



Faraday scende in campo

Dalla critica all'azione a distanza al concetto di campo

Grado scolastico: secondaria di secondo grado

Aree disciplinari: fisica

ISIS Gramsci-Keynes, Prato

Docenti coinvolti: Antonio Mercogliano

Realizzato con il contributo della Regione Toscana nell'ambito del progetto

Rete Scuole LSS a.s. 2022/2023

Motivazione del percorso

- Il passaggio dal concetto di forza al concetto di campo è uno degli snodi fondamentali nello sviluppo della fisica ma, a nostro parere, non sempre nel percorso liceale viene debitamente affrontato.
- Avevamo la sensazione, come docenti del gruppo LSS, che pur trattando diffusamente il campo elettrico, tutto rimanesse legato alla risoluzione di problemi piuttosto che alla comprensione del perché si dovesse, a un certo punto, privilegiare la visione di campo a quella di forza.
- Come sottolinea Arons l'elettrostatica richiede livelli di astrazione superiori a quelli della meccanica e pertanto occorre *“stabilire dei collegamenti sicuri tra i concetti e i fenomeni”*.
- La classe in cui è stato sperimentato il percorso, una quarta liceo scientifico con opzione scienze applicate, aveva visto 6 nuovi ingressi, 5 dei quali provenienti da un'altra sezione in cui la gravitazione non era stata ancora trattata.
- L'anno precedente la classe aveva svolto un breve modulo sui circuiti elettrici propedeutico alle attività di robotica consistenti in applicazioni da realizzarsi con Arduino.

Collocazione nel curriculum verticale

- Il percorso è stato pensato per essere svolto nel primo trimestre del quarto anno di una classe di Liceo Scientifico.
- Il percorso è stato inserito dopo la teoria newtoniana della gravitazione ma prima di trattare, come è consuetudine, la termodinamica e le onde.
- Abbiamo ritenuto che anticipare le prime nozioni sul campo magnetico e l'elettrostatica avrebbe permesso di consolidare il calcolo vettoriale e concetti fondamentali della meccanica quali l'energia e il lavoro.
- Non ci ha spaventato perdere la continuità di questo argomento con quello che di solito viene trattato subito dopo, ovvero i circuiti elettrici.
- Ci ha confortati in ciò, l'opinione di autorevoli libri di didattica, vedi ad esempio Arons che giudica questi due argomenti non necessariamente consequenziali ritenendo tutt'altro che intuitivo ridurre ad una stessa causa fenomeni elettrostatici e conduzione elettrica.

Obiettivi essenziali di apprendimento

- Saper riconoscere, descrivere e classificare i fenomeni di elettrizzazione in base a come questi avvengono.
- Riconoscere analogie e differenze tra fenomeni elettrici e fenomeni magnetici
- Comprendere i punti deboli della meccanica newtoniana e le motivazioni che portano all'idea di campo.
- Comprendere il significato di linee di forza e saperle disegnare in casi semplici.
- Comprendere il significato della grandezza flusso e saperlo calcolare in casi semplici.
- Comprendere il teorema di Gauss e saperlo applicare per determinare il campo generato da particolari distribuzioni di carica.
- Imparare a modellizzare un problema e applicare le strategie più idonee per la risoluzione.

Elementi salienti dell'approccio metodologico

- Gli argomenti sono stati introdotti facendoli precedere sempre o da una serie di domande per stimolare la discussione in classe, o da una serie di fatti sperimentali proposti agli studenti.
- Didattica per problemi: vengono assegnate delle schede di lavoro. Dall'esecuzione dei compiti assegnati emergono i concetti teorici da veicolare.
- Gli esercizi assegnati per casa o svolti in classe sono sempre stati scelti per consolidare o approfondire questioni o ricavare elementi utili alla comprensione dei problemi.
- Approccio multidisciplinare grazie ai collegamenti con la filosofia e la matematica.

Materiali, strumenti e apparecchi utilizzati

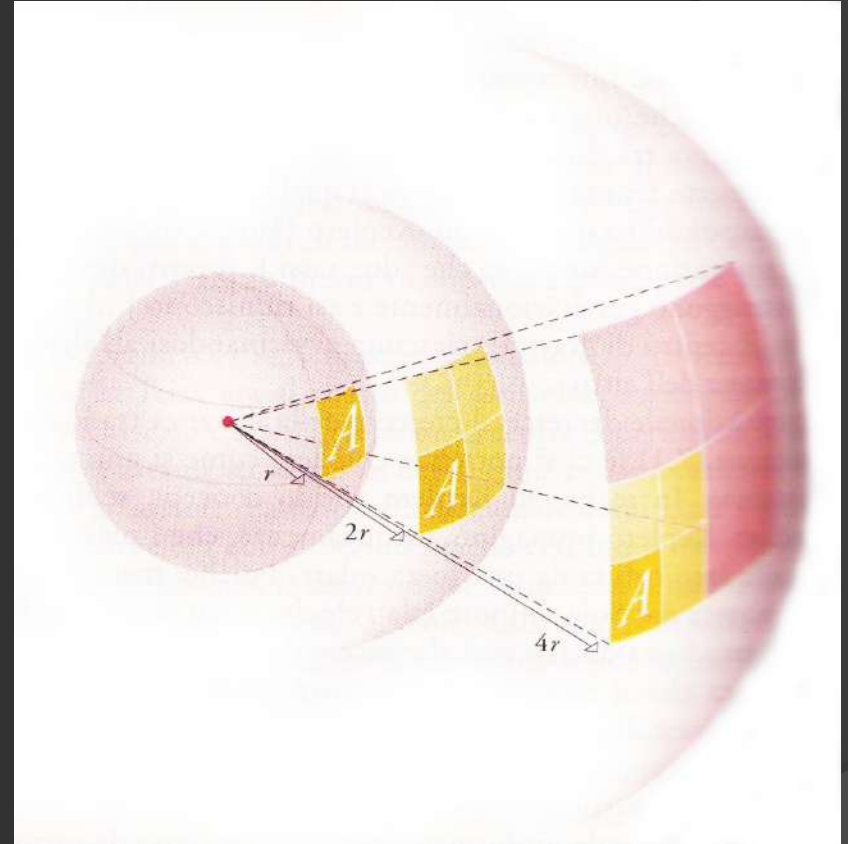
- Apparecchi presenti nel laboratorio di fisica della scuola:
 - per lo studio del magnetismo: magneti, aghi magnetici, magnetoscopi, piccoli oggetti metallici.
 - per lo studio dell'elettrostatica: bacchette, pendoli, elettroscopio a foglie, elettrometro, generatore di Van de Graaf, gabbia di Faraday, pozzo di Faraday, mulinello elettrico, piccoli materiali metallici e plastici.
- Tubo di cartone.
- Lavagna multimediale.
- Dispense realizzate durante le lezioni con Jamboard e condivise con Classroom, moduli di Google.
- Simulatore campi elettrici, PhET Colorado.

Tempo impiegato

- Periodo: ottobre/dicembre.
- Tempo-scuola di sviluppo del percorso: 30 ore
(3 ore settimanali come da ordinamento dei licei scientifici)
- Le prime 3 ore sono state usate per riparlare della forza di attrazione gravitazionale e del teorema del guscio sferico.
- 10 ore sono state utilizzate per introdurre, dando grande spazio alle osservazioni qualitative in laboratorio, i fenomeni di magnetismo e di elettrostatica.
- Le restanti 17 ore per la trattazione del percorso specifico sul campo qui documentato comprensive di verifiche formative e sommative.

