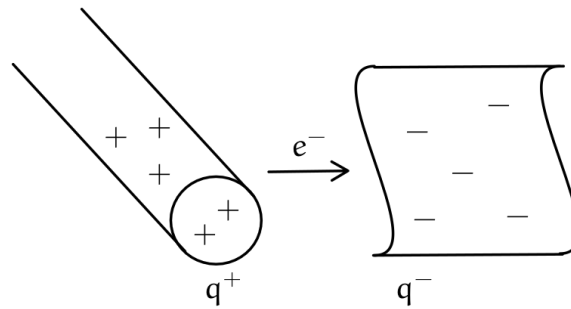


Figura 4: Strofinio

- **Induzione elettrostatica:** Con la precedente bacchetta caricata positivamente si avvicina un oggetto metallico e si nota che le cariche negative  $-Q$  del metallo si avvicinano il più possibile alla bacchetta respingendo le cariche positive  $+Q$  creando una **separazione di carica per induzione**. La carica totale rimane nulla perché non sono migrati elettroni.

$$|-Q| = +Q$$

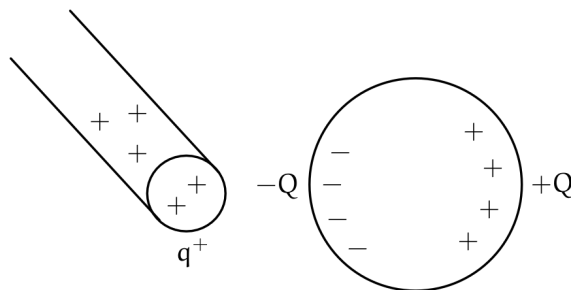


Figura 5: Induzione elettrostatica

Se si allontana l'oggetto metallico si avrà una separazione meno potente.

L'**elettroscopio** si usa per misurare la carica elettrica. È un oggetto metallico collegato a delle lamelle metalliche chiamate foglie:

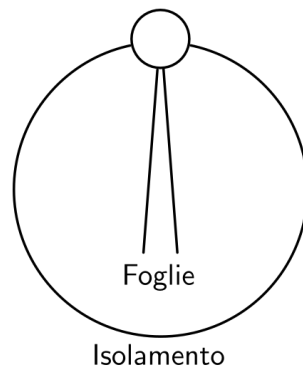


Figura 6: Elettroscopio

Si misura la carica avvicinando la bacchetta e si osserva la forza repulsiva tra le foglie dovuta alla repulsione tra le cariche positive della bacchetta e dell'elettroscopio:

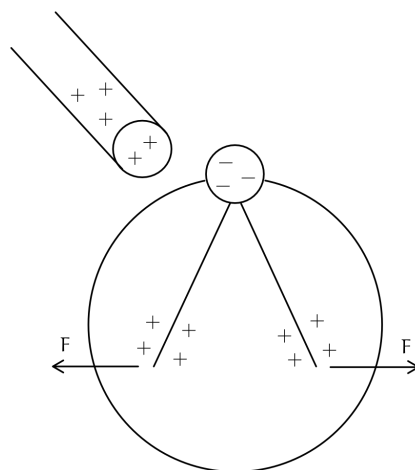


Figura 7: Elettroscopio durante una misurazione

Se si allontana la bacchetta la separazione delle foglie diminuisce.

- **Contatto** Se si prende un oggetto metallico caricato positivamente e si mette a contatto con un filo conduttore le cariche si sposteranno sul filo, elettrificandolo:

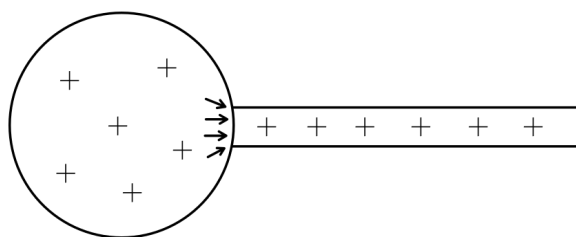


Figura 8: Elettificazione per contatto

Se si attacca il filo a terra l'oggetto si scarica perchè le cariche migrano verso la terra, cioè un conduttore immensamente più grande e quindi la carica si distribuisce su tutta la superficie della terra e sull'oggetto metallico rimane una carica **approssimativamente nulla**:

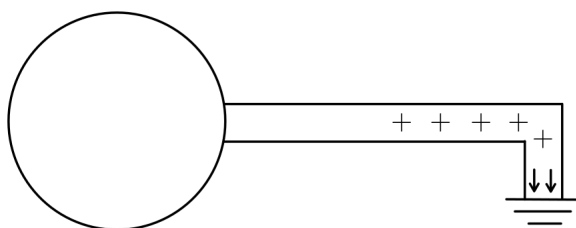


Figura 9: Scarica a terra

## 2.3 Elettrostatica nel vuoto

### Fatti sperimentali:

Si crea un esperimento che permette di osservare il fenomeno che si vuole modellare. Si prende una bilancia di torsione formata da un filo torcente a cui è appesa un'asta con una carica  $q_1^+$  su un'estremità. Se si avvicina una carica dello stesso segno  $q_2^+$  si osserva che viene applicata una forza repulsiva  $\vec{F}_{el}$  che fa torcere il filo con un momento torcente:

$$\tau_{\text{filo}} = (k\theta) = \tau_{el} = \vec{d} \times \vec{F}$$



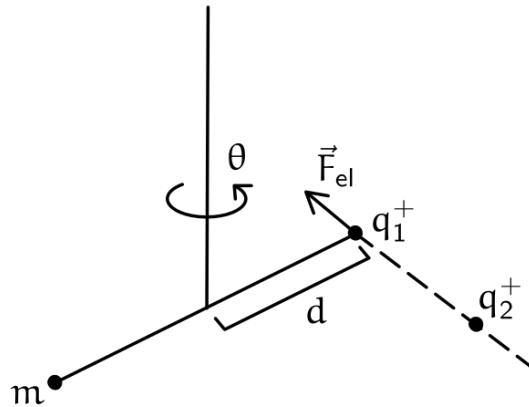


Figura 10: Bilancia di torsione

### 2.3.1 Interazione di Coulomb

Dai fatti sperimentali si nota che il modulo della forza è proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della distanza tra le cariche:

$$|F_{el}| = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

Si osserva anche che la forza elettrica  $F_{el}$  è una forza **centrale**, cioè la forza è diretta lungo la retta che congiunge le due cariche.