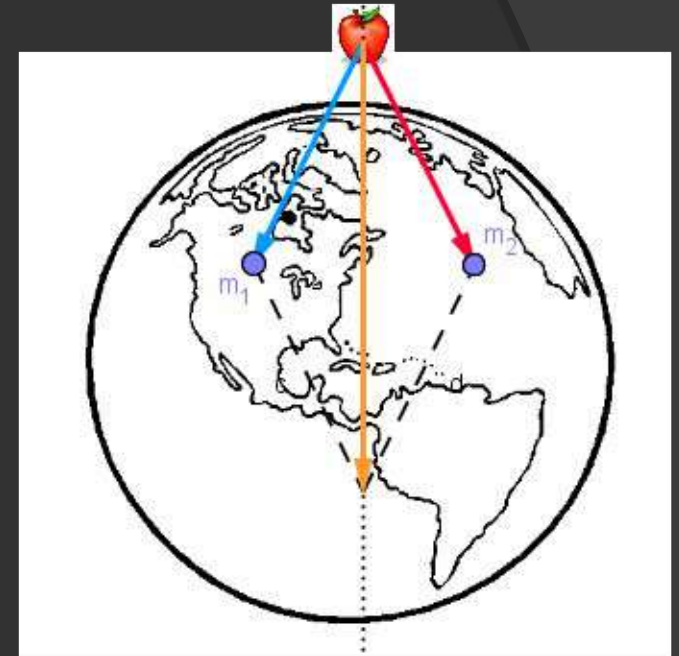
Prerequisiti: l'attrazione gravitazionale

- ◉ Siamo ripartiti dalla legge di gravitazione universale, argomento trattato nell'ultima parte del precedente anno scolastico.
- ◉ Il docente spiega che si può, in maniera intuitiva, interpretare la dipendenza della forza dall'inverso del quadrato della distanza pensando che la forza si "spalmi" su superfici sferiche via via più grandi. Questa idea, già presente, in maniera confusa in Keplero, è mutuata dall'ottica: infatti anche l'intensità luminosa decresce col quadrato della distanza.



Il teorema del guscio sferico (1)

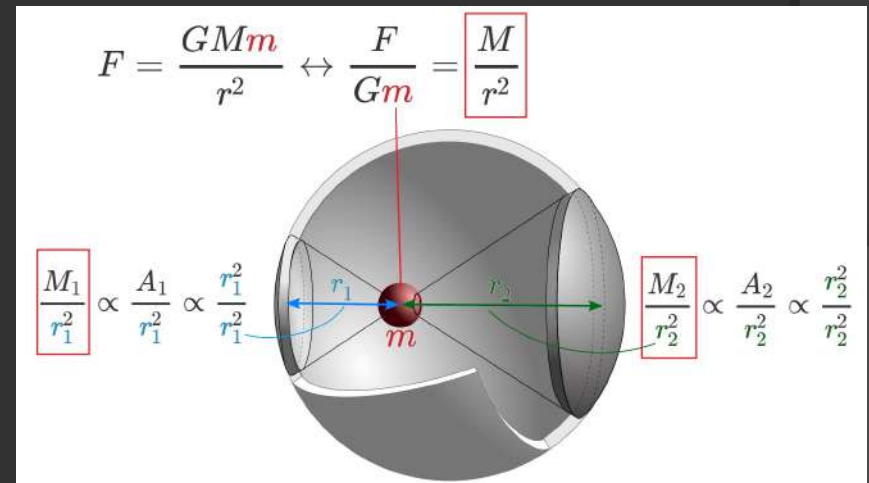
- Passaggio cruciale è quello da un modello che prevede l'interazione tra due corpi puntiformi a grande distanza l'uno dall'altro, ad esempio la Terra e la Luna, a quello tra due corpi estesi, ad esempio la Terra e la mela. In questo secondo caso si suppone la massa della Terra localizzata nel suo centro e la distanza tra i due corpi pari al raggio terrestre. È lecito fare ciò? Newton ci dimostra di sì.



- Viene proposta agli studenti solo una dimostrazione qualitativa del fatto che la forza risultante, considerando coppie di masse simmetriche rispetto alla retta passante per i centri di mela e Terra, punta proprio al centro della Terra.

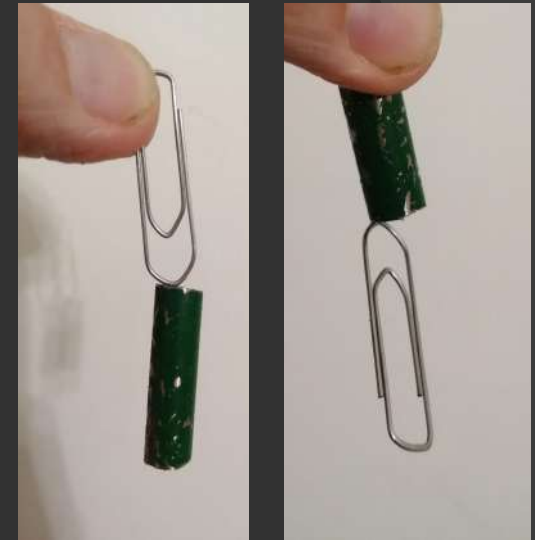
Il teorema del guscio sferico (2)

- Il teorema prevede inoltre che la forza agente su ogni punto interno della Terra è complessivamente nulla. E di fatto la stabilità delle sue parti.
- In pratica, se consideriamo la Terra come una cipolla, formata quindi da tanti gusci, si dimostra che la forza agente in ogni punto interno è nulla.
- Questa seconda parte del teorema del guscio sferico, sarà, come vedremo, essenziale nella comprensione delle forze elettrostatiche e porterà alla formulazione della legge di Coulomb.
- Approssimando le superfici in figura con le basi di due coni con vertice in m , e lavorando con le proporzioni, si dimostra che le forze si bilanciano.
- Queste considerazioni, di carattere prettamente geometrico, sono state occasione di ripasso durante le ore curricolari di matematica.



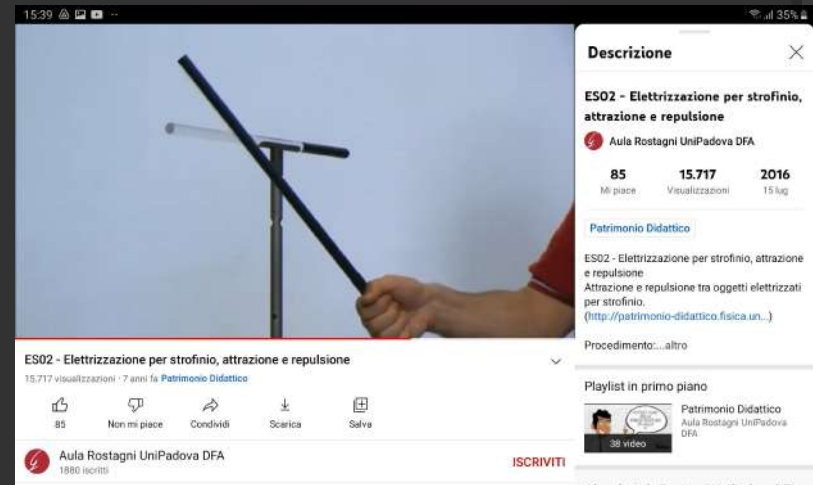
Prime esperienze di laboratorio

- Dopo aver affrontato l'attrazione gravitazionale si è chiesto agli studenti se conoscessero altre forze di tipo attrattivo. In molti hanno citato la forza magnetica, un paio la forza elettrica. In laboratorio si fanno delle prime osservazioni su magnetismo e triboelettricità.
- Per quanto riguarda il magnetismo si osserva:
 - il comportamento tra un magnete e una graffetta, un'utile occasione per ritornare sul concetto di azione e reazione;
 - il comportamento tra due magneti che possono sia attrarsi che respingersi e conseguentemente la definizione di polo Nord e polo Sud;
 - l'esperienza del magnete spezzato con ipotesi di non esistenza del monopolo magnetico.