$k$  è la costante di Coulomb e vale:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$$

dove  $\epsilon_0$  è la costante dielettrica del vuoto. L'unità di misura della carica è il Coulomb:

$$[q] = C$$

Consideriamo la terna cartesiana con due cariche positive  $q_1^+$  e  $q_2^+$  descritte dai raggi vettori  $\vec{r}_1$  e  $\vec{r}_2$ . Sulla carica  $q_2^+$  viene applicata una forza  $\vec{F}_{12}$



Figura 11: Forza elettromagnetica

Notazione:

- Chiamo il vettore che va da  $\vec{r}_1$  a  $\vec{r}_2$   $\vec{r}_{12}$ .
- Il versore è indicato con  $\hat{r}$  e rappresenta il vettore unitario:

$$\hat{r} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}$$

Calcoliamo la forza  $\vec{F}_{12}$  che agisce su  $q_2^+$  da  $q_1^+$ :

$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)^2} \frac{(\vec{r}_2 - \vec{r}_1)}{|\vec{r}_2 - \vec{r}_1|} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \cdot \hat{r}_{12} \quad [\text{N}]$$

### 2.3.2 Sistema di più cariche

Con più cariche si osserva che vale il principio di sovrapposizione, cioè due fenomeni si sommano in modo lineare; e vale la terza legge di Newton, cioè l'azione-reazione ( $\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$ ).

Consideriamo un sistema discreto con  $n$  cariche  $q_1, q_2, \dots, q_n$  e osserviamo la carica  $q_0$ . Ognuna di queste cariche sarà descritta dal suo raggio vettore.



Figura 12: Forza elettromagnetica con più cariche

La forza che la carica  $q_i$  agisce su  $q_0$  è:

$$\vec{F}_{i0} = \frac{q_i q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}_{i0}}{r_{i0}^2}$$

dove  $\vec{r}_{i0} = \vec{r}_0 - \vec{r}_i$ .

Applichiamo questa formula osservando una ad una tutte le cariche come fatto per  $q_0$  per calcolare la forza totale applicata sulla carica  $q_0$ :

$$\vec{F}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}_{i0}}{r_{i0}^2} \quad [\text{N}]$$

Questa forza ha direzione uguale alla somma delle forze.

Un'informazione si propaga con una **velocità finita**, cioè non istantaneamente. La velocità massima di propagazione è la velocità della luce  $c$  e vale:

$$c = 3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Consideriamo lo stesso sistema di cariche, ma con la carica  $q_0$  spostata ad una distanza molto lontana e consideriamo le altre cariche come cariche che si muovono. Si osserva che le cariche che si muovono cambiano il valore della forza  $\vec{F}_{\text{tot}}$  e dalla formula si vede che la forza cambia istantaneamente, ma in realtà la forza viene trasmessa dopo un tempo di propagazione (che la formula non tiene in considerazione).

Questa problematica si risolve con il concetto di **campo elettrostatico**.

### 2.3.3 Campo elettrostatico

Dalla formula della forza elettrostatica si può notare che la forza è proporzionale alla carica osservata  $q_0$ :

$$\vec{F}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i q_0}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}_{i0}}{r_{i0}^2} \propto q_0$$

Quindi la forza è proporzionale alla carica osservata e dalla distanza di questa carica:

$$\vec{F} = q_0 \vec{E}(\vec{r}_0)$$

Dove  $\vec{E}$  è il **campo elettrostatico posizionato in**  $\vec{r}_0$  della carica osservata  $q_0$ .

Prendiamo in considerazione il seguente sistema in cui la particella  $Q$  è la **sorgente di campo** e la particella  $q$  è la **carica di prova**:

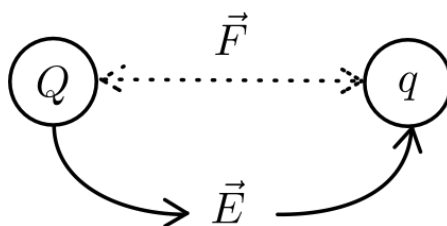


Figura 13: Campo elettrostatico

$$\vec{F} = q \vec{E}(\vec{r})$$

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}}{q}$$

Questa è la **definizione operativa** di campo, cioè serve una carica di prova per misurare il campo.

**Definizione 2.3.** Il campo di una singola carica puntiforme  $Q$ , posizionata per comodità nell'origine, considerata una particella di test  $q$  ad una distanza  $\vec{r}$  è definito come:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}}{r^2} \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{C}} \right]$$

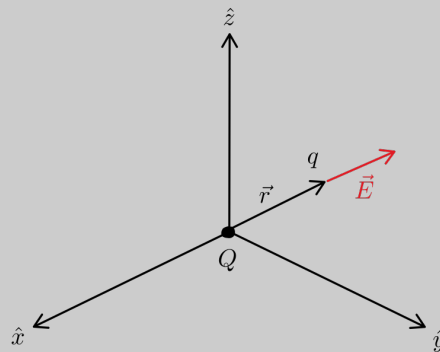


Figura 14: Campo elettrostatico

**Definizione 2.4.** Il campo di un sistema discreto di  $n$  cariche  $q_1, q_2, \dots, q_n$  è definito come:

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i^2} \cdot \hat{r}_i \quad \left[ \frac{\text{N}}{\text{C}} \right]$$

per il **principio di sovrapposizione**.

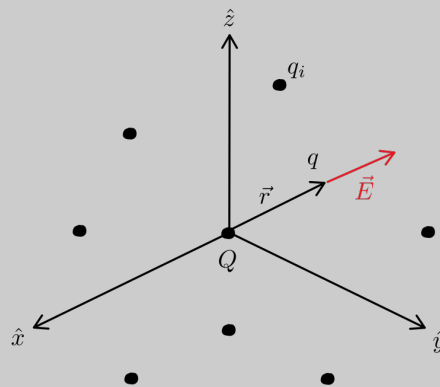


Figura 15: Campo elettrostatico con più cariche

**Definizione utile 2.1.** Il **lavoro elementare** è definito come:

$$dL = \vec{F} \cdot d\vec{l}$$

dove  $d\vec{l}$  è il vettore spostamento.