Primi fenomeni elettrici

- Per quanto riguarda la triboelettricità si osserva, che strofinando con un panno delle bacchette di ebanite o di plexiglas, queste si elettrizzano e sono capaci di attrarsi o respingersi. Si introduce così il concetto di carica elettrica positiva e negativa. Sin da subito il docente sottolinea che tale definizione è anteriore di almeno un secolo alla scoperta di elettroni e protoni.
- Avendo riscontrato che una delle problematiche della didattica LSS è la gestione degli alunni assenti - come far loro recuperare le lezioni di laboratorio? - abbiamo selezionato delle risorse in rete. Segnaliamo la presenza su YouTube di brevi video, di uno, due minuti l'uno, realizzati dalla Università di Padova, dedicati a queste esperienze di base.



<https://www.youtube.com/watch?v=EHAa3MWNkC8>

Magnetismo vs Triboelettricità

- Alla luce di queste prime esperienze di laboratorio, il docente, con l'aiuto degli studenti, elenca analogie e differenze tra attrazione elettrica e magnetica.

- Il docente mostra alla LIM queste osservazioni, riportate da Heilbron, di Girolamo Cardano:

i) l'ambra attrae molte specie di corpi, il magnete solo il ferro,

ii) l'ambra attrae senza muoversi, il magnete è trascinato allorché trascina,

iii) il magnete agisce attraverso schermi divisorii, l'ambra no,

iv) il magnete attrae verso i suoi poli, l'ambra da tutte le parti,

v) l'ambra attrae con forza maggiore dopo lo strofinio, quest'ultimo non ha alcun effetto su un magnete.

A queste osservazioni, che sono acute e con l'eccezione della seconda, esatte, Gilbert (autore di uno dei primi trattati di magnetismo) aggiunse che

vi) il magnete attrae corpi più pesanti rispetto all'ambra;

vii) l'umidità di superficie o atmosferica impedisce l'azione elettrica ma non quella magnetica;

😊 *In particolare diminuisce quando si decide di fare lezione in laboratorio (nota del docente)*

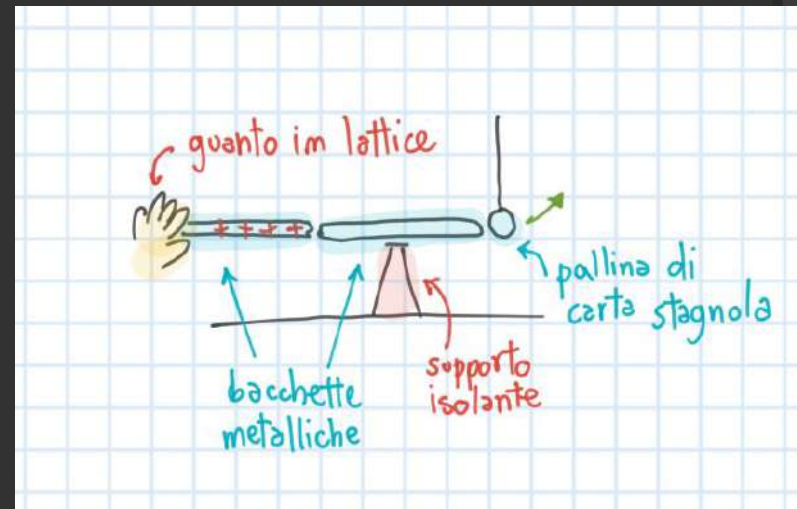
viii) il potere di eccitazione dell'ambra, a differenza di quello di copulazione del magnete, appartiene ad una grande varietà di sostanze ".

Difendiamoci dagli elettroni

- ◉ Da dove nascono questi fenomeni? Gli studenti cercano subito di parlare in termini di elettroni e di atomi. Vogliono sapere se, e chi si carica, solo la bacchetta o anche il panno? E di che tipo di carica?
- ◉ Il docente fiuta subito il pericolo e detta le regole di ingaggio: non si deve assegnare per forza alla carica un'entità materiale, basterà parlare solo in modo astratto di qualcosa che passa da un corpo a un altro. Qualcosa che può essere ceduto o acquistato.
- ◉ Ricorda alla classe che questo modo di procedere non è una novità, si era fatto lo stesso per il calore.
- ◉ In ciò, il primo nemico è il libro di testo, sempre solerte, a svelare subito il nome dell'assassino.

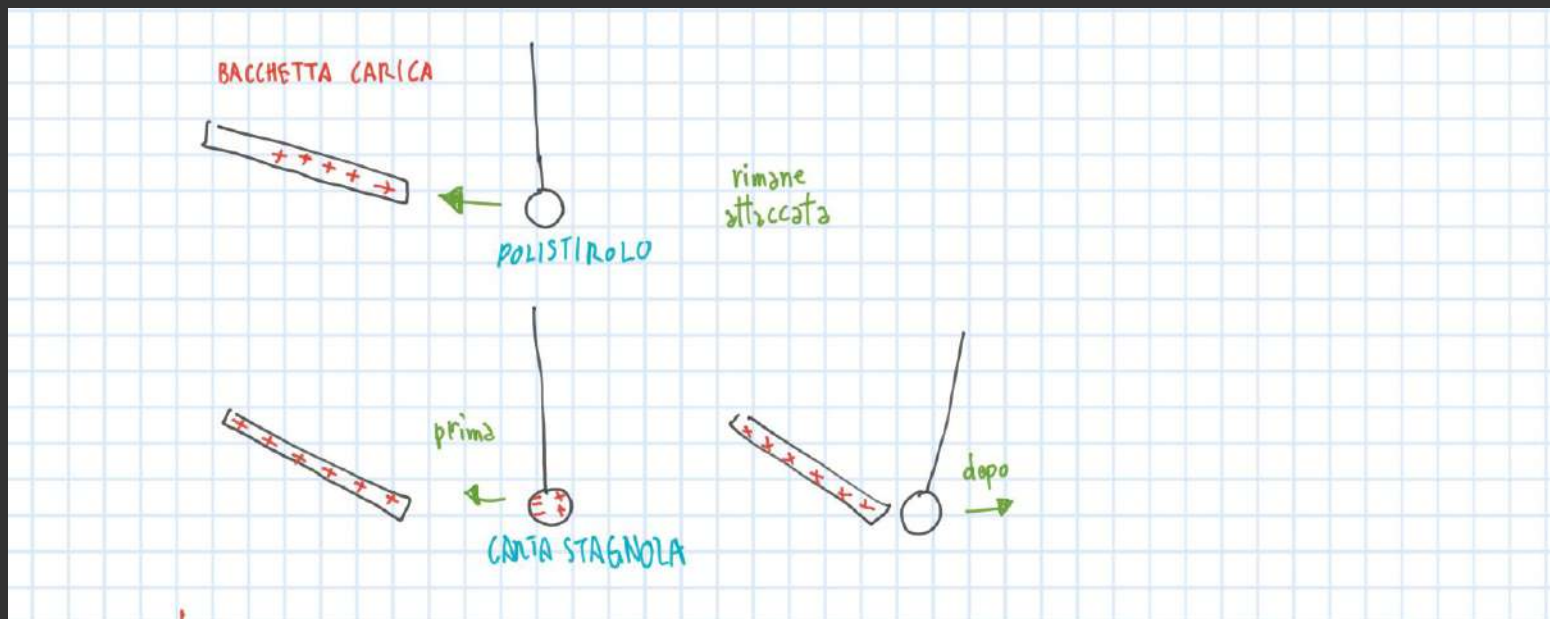
Isolanti e conduttori

- La questione elettricità è complessa. Il docente mostra come si possano elettrizzare anche bacchette di metallo ma solo usando dei guanti. Questa esperienza ci aiuta a distinguere tra isolanti e conduttori.
- Cosa succede nei conduttori? La carica può “spostarsi” se trova una strada verso terra. Si fa il classico esempio della scossa rimediata aprendo la portiera di un’auto.
- Per far vedere come le cariche possano “migrare” da un conduttore ad un altro si procede alla seguente esperienza illustrata in figura: una bacchetta metallica fa da tramite tra una bacchetta elettrizzata ed un pendolino realizzato con la carta stagnola.