- Il lavoro non dipende dal percorso, ma solo dai punti di inizio e fine.
- Il lavoro in un percorso chiuso è nullo:

$$\oint \vec{d\vec{l}} = 0$$

- Esiste una funzione di stato  $U$  tale che il lavoro per andare da  $A$  a  $B$  è uguale al negativo del lavoro per andare da  $B$  a  $A$ :

$$\exists U \mid L_{AB} = -\Delta U$$

dove  $U$  è l'**energia potenziale**.

## 2.4 Energia potenziale elettrostatica

La **forza elettrostatica**  $\vec{F}_{el}$  è una forza **conservativa**, cioè il lavoro per spostare una carica da un punto  $A$  a un punto  $B$  è indipendente dal percorso e dipende solo dai punti di inizio e fine.

Per calcolare il lavoro per spostare una carica  $q$  da un punto  $A$  a un punto  $B$  si usa la seguente formula:

$$\begin{aligned} L_{AB} &= \int_A^B \vec{d\vec{L}} = \int_{\text{curva}} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^2} \cdot \underbrace{\hat{r} \cdot \vec{d\vec{l}}}_{dr} \\ &= \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left( -\frac{1}{r} \right) \Big|_{r_A}^{r_B} \\ &= \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \left( -\frac{1}{r_B} + \frac{1}{r_A} \right) \\ &= -\Delta U \end{aligned}$$

dove  $U$  è l'**energia potenziale elettrostatica**:

$$U = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} + \text{costante} \quad [J]$$

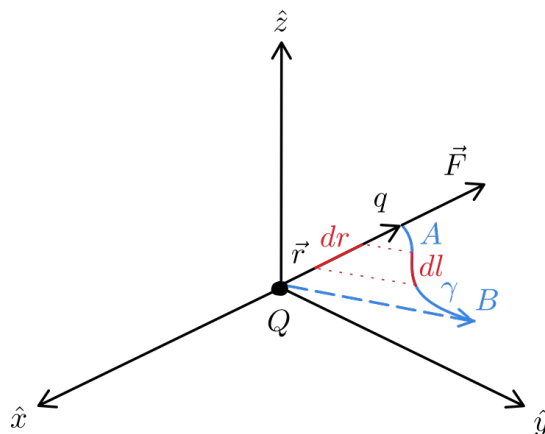


Figura 16: Energia potenziale

Se poniamo l'energia all'infinito uguale a 0, allora  $U$  è il lavoro che fa il campo (la forza elettrostatica) per allontanare una particella all'infinito, cioè per distruggere il sistema:

$$U_{-\infty} = 0 \rightarrow U = \frac{Qq}{4\pi\epsilon_0 r} = -(U_{\infty} - U_r)$$

- Con cariche uguali l'energia è positiva perchè la forza è repulsiva e si allontana la carica verso l'infinito.
- Con cariche opposte l'energia è negativa perchè la forza è attrattiva e si avvicina la carica, allontanandosi dall'infinito.

## 2.5 (Campo) Potenziale elettrostatico

Dalla forza abbiamo definito l'equivalente, ma sottoforma di campo:

$$\vec{F} \longrightarrow \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Si può definire un campo anche per l'energia potenziale:

$$\begin{array}{ccc} \vec{F} & \longrightarrow & \vec{E} \\ \downarrow & & \downarrow \\ \Delta U & \longrightarrow & \Delta V \\ \text{Energia} & & \text{Campo} \\ \text{elettrostatica} & & \text{potenziale} \end{array}$$

**Definizione 2.5.** Il campo potenziale è definita come la differenza di energia di una carica  $q$  unitaria:

$$V(F) := \Delta V_{AB} = \frac{\Delta U}{q} \quad [V]$$

L'unità di misura è il Volt.

Quindi come  $\Delta U_{AB} = - \int_A^B \vec{F} \, dl$ , così si avrà:

$$\Delta V_{AB} = V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \, dl \quad [V]$$

Di conseguenza il lavoro sulla carica  $q$  è:

$$L_q = -q\Delta V \quad [J]$$

### 2.5.1 Calcolo del potenziale

$V(\vec{r})$  è un campo definito a meno di una costante (come l'energia), ma si sceglie un punto di riferimento (uno **zero**) che chiamiamo ad esempio  $\vec{r}_0$  e poniamo  $V(\vec{r}_0) = V_0$ . Successivamente si calcola il potenziale come  $V(\vec{r}) - V(\vec{r}_0)$ :

$$\begin{cases} V(\vec{r}_0) = V_0 \rightarrow 0 \\ V(\vec{r}) - V_0 = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E} \, dl \end{cases}$$

Si calcola quindi il campo prendendo come punto di riferimento il punto  $\vec{r}_0$

### 2.5.2 Potenziale della carica puntiforme

Ricordando la definizione di campo elettrostatico:

$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}}{r^2}$$

Il potenziale si calcola come:

$$\begin{aligned} V(\vec{r}) - V_0 &= - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E} \, dl \\ &= - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\hat{r}}{r^2} \cdot dl \\ &= - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_0}^r \frac{dr}{r^2} \\ &= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r_0} \quad [V] \end{aligned}$$

dove  $r_0$  è un punto di riferimento e  $V_0$  è il potenziale in quel punto.

Si può prendere  $r_0 = \infty$ , quindi  $V_\infty = 0$  e si ottiene:

$$V(\vec{r}) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad [V]$$



### 2.5.3 Potenziale di più cariche

Consideriamo un insieme di cariche discrete  $\{q_i\}_N$  vale il **principio di sovrapposizione** anche per il potenziale ed esso è definito tramite il campo. Gli operatori somma e integrale commutano e quindi si ottiene:

$$V_{\text{tot}} = \sum V_i$$

dove:

$$V_i = \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

e quindi:

$$V_{\text{tot}}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum \frac{q_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

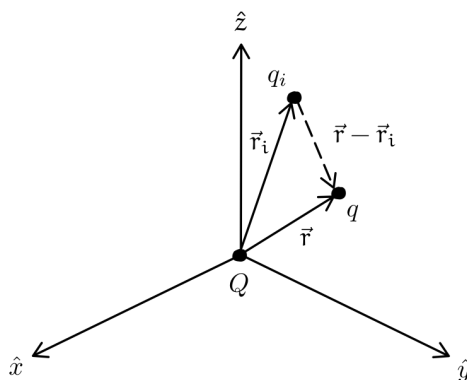


Figura 17: Potenziale di più cariche

In questo modo spostando l'origine degli assi il potenziale non cambia.