Induzione e polarizzazione

- Una bacchetta carica, indipendentemente dal fatto che possieda carica positiva o negativa è capace di attrarre una pallina di alluminio. Rispetto alla pallina di polistirolo che rimane attaccata alla bacchetta, la pallina di alluminio viene attratta dalla bacchetta ma poi subito respinta. Perché?
- Essendo l'alluminio conduttore parte delle cariche in eccesso sulla bacchetta passano all'alluminio che, caricandosi dello stesso segno della bacchetta, viene poi respinto.



Prime difficoltà teoriche

- ◉ Gli studenti cominciano ad avvertire difficoltà a distinguere questi casi, contatto, induzione, polarizzazione. Queste esperienze, per quanto apparentemente semplici e prive dell'effetto wow, non vanno assolutamente svolte in fretta ma hanno bisogno di essere sviscerate con calma e invitando continuamente gli studenti a intervenire.
- ◉ C'è da imparare a descrivere i fenomeni osservati e da costruire un vocabolario condiviso. L'atteggiamento di molti di loro è inizialmente del tipo: *“OK, ma quando ci dice la formula?”*
- ◉ C'è chi aspetta il salvagente della formula e chi vorrebbe subito la spiegazione preconfezionata a base di elettroni.
- ◉ Serva una scossa. E arriva! Per ottenere una elettrizzazione più spinta, rispetto al semplice strofinio del panno sulla bacchetta, viene presentato il generatore di Van de Graaf.
- ◉ E anche quelli finora meno interessati cominciano a partecipare alla lezione. Naturalmente il comportamento del generatore di Van de Graaf porta a chiedere dei fulmini, di come e perché si generano.

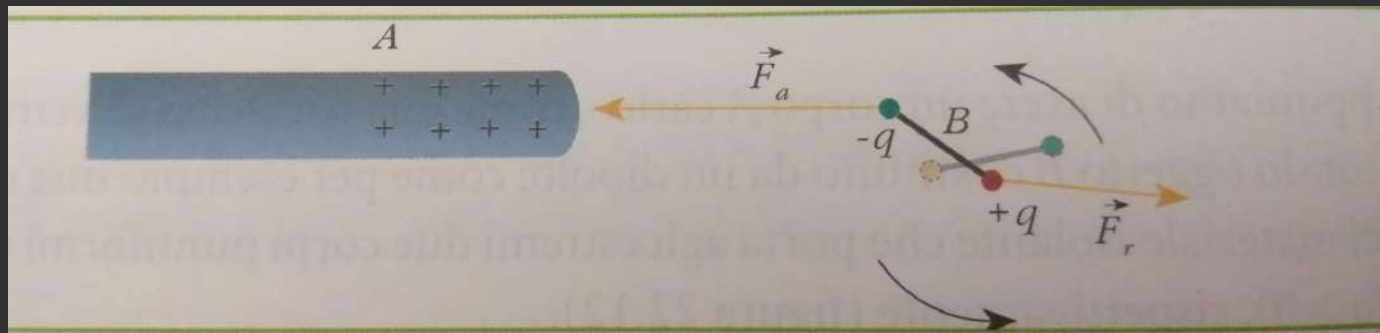
Una quantificazione difficile

- Da queste prime esperienze, gli studenti hanno capito che, nonostante la relativa semplicità degli esempi proposti, non sono affatto immediate né una quantificazione né una modellizzazione di tali fenomeni.
- Il docente spiega che uno dei motivi di ritardo nella comprensione dei fenomeni elettrici fu dovuto proprio alla difficoltà di quantificare le grandezze elettriche e di disporre quindi di strumenti di misura.
- Il docente presenta l'elettroscopio a foglie d'oro (ma il nostro fa il suo onesto lavoro pur solo con due povere striscioline di alluminio) e l'elettrometro. Gli studenti capiscono da soli che questi strumenti non sono in grado di farci apprezzare il tipo di carica, positiva o negativa, ma solo se un corpo è carico o meno.



Il paradosso elettrostatico

- Come mai un corpo elettrizzato è capace di attrarre corpi non carichi?
- Il docente introduce il concetto di dipolo elettrico. Dopodiché spiega il termine polarizzazione introdotto da Faraday. Ribadisce alla classe che questo è un modello che non va necessariamente associato alla realtà atomica che conosciamo.
- Se noi pensiamo alla materia come formata da tanti dipoli elettrici, ovvero come a dei manubri (il corpo B, rappresentato in figura), questi, analogamente a degli aghi magnetici, sono in grado di ruotare, a causa della coppia di forze applicate alle due cariche, fino ad allinearsi, creando un momento torcente nullo). Si sfrutta come si vede l'analogia tra fenomeni magnetici ed elettrici.



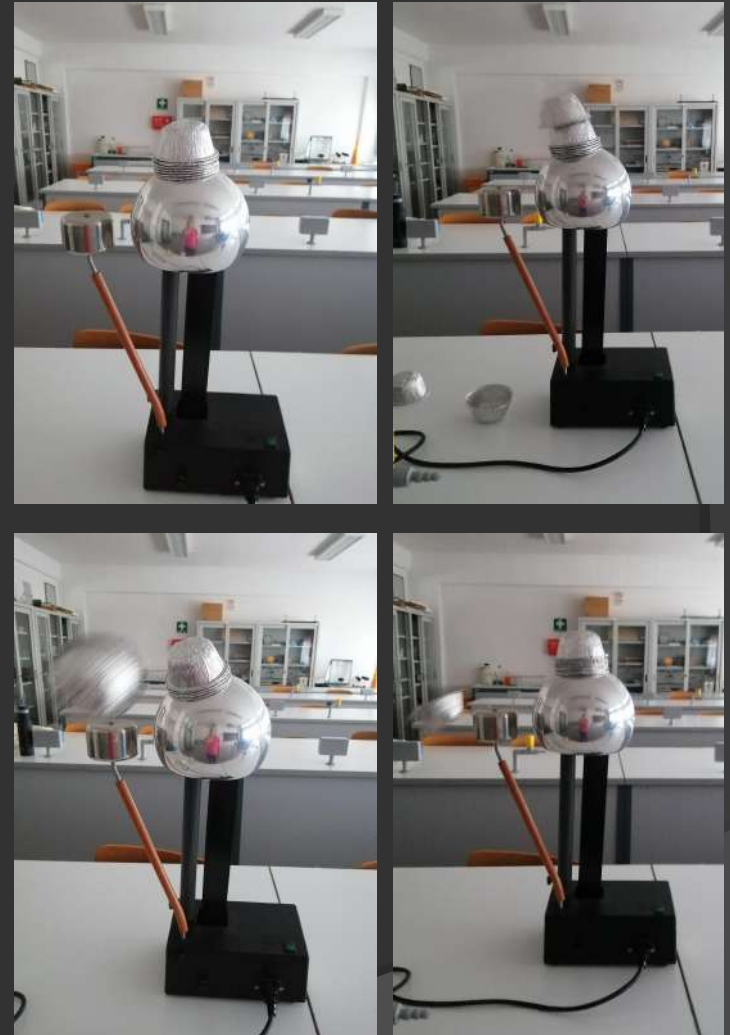
Il pozzo di Faraday

- In laboratorio viene presentato il pozzo di Beccaria (meglio noto come di Faraday).
Se elettrizziamo il bicchiere metallico, montato sul generatore di Van de Graaf, e avviciniamo la pallina di polistirolo attaccata a un filo di cotone vediamo che la pallina viene attratta.
- Se invece infiliamo la pallina nel bicchiere non notiamo alcuna deviazione del filo. Cosa vuol dire? Che la carica elettrica si è distribuita solo all'esterno.
- Si cerca di congetturare il perché avvenga questo, uno studente ipotizza c'entri la mutua repulsione tra le cariche elettriche dello stesso tipo, che si disporranno il più lontano possibile le une dalle altre.
- Il docente spiega che ciò è vero per una sfera ma non vale in generale. La carica si accumula sulle punte. Dopo aver trattato il teorema di Gauss capiremo perché.



L'effetto wow è rimasto impresso

- Alcuni studenti si ricordano di un gioco di sicura resa visto in laboratorio durante l'open day: sul generatore di van de Graaf venivano messi una serie di pirottini di alluminio che cominciavano a volare via uno dopo l'altro.
- Il docente ripropone lo show dei pirottini volanti e stavolta chiede agli studenti di congetturare perché ciò avvenga.
- Gli studenti inferiscono correttamente che i pirottini, caricandosi dello stesso segno, si respingono uno dopo l'altro.



Esperienza di Franklin e ipotesi di Priestley

- Il docente illustra che un'esperienza simile a quella del pozzo, compiuta da Benjamin Franklin nel 1755, fu alla base della scoperta della legge di Coulomb. Nel 1767, il chimico inglese Joseph Priestley, scopritore dell'ossigeno, ricollega il risultato di Franklin ad una ardita ipotesi di Newton: un corpo, posto all'interno di un guscio omogeneo, non è soggetto ad alcuna forza se questa varia con quadrato della distanza.
- La maggioranza della classe ricorda che si tratta del teorema del guscio sferico. Il docente fa un sospiro di sollievo: abbiamo tutto quello che ci serve per addentrarci nel cuore del percorso.



La legge di Coulomb

- Seguendo l'analogia con la gravitazione si è passati a scrivere la legge di Coulomb sottolineando le differenze tra le due forze, quella di attrazione gravitazionale e quella elettrostatica.
- A. chiede se esiste una legge analoga per il magnetismo. Il docente risponde che già nel 1750 era stata enunciata una legge simile da Mitchell, scoperta con l'uso della bilancia di torsione, ma che, alla prova dei fatti, non funziona.
- Possiamo dire che qui si conclude la prima parte del percorso. A questo punto si sono svolti classici esercizi con più cariche puntiformi per consolidare il disegno dei diagrammi delle forze e la scomposizione dei vettori.
- Inoltre si è trattato il lavoro della forza elettrica giungendo a una formula analoga a quella trovata per l'energia potenziale gravitazionale mediante l'integrazione su intervalli discreti. Si sono poi svolti classici esercizi in cui una carica è ferma e l'altra è in moto risolvibili mediante la legge di conservazione dell'energia.
- Questa parte, utile al ripasso dei concetti di lavoro ed energia e al consolidamento delle abilità di calcolo vettoriale e di problem solving, non contiene spunti significativi e non viene qui documentata.
- Ci soffermeremo invece in maniera dettagliata sulla questione campo.

Si entra in campo

- Eccoci quindi giunti al cuore di questo percorso didattico. Il concetto di campo verrà esplicitato attraverso i seguenti passaggi:
 - rassegna degli elementi critici del concetto di azione a distanza
 - riflessione sull'uso della parola campo
 - definizione delle linee di campo, partendo da quello magnetico
 - introduzione della grandezza flusso
 - rapporto tra flusso del campo elettrico e densità delle linee
 - teorema di Gauss
 - espressione del campo per particolari distribuzioni del campo
 - teorema di Coulomb

La critica al concetto newtoniano di forza

- Il docente riepiloga, e contemporaneamente cerca di mettere in dubbio, le caratteristiche della forza di attrazione gravitazionale. Questa agisce tra due corpi esercitando una azione:
 - **a distanza** (con o senza partecipazione del medium interposto?)
 - **istantanea** (ma davvero un corpo sente istantaneamente la presenza di un altro? E in caso contrario quanto tempo impiega ad accorgersene?)
 - **agente lungo la congiungente i centri dei due corpi** (ma riguarda solo le parti dei corpi affacciate o anche le parti che restano in ombra?)
- Il docente sottolinea che Newton è ben consapevole di questi punti deboli della sua teoria ma il primo commento degli studenti è che stiamo sicuramente sbagliando noi a fare queste obiezioni: *“Altrimenti perché studiamo ancora Newton?”*
- Alcuni studenti focalizzano la loro attenzione sul primo punto. Se la forza agisce anche nel vuoto e se esiste veramente il vuoto. Se il vuoto non esiste allora può essere proprio la materia interposta ad interagire tra 2 corpi.

Più newtoniani di Newton

- Per vincere lo scetticismo della classe vengono proiettate alla LIM queste tre brevi letture:

1. Lettera di Newton a Bentley:

"È inconcepibile che l'inanimata, bruta materia, senza la mediazione di qualcos'altro che non sia materiale, debba operare e influire su dell'altra materia senza contatto reciproco, come dovrebbe essere se la gravitazione, nel senso di Epicuro, fosse essenziale e inerente a essa. E questa è la ragione del perché desideravo che voi non attribuiste a me la gravità innata. Che la gravità debba essere innata, inerente ed essenziale alla materia, in modo tale **che un corpo possa agire su un altro a distanza attraverso un vuoto, senza la mediazione di nient'altro, per il tramite del quale la loro azione e forza possano essere trasmesse dall'uno all'altro, è per me un'assurdità così enorme da non credere che un uomo dotato di un'adeguata facoltà di giudizio nelle questioni filosofiche possa mai cadervi.** La gravità deve essere causata da un agente che opera costantemente in accordo a certe leggi, ma se questo agente sia materiale o immateriale l'ho lasciato alla valutazione dei miei lettori".

“Hypotheses non fingo”

2. Principia:

Nella seconda edizione della *Phylosophiae Naturalis Principia Mathematica* del 1713, nella sezione finale intitolata - Scolio Generale - troviamo la celebre frase in latino “**hypotheses non fingo**”. Scrive Newton:

"In verità non sono ancora riuscito a dedurre dai fenomeni la ragione di queste proprietà della gravità, e non invento ipotesi."

3. Newton contro la proliferazione degli eteri:

"Forse l'intero quadro della natura è costituito dalle diverse «contextures» di spiriti eteri o vapori condensati per precipitazione, al modo in cui i vapori si condensano nell'acqua o le esalazioni in sostanze più pesanti e dopo la condensazione sono inglobati in forme diverse; inizialmente ciò è accaduto per il diretto intervento della mano del Creatore, e poi per il potere della natura, in virtù del comando: crescete e moltiplicatevi..."