Se si avesse un volume tutte le sommatorie diventerebbero integrali:

$$V_{\text{tot}}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{dq}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

Abbiamo quindi che:

$$\begin{array}{ccc} \vec{F} & \longrightarrow & \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_{\text{test}}} \\ \downarrow \text{conservativo} & & \downarrow \text{conservativo} \\ \Delta U & \longrightarrow & \Delta V = \frac{\Delta U}{q_{\text{test}}} \\ \text{Energia elettrostatica} & & \text{Campo potenziale} \end{array}$$

$$L_q = -\Delta U \rightarrow L_q = -q\Delta V$$

La circuitazione in un percorso chiuso è nulla:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$$

Figura 18: Equazione di Maxwell

quindi  $\vec{E}$  è **conservativo**.

## 2.6 Linee di campo

Sono linee tangenti al campo elettrostatico  $\vec{E}$  in ogni punto e dirette nel verso del campo. Hanno le seguenti caratteristiche:

- Sono continue, quindi non si interrompono mai
- Escono dalle cariche positive e entrano nelle cariche negative
- Sono linee aperte, cioè non si chiudono mai
- In una carica positiva puntiforme sono radiali

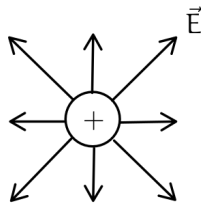


Figura 19: Linee di campo su una carica positiva

- In una carica negativa puntiforme sono radiali e entrano nella carica

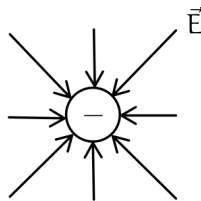


Figura 20: Linee di campo su una carica negativa

- Le cariche sono l'origine delle linee di campo, se si hanno delle linee chiuse vuol dire che non c'è una sorgente
- Le linee di campo non si intersecano mai

## 2.7 Superfici equipotenziali

Sono luoghi di punti (superficie bidimensionale) a potenziale costante:

$$V(\vec{r}) = \text{costante} \rightarrow \Delta V = 0 \rightarrow L = 0 \quad \text{sulla superficie}$$

Se il lavoro è nullo, allora la forza è perpendicolare alla superficie  $\vec{F} \perp d\vec{l}$ . Quindi le superfici equipotenziali sono perpendicolari al campo elettrico perchè:

$$\vec{F} = q\vec{E} \rightarrow \vec{F} \perp \vec{E}$$

Quindi si nota che per una carica puntiforme la superficie equipotenziale è una sfera. Il campo elettrico punta sempre verso potenziali minori perchè il lavoro è positivo:

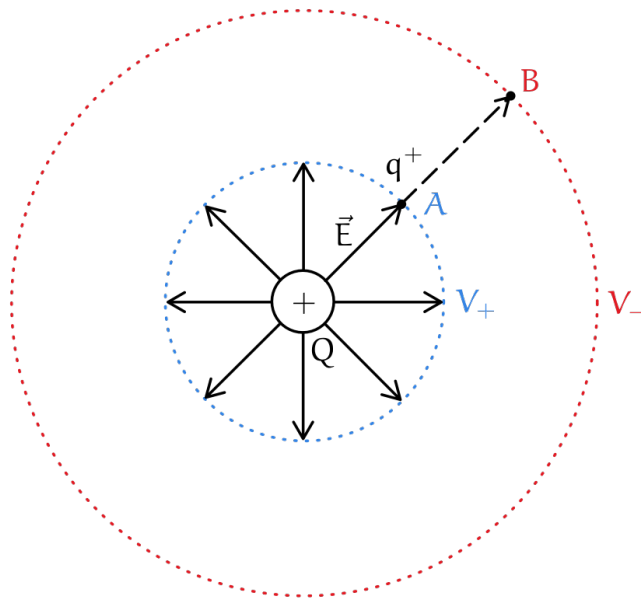


Figura 21: Superfici equipotenziali

$$L = -q^+ (V_B - V_A) > 0 \quad \text{con } V_B < V_A$$

## 2.8 Teorema di Gauss

Si può calcolare il campo elettrostatico  $\vec{E}$  di un'entità più complicata, come ad esempio un filo, un cilindro ecc..., che presentano **situazioni di simmetria**. Questo calcolo non viene fatto direttamente tramite integrali, ma tramite il **teorema di Gauss**. Le simmetrie che analizziamo sono:

- **Simmetria sferica:** Un sistema **isotropo**, cioè che non varia in base alla direzione. Ad esempio una sfera, una carica puntiforme oppure un condensatore sferico.

- **Simmetria cilindrica:** Un sistema che non varia in base alla rotazione intorno ad un asse. Ad esempio un cilindro **indefinito** (di lunghezza non definita) oppure un filo.
- **Simmetria rispetto ad un piano:** Un sistema che non varia in base alla traslazione lungo un piano.

Tutte queste sono geometrie in cui sono distribuite cariche e avranno una certa densità di carica:

- Carica puntiforme  $q$  [C]
- Densità lineare  $\lambda$  [ $\frac{C}{m}$ ] per una linea
- Densità superficiale  $\sigma$  [ $\frac{C}{m^2}$ ] per una superficie
- Densità volumetrica  $\rho$  [ $\frac{C}{m^3}$ ] per un volume

**Osservazione:** Moltiplicare un campo per una superficie equivale a calcolare un **flusso**, cioè contare le linee di campo per la superficie ortogonale. Se prendiamo un campo di una carica puntiforme notiamo che al variare della distanza  $\vec{r}$  il valore del campo varia. Se invece moltiplichiamo il campo per la superficie di una sfera, si ottiene un flusso che è costante e non dipende da  $\vec{r}$ :

$$\vec{E} = \frac{q\hat{r}}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\vec{E} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q\hat{r}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon_0} \cdot \hat{r}$$

**Definizione utile 2.2** (Angolo piano). L'angolo solido  $d\alpha$  è definito come un elemento di linea  $d\vec{l}$  di circonferenza diviso per il raggio:

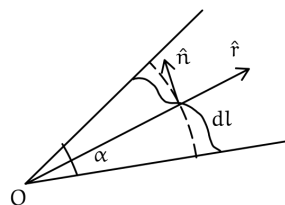


Figura 22: Angolo piano

$$d\alpha = \frac{d\vec{l} \cdot \hat{n} \cdot \hat{r}}{r}$$

**Definizione utile 2.3** (Angolo solido). L'angolo solido  $d\Omega$  è definito come un elemento di superficie  $dS$  diviso per il raggio al quadrato:

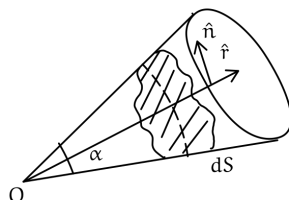
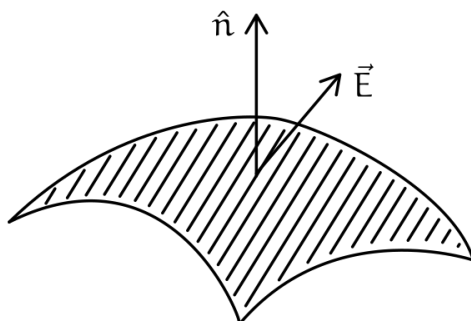


Figura 23: Angolo solido

$$d\Omega = \frac{dS \cdot \hat{n} \cdot \hat{r}}{r^2}$$

### 2.8.1 Flusso del campo $\vec{E}$

Consideriamo una superficie con concavità verso il basso definita come la sua orientazione  $\hat{n}$  (normale) e la sua area  $dS$ .



$$d\vec{S} = \hat{n} \cdot dS$$

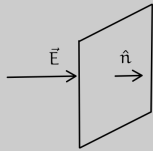
Figura 24: Superficie

**Definizione 2.6** (Flusso elementare). Il flusso elementare  $d\Phi$  è definito come il prodotto scalare tra il campo e la superficie:

$$d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad [V \cdot m]$$

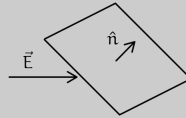
Il flusso di una superficie si ottiene integrando:

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S}$$



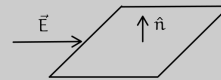
$$d\Phi > 0$$

(a) Flusso positivo



$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} \cos \theta$$

(b) Flusso generico



$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{S} = 0$$

(c) Flusso nullo

Figura 25: Esempi di flusso

**Esempio 2.1.** Consideriamo una carica puntiforme  $q$  e una superficie  $dS$

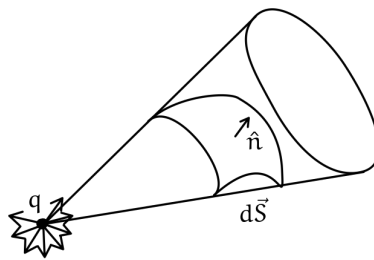


Figura 26: Flusso di una carica puntiforme

Il flusso del campo elettrostatico è:

$$d\Phi = (\vec{E} \cdot d\vec{S}) = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \underbrace{\frac{\hat{r}}{r^2} \cdot d\vec{S}}_{d\Omega} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega$$

Osserviamo che il flusso dipende solo da  $d\Omega$ , cioè dall'angolo solido, e non dalla distanza  $r$  della superficie dalla carica.

**Esempio 2.2.** Consideriamo una superficie chiusa:

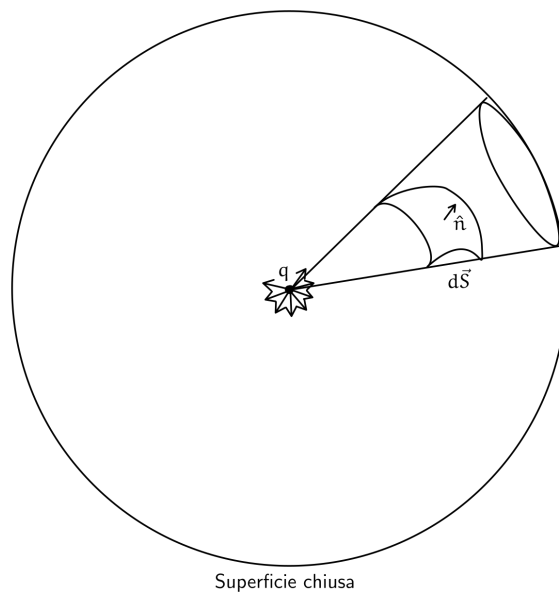


Figura 27: Flusso di una superficie chiusa

il flusso del campo elettrostatico è:

$$\Phi = \oint \frac{q}{4\pi\epsilon_0} d\Omega = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \underbrace{\oint d\Omega}_{=4\pi} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

L'integrale su una superficie chiusa dell'angolo piano è uguale a  $2\pi$ , quindi l'integrale su una superficie chiusa dell'angolo solido è uguale a  $4\pi$ .

Il flusso quindi non dipende dalla superficie. Questa è la dimostrazione del teorema di Gauss.

**Teorema 2.1** (Teorema di Gauss). Il flusso  $\Phi(\vec{E})$  del campo elettrico  $\vec{E}$  attraverso una superficie chiusa **qualsiasi**  $S$  è uguale alla somma delle cariche interne alla superficie diviso  $\epsilon_0$ :

$$\Phi(\vec{E}) = \oint_{\text{superficie chiusa QUALUNQUE}} \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{interne}}}{\epsilon_0}$$

Le cariche esterne non contano perchè quando esse entrano nella superficie, ad un certo punto escono, quindi il flusso è nullo. Se all'interno della superficie c'è una sorgente (quindi cariche interne) esse non entrano mai perchè sono già dentro, quindi escono e il flusso è positivo.