- Insomma Newton non è assolutamente perentorio nel sostenere l'azione a distanza come vorrebbero i libri di testo ma è al contempo scettico sul ricorso agli eteri.

La forza elettrica agisce a distanza?

- Per quanto riguarda la forza elettrica Faraday compie molti esperimenti tesi proprio a verificare quanto incida sul valore della forza elettrica il mezzo interposto tra le cariche. Il docente spiega come sia proprio un'invenzione di Faraday la parola dielettrico, da cui la costante che compare nella legge di Coulomb.

- Cerchiamo in rete la definizione di dielettrico. Ci imbattiamo nella definizione dell'Enciclopedia Italiana Treccani del 1931:

Nome significativa "capace di trasmettere le azioni elettriche", che il Faraday diede agl'isolanti, per la grande importanza che essi hanno nei fenomeni elettrici, in cui si comportano come attivi tramite delle azioni elettriche.

- Il docente spiega in cosa Faraday considera i dielettrici come tramite delle azioni elettriche. Il dielettrico si comporta come un dipolo elettrico, la polarizzazione degli isolanti viene interpretata in termini di orientamento dei dipoli quando vengono elettrizzati.

Gli esperimenti di Faraday sul vuoto

- Ai tempi degli esperimenti di Faraday inoltre la tecnologia aveva consentito di creare dei “bei vuoti” dell’ordine dei 10 Pascal (un decimillesimo della pressione atmosferica!) e, dopo il 1850, addirittura al centesimo e al millesimo di Pascal.
- Questi esperimenti avvalorano l’idea che lo spazio interposto tra due cariche debba, in qualche modo, partecipare all’interazione tra le cariche.
- Questo discorso non verrà qui approfondito, rimandandone lo sviluppo all’interno del percorso sui raggi catodici già sperimentato e documentato per le classi quinte.

Faraday e la gravitazione

- *“molte considerazioni premono nella mia mente spingendola all'idea di una causa della gravità che non risieda semplicemente nelle particelle della materia, ma che sia costantemente in esse e in tutto lo spazio.”*

Nel 1857 Faraday esprime le sue considerazioni in un articolo intitolato *On the Conservation of Force*. Il docente sottolinea agli studenti che la forza di cui parla Faraday è la forza viva e pertanto quello di Faraday è un discorso relativo all'energia e in particolare all'energia di un sistema formato da almeno due corpi (<https://vinaire.me/2017/10/27/comments-on-faradays-principle-of-force/>).

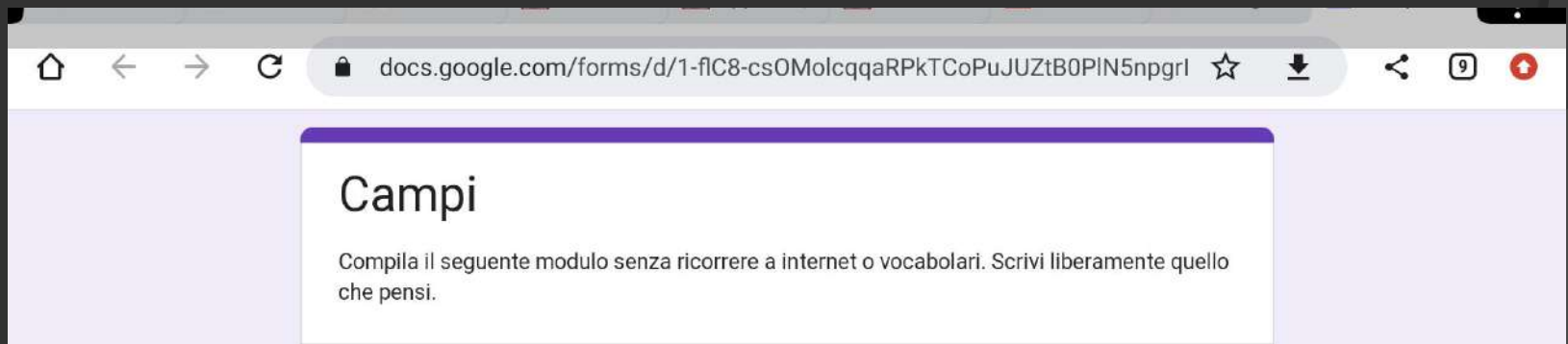
“Prendiamo quindi in esame due particelle A e B, che reciprocamente si attraggono grazie alla forza di gravità, sotto un diverso punto di vista. In base alla definizione, la forza dipende da entrambe le particelle; e se una di esse fosse da sola non potrebbe gravitare, e cioè non potrebbe esercitare alcuna attrazione, alcuna forza di gravità. Supponiamo che A esista in tale stato isolato e che non si abbia forza gravitante, e che poi B sia messa in relazione con essa: la gravitazione diventa presente, come si suppone, per entrambe.”

Faraday ritiene assurdo l'apparire o scomparire di energia quando consideriamo una particella isolata o in rapporto ad altre particelle.

- *Ironicamente Faraday scrive: “Credo di rappresentare nel modo giusto l'idea comune di forza gravitazionale dicendo che essa è una semplice forza attrattiva che si esercita tra ogni coppia o fra tutte le particelle o le masse della materia, ad ogni distanza sensibile, ma con una intensità che varia inversamente con il quadrato della distanza. L'idea usuale di forza implica l'azione diretta a distanza; e tale concezione sembra presentare ben poche difficoltà, eccezion fatta per Newton e per poche altre persone, tra le quali figuro io stesso, che in proposito possono pensarla come lo stesso Newton.”*

La parola campo

- Viene assegnato per casa la compilazione di un brevissimo modulo di Google, due semplici richieste:
 - 1. Nel linguaggio comune la parola campo è usata in più contesti. Elenca i significati che dai alla parola campo.
 - 2. Quando si ha difficoltà a telefonare o a collegarsi ad internet si usa dire che non c'è campo. Che significato dai a questa frase?
- Le risposte vengono poi raccolte dal docente e discusse in classe per pervenire ad un risultato condiviso.



L'analisi delle risposte

- La discussione in classe porta ai seguenti risultati:
 - La parola campo può delimitare uno spazio (fisico o astratto, come in espressioni quali 'campo di interesse, di studio, etc.')
 - ma allo stesso tempo possiamo assegnare una qualche proprietà allo spazio (campo sportivo, di calcio di basket, campo di battaglia, terreno agricolo). Escono fuori anche in circa un quarto dei ragazzi intervistati i termini campo elettrico, magnetico, elettromagnetico. Ma dalla discussione emerge che queste ultime definizioni sono ancora "scatole vuote" a cui non corrisponde un significato preciso.
 - Le risposte alla seconda domanda infatti si risolvono in frasi come *'manca il segnale'*, *'manca la linea'*, *'non c'è connessione'*, *'la zona non è coperta dalla rete'*. Uno studente scrive una frase molto interessante: ***"siamo fuori dal raggio di azione di un ripetitore o di un router"***.
 - Insomma, aggiunge il docente, manca qualcosa che dovrebbe esserci indipendentemente dalla nostra presenza, un qualcosa che ha bisogno di una sorgente .

Le domande socratiche

- Il docente comincia la lezione in laboratorio ponendo alla classe questi quesiti:
 1. Sono in un bosco. Come faccio a sapere se c'è linea / segnale / campo ?
 - **R.** *Tiro fuori il cellulare e provare a chiamare.*
 2. Nel mio zaino potrebbe esserci una potente calamita: come faccio a sapere se c'è davvero senza aprirlo?
 - **R.** *Mi avvicino con un oggetto di ferro.*
 3. Qui c'è il generatore di Van de Graaf. Come faccio a sapere se è carico?
 - **R.** *Devo avvicinarmi e sentire se prendo la scossa.*
- La classe capisce da queste domande che si tratta in tutti i casi di andare a "testare" la presenza di un qualcosa che c'è indipendentemente dalla forza che si instaurerà, ad esempio, tra la calamita e l'oggetto di ferro con cui mi avvicino allo zaino.

Attività in laboratorio: il campo magnetico

- Il docente distribuisce agli studenti dei magneti e dei magnetoscopi, gli studenti ci giocano qualche minuto dopodiché si discute su quello che hanno visto. Gli aghi di ferro o la limatura di ferro si orienta lungo linee.
- Viene naturale parlare della bussola.
- Le domande degli studenti impongono a questo punto di aprire una piccola parentesi sul campo magnetico terrestre.
- Si passa allora a disegnare queste linee.
- Sottolineiamo qui una cosa importante. Niente in più viene detto qui né in seguito sul campo magnetico. La definizione, le unità di misura o altro sarà demandato al programma del quinto anno. Ci basterà questo lavoro di analogia per parlare degli altri campi.



Le linee di forza del campo magnetico

- Stessa esperienza la si fa con una serie di aghi magnetici posti attorno ad un magnete lineare e poi ad un magnete a ferro di cavallo. Possiamo immaginare le linee di campo come quelle linee immaginarie lungo le quali gli aghi si dispongono in direzione tangenziale.
- Gli studenti disegnano su un foglio le linee del campo magnetico generato da un magnete spostando il loro ago di prova.
- Nelle prime due figure in basso si vede come cambia l'orientamento Nord-Sud degli aghi quando si ruota il magnete lineare. Nell'ultima come tutti gli aghi (e di conseguenza le linee di forza convergono verso i poli).

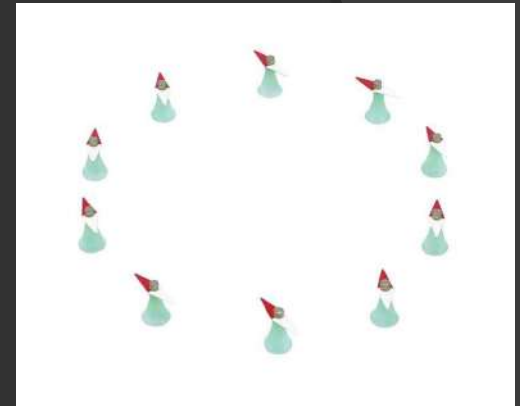


Perché prima il campo magnetico?

- ◉ Per semplicità abbiamo preferito osservare e descrivere, non il campo elettrico ma quello magnetico.
- ◉ In laboratorio avremmo potuto far vedere le linee del campo elettrico, grazie a un dispositivo costituito da una vaschetta in cui galleggia, nell'olio di ricino, del semolino. L'applicazione, mediante due elettrodi, di una forte differenza di potenziale fa sì che il semolino si orienti lungo le linee di campo.
- ◉ Motivo della scelta non è stato quindi dettato tanto dalla semplicità esecutiva, quanto quella che di dovere proporre un'esperienza che avrebbe presupposto la conoscenza del potenziale elettrico.
- ◉ Questa scelta inoltre rispecchia il percorso storico che ha visto effettivamente la comprensione dei fenomeni elettromagnetici ben prima di quelli elettrostatici.
- ◉ Solo successivamente definiremo e disegneremo le linee dei campi gravitazionale ed elettrico.

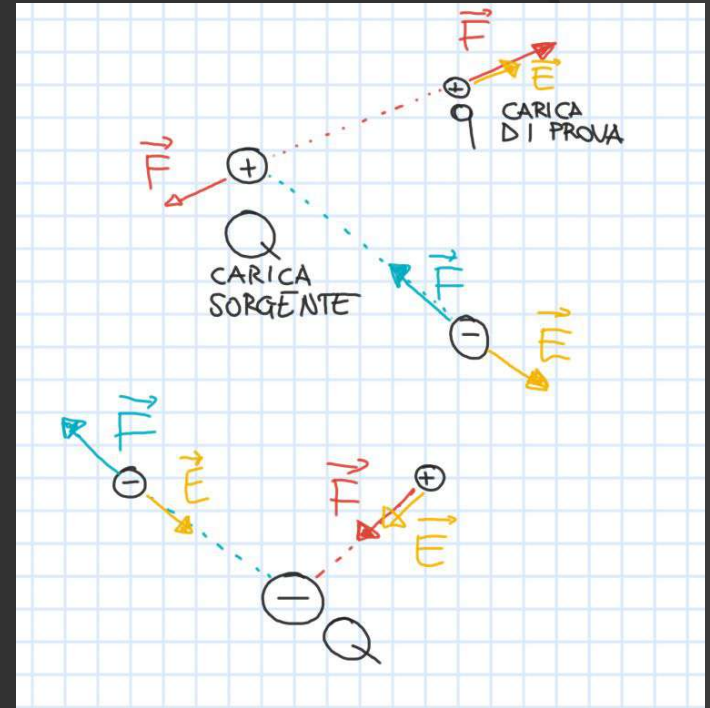
Dov'è la sorgente del campo?

- Questa immagine trovata su internet e poi riprodotta in classe, è stata occasione di riflessione condivisa con gli studenti.
- Gli aghi magnetici individuano una linea di campo chiusa. Dove sono il Polo Nord ed il Polo Sud? Dov'è la sorgente del campo?
- Qualcuno ironizza che c'è qualche magnete nascosto. Il docente dice che in qualche modo non siamo lontani dal vero. I magneti però non sono per niente nascosti. Un paio di studenti capiscono che l'origine di quella linea chiusa è proprio l'effetto dei campi dei piccoli aghi.
- L'ago di test, così come la carica di test o la massa di prova genera un proprio campo. Questo campo deve essere trascurabile rispetto a quello generato dalla sorgente.



Il campo elettrico e le linee di forza

- Si passa quindi, in analogia a quanto fatto per il campo magnetico, a definire le linee di campo elettrico.
- Se le linee del campo magnetico sono individuate da un ago di prova analogamente occorrerà, per il campo elettrico, considerare una carica di prova. Con quali caratteristiche? Piccola rispetto alla carica sorgente.
- Dal momento che il campo non dovrà dipendere dalle cariche sorgenti si definisce il vettore campo elettrico come il rapporto tra la forza agente su una carica di prova e la carica stessa.



$$\vec{E} \equiv \frac{\vec{F}_{\text{agente su } q}}{q}$$

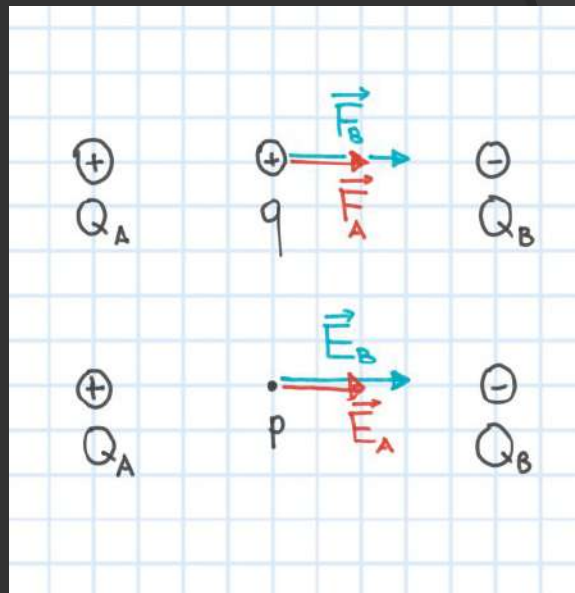
Campo elettrico: prime criticità

- Si eseguono esercizi sulla sovrapposizione degli effetti.

- Emerge subito una criticità che testimonia di un salto concettuale non banale. Due esercizi, praticamente identici, vengono avvertiti dagli studenti di difficoltà crescente:

1. Date due cariche, poste nei punti A e B, trovare la forza risultante su una terza carica q allineata con Q_A e Q_B .

2. Date due cariche, poste nei punti A e B, trovare il campo elettrico risultante in un punto P posto sulla retta congiungente A e B.

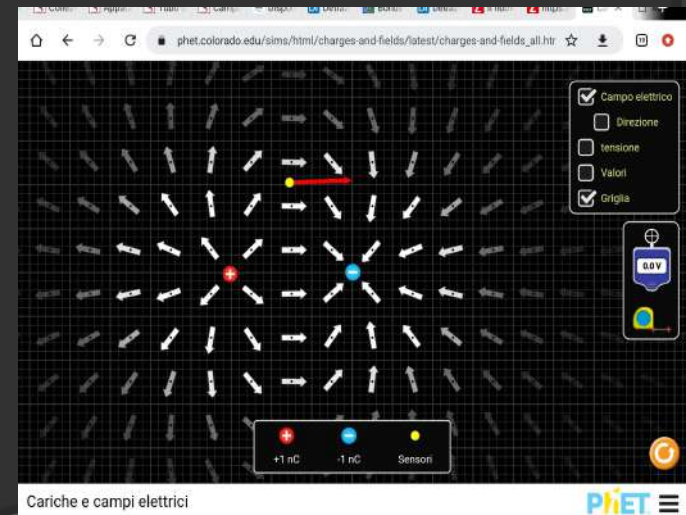
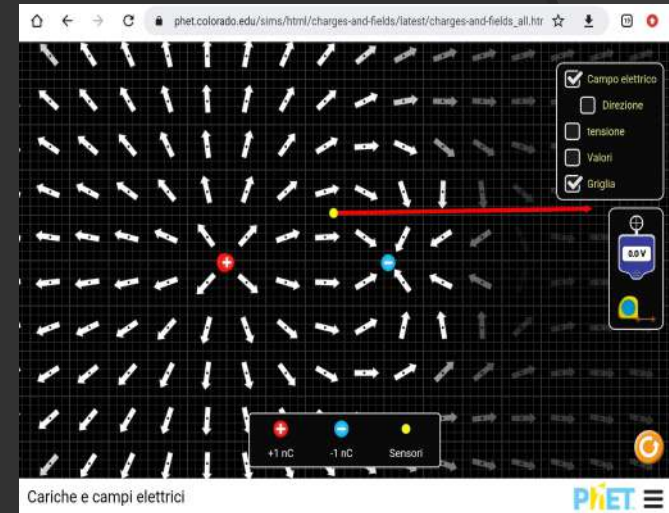


- L'assenza, nel secondo caso, di una carica in P destabilizza buona parte degli studenti. Non trovano immediato immaginare che in P sia presente una carica di test.

- Hanno superato questo impasse solo quando si sono sentiti autorizzati dal docente a disegnare una carica nel punto P (e dopo aver visto che è tutto più facile se tale carica viene inoltre assunta positiva) e a svolgere l'esercizio nel modo visto in precedenza per la forza.

Esperienze virtuali

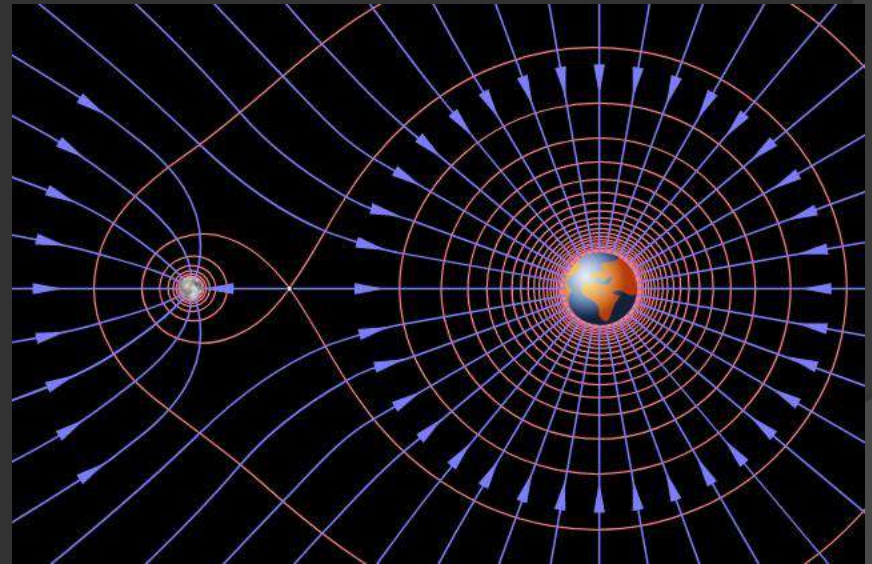
- Abbiamo utilizzato un simulatore del PhET Colorado per analizzare varie configurazioni di cariche puntiformi.
- A destra l'immagine di un dipolo e di due cariche di segno opposto ma diverso modulo, sotto l'effetto di più cariche allineate che aiuterà poi la trattazione del caso del campo elettrico.



(Link: https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_it.html)

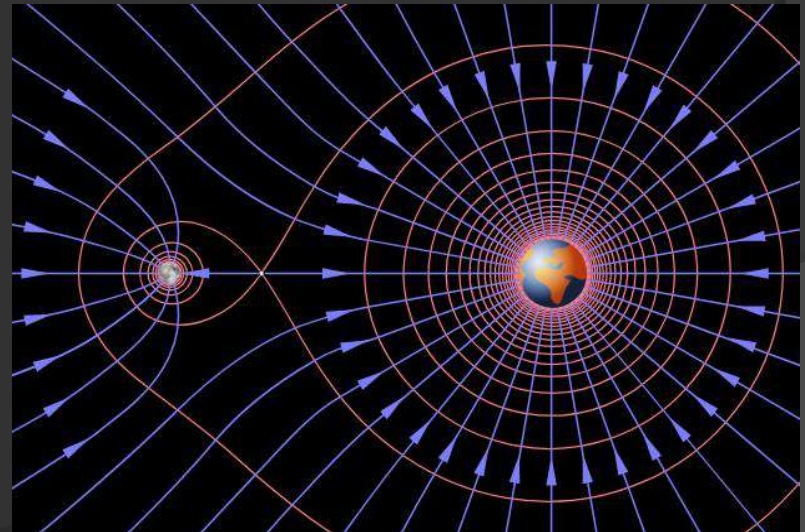
La definizione del campo gravitazionale

- Per simulare un campo uniforme basta porsi a grande distanza da una carica puntiforme. Si fa notare l'analogia con il campo gravitazionale locale. Possiamo immaginare l'aula come attraversata da tante linee parallele. Se ci mettiamo invece a grande distanza dalla superficie terrestre queste linee non appariranno più parallele ma convergenti verso il centro della Terra.
- Se ci mettiamo ancora più lontani, ad esempio tra la Terra e la Luna, le linee si incurvano per effetto della somma vettoriale, punto per punto, dei due campi, quello terrestre e quello lunare.
- I più curiosi chiedono: cosa sono quelle linee rosse?



Si introducono le superfici equipotenziali