## 2.9 Applicazione del teorema di Gauss

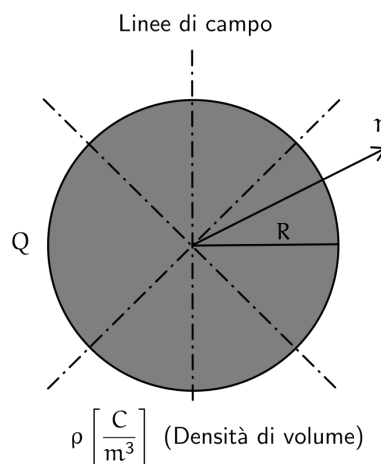
Siccome il teorema di Gauss dice che il flusso non dipende dalla superficie si prende una superficie particolarmente simmetrica chiamata **superficie di Gauss** che rende facilmente calcolabile il flusso, grazie al campo costante su tutta la superficie. Per calcolare il campo  $\vec{E}$  siccome esso è costante e parallelo alla normale (grazie alla superficie scelta) si può tirare fuori dall'integrale per ottenere un prodotto tra l'incognita  $\vec{E}$  e un integrale geometrico.

$$\Phi(\vec{E}) = \vec{E} \cdot \oint_{\text{Sup}} d\vec{S} = \frac{Q_{\text{Interne}}}{\epsilon_0}$$

### 2.9.1 Simmetria sferica

Le caratteristiche necessarie sono:

- Distribuzione di carica con simmetria sferica. Potrebbe essere una:
  - Carica di volume  $\rho$



$$Q = \rho \cdot \overbrace{\frac{4}{3}\pi R^3}^{\text{Volume sfera}} \quad [C]$$

Figura 28: Simmetria sferica di volume

- Carica di superficie  $\sigma$



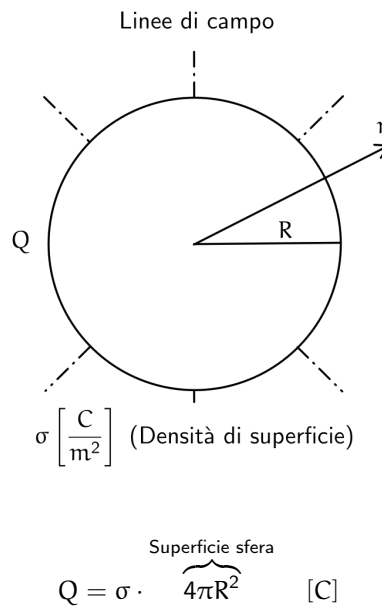


Figura 29: Simmetria sferica di superficie

Se la carica  $\{Q\}$  è a simmetria sferica, allora il campo  $\vec{E}$  sarà a simmetria sferica. Questo campo sarà **radiale** e dipenderà solo da  $\vec{r}$ :

$$\vec{E} = E(r)\hat{r}$$

**Esempio 2.3.** Consideriamo una carica positiva  $Q^+$  distribuita su una superficie. L'obiettivo è quello di cercare una superficie di Gauss in cui il campo elettrico sia costante. Siccome dipende solo da  $r$  esso sarà costante solo nelle superfici sferiche  $S(r)$  di raggio  $r$ .

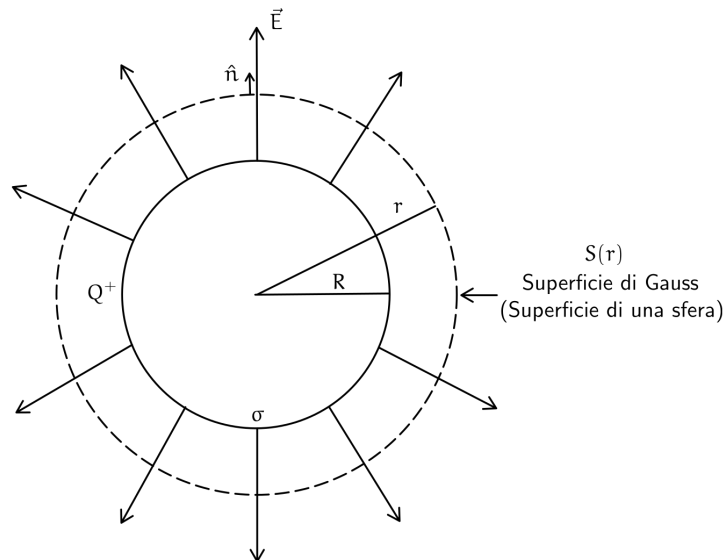


Figura 30: Carica distribuita su una superficie sferica

$$\begin{aligned}
 \Phi(\vec{E}) &= \oint_{S(r)} \vec{E} \cdot \hat{n} \cdot dS \\
 &= \oint_{S(r)} E(r) dS \\
 &= E(r) \overbrace{\oint_{S(r)} dS}^{\text{Sup sfera}} \\
 &= E(r) \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0}
 \end{aligned}$$

Dove:

$$Q_{\text{int}} = \begin{cases} Q & \text{se } r \geq R \text{ (esterno)} \\ 0 & \text{se } r < R \text{ (interno)} \end{cases}$$

Quindi:

$$E(r) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} & \text{se } r \geq R \\ 0 & \text{se } r < R \end{cases} \quad \left[ \frac{V}{m} \right]$$

In  $r = R$  il campo vale:

$$E(R) = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Il grafico del campo elettrico è:

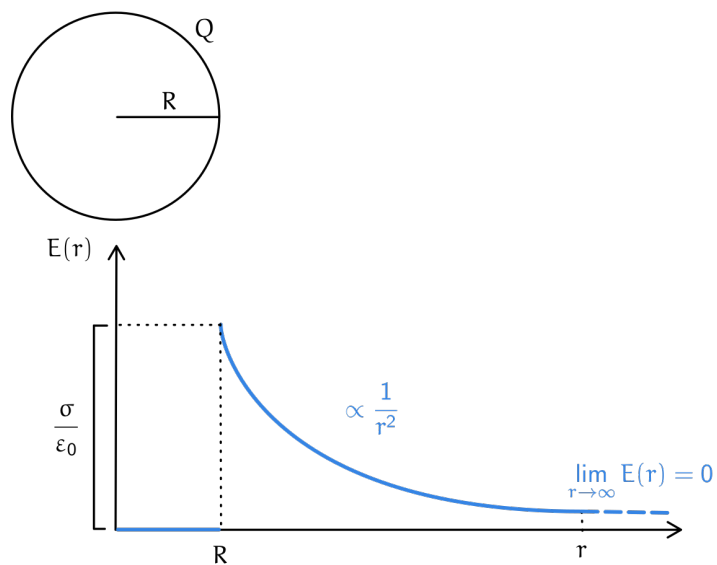


Figura 31: Grafico del campo elettrico

**Esempio 2.4.** Consideriamo una carica positiva  $Q^+$  distribuita su un volume. L'obiettivo è quello di cercare una superficie di Gauss in cui il campo elettrico sia costante. Siccome dipende solo da  $r$  esso sarà costante solo nelle sfere  $S(r)$  di raggio  $r$ .

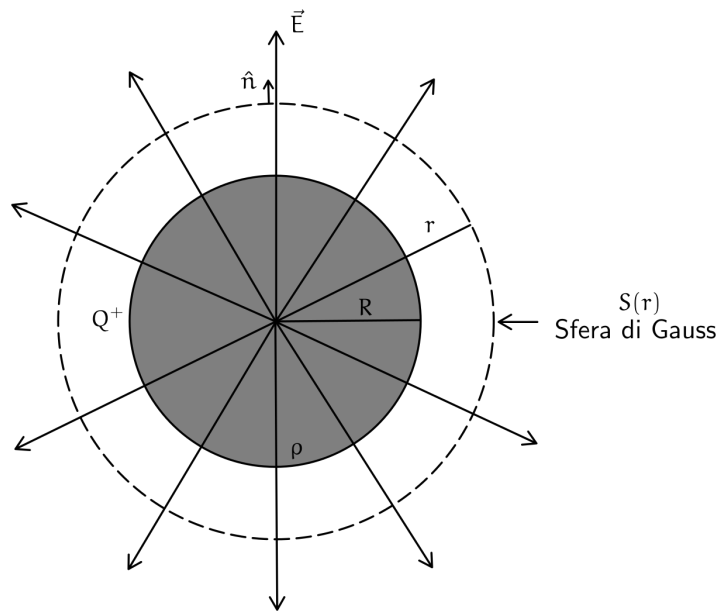


Figura 32: Carica distribuita su un volume sferico

Siccome la sfera all'interno non è più vuota come nell'esempio precedente, ma è piena il valore di  $Q_{\text{int}}$  esterno rimane invariato, ma all'interno si ha:

$$Q_{\text{int}} = \begin{cases} Q & \text{se } r \geq R \\ \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 & \text{se } r < R \end{cases}$$

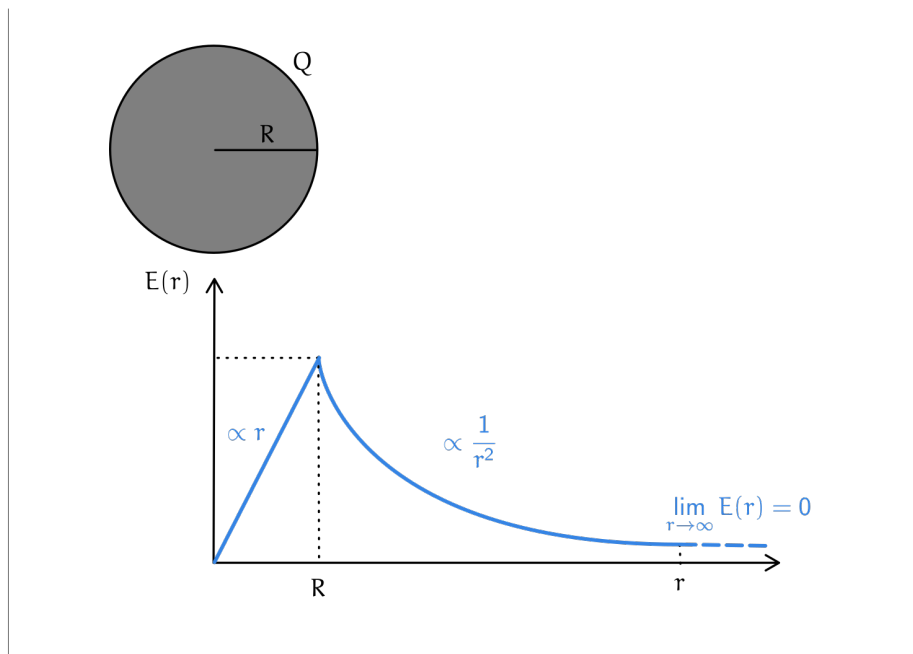
Quindi:

$$E(r) = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} & \text{se } r \geq R \\ \frac{\rho}{3\epsilon_0} \cdot r & \text{se } r < R \end{cases} \quad \left[ \frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

In  $r = R$  il campo vale:

$$E(R) = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3 \rho}{4\pi\epsilon_0 R^2} = \frac{\rho}{3\epsilon_0} \cdot R$$

Il grafico del campo elettrico è:



### 2.9.2 Simmetria cilindrica

Le possibili simmetrie sono:

- Filo indefinito con distribuzione di carica lineare  $\lambda$
- Cilindro
  - Con distribuzione di carica sulla superficie
  - Con distribuzione di carica nel volume

La caratteristica principale è la **simmetria attorno all'asse del sistema**. La superficie di Gauss in cui il campo è costante è un cilindro di raggio  $r$  e altezza  $h$ .

**Esempio 2.5.** Consideriamo una carica  $\lambda^+$  distribuita su un filo indefinito:

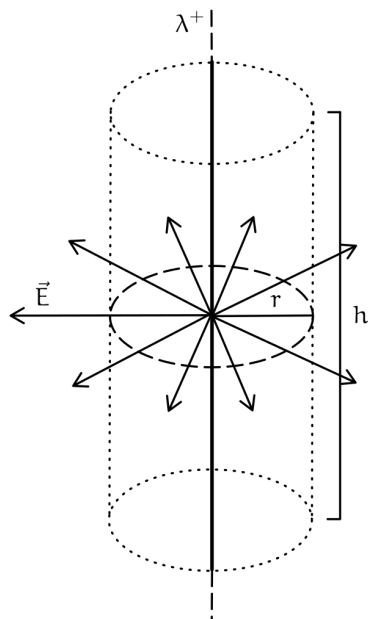


Figura 33: Carica distribuita su un filo indefinito

Il flusso del campo è il flusso delle basi (che essendo perpendicolari al campo radiale vale 0) più il flusso laterale:

$$\Phi(\vec{E}) = \Phi_{\text{Basi}} + \Phi_{\text{Laterale}} = 0 + E \cdot 2\pi r h = \frac{Q_{\text{Int}}}{\epsilon_0} = \frac{\lambda h}{\epsilon_0}$$

Quindi il campo è:

$$E(r) = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$

Il grafico del campo elettrico è:

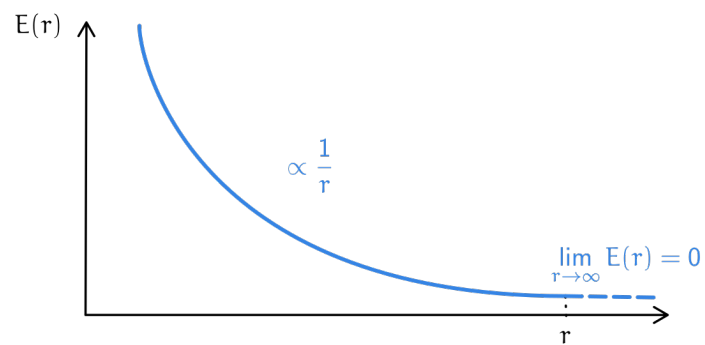


Figura 34: Grafico del campo elettrico

**Esempio 2.6.** Consideriamo una carica  $\sigma^+$  distribuita su un cilindro di raggio  $R$  e altezza  $h$ :

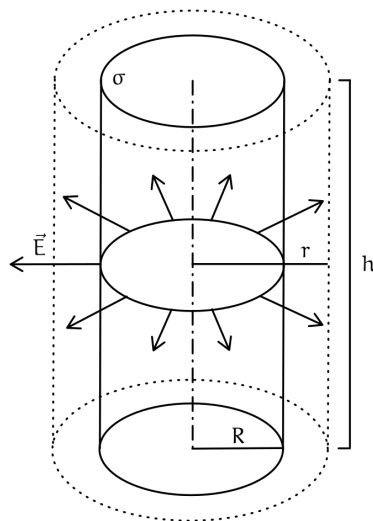


Figura 35: Carica distribuita su un cilindro di raggio  $R$  e altezza  $h$

Il flusso del campo è lo stesso del caso precedente, ma con  $Q_{\text{Int}}$  diverso:

$$Q_{\text{Int}} = \begin{cases} \sigma \cdot 2\pi R h & \text{se } r \geq R \\ 0 & \text{se } r < R \end{cases}$$

Quindi il campo è:

$$E(r) = \begin{cases} \frac{\sigma R}{\epsilon_0 r} & \text{se } r \geq R \\ 0 & \text{se } r < R \end{cases}$$

Il grafico del campo elettrico è:

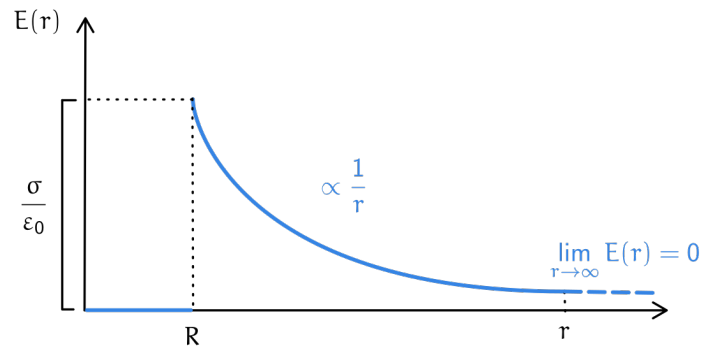


Figura 36: Grafico del campo elettrico

### 2.9.3 Simmetria rispetto ad un piano indefinito

Consideriamo un piano indefinito con una distribuzione di carica superficiale positiva  $\sigma^+ \left[ \frac{C}{m^2} \right]$ . L'unico grado di libertà è la distanza dal piano. L'elemento di campo è definito come:

$$d\vec{E} = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r^2} \hat{r}$$

Se consideriamo un elemento di carica che agisce su un punto p, allora siccome il piano è indefinito ci sarà un elemento di carica simmetrico che genera un campo con componente orizzontale uguale e opposto a quella dell'elemento precedente. Di conseguenza il campo totale sarà perpendicolare al piano: Il campo avrà questa forma:

$$\vec{E} = E(z)\hat{z}$$

La superficie di Gauss da considerare è un cilindro che si trova metà sopra e metà sotto il piano: Il flusso del sistema sarà il flusso delle basi più il flusso dei lati, ma il flusso laterale sarà nullo:

$$\Phi = \Phi_{\text{Basi}} + \Phi_{\text{Laterale}} = 2E(z)A + 0 = \frac{Q_{\text{Int}}}{\epsilon_0} = \frac{\Sigma\sigma}{\epsilon_0}$$

Quindi il campo è:

$$E = \frac{\sigma^\pm}{2\epsilon_0}$$

La particolarità di questo campo è che non dipende dalla distanza, quindi è un campo costante.



## 2.10 Elettrostatica nei conduttori

Un materiale conduttore ha **le cariche libere di muoversi**. Se si avvicina un campo elettrico e sulle cariche viene esercitata una forza. Per un momento ci sarà del caos, ma poi le cariche si sposteranno fino a quando non si raggiunge l'equilibrio, in quel momento si studia il comportamento delle cariche.

### 2.10.1 Proprietà dei conduttori in equilibrio elettrostatico

1. **Prima proprietà:** Il campo totale interno in un conduttore è 0:

$$E_{\text{Interno}} = 0$$

Consideriamo un conduttore immerso in un campo chiamato **campo esterno**. Le cariche sono libere di muoversi, quindi quelle positive andranno nella direzione del campo, mentre quelle negative andranno nella direzione opposta al campo. Si nota quindi una separazione di carica che creerà un **campo indotto**. Vale il principio di sovrapposizione e quindi all'interno del conduttore si avrà la somma dei due campi:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{est}} + E_{\text{ind}}$$

Ad un certo punto si raggiungerà l'equilibrio, quindi le cariche non si muovono più, di conseguenza il campo è nullo.

2. **Seconda proprietà:** Siccome il campo è nullo, il potenziale è costante su tutto il conduttore:

$$V - V_0 = - \int_{\vec{r}_0}^{\vec{r}} \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$V = \text{costante}$$

3. **Terza proprietà:** Siccome il campo interno è nullo, la carica interna in un conduttore in equilibrio è 0 (dal teorema di Gauss)  $Q_{\text{Int}} = 0$  :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} = 0 \rightarrow Q_{\text{int}} = 0$$

Quindi **le cariche si distribuiscono solo in superficie**

4. **Quarta proprietà:** Il campo nella superficie di un conduttore è ortogonale alla superficie e vale sempre:

$$\vec{E}_{\text{sup}} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \hat{n}$$

(Teorema di Coulomb)

Notiamo quindi che il conduttore in equilibrio elettrostatico distorce il campo nel seguente modo: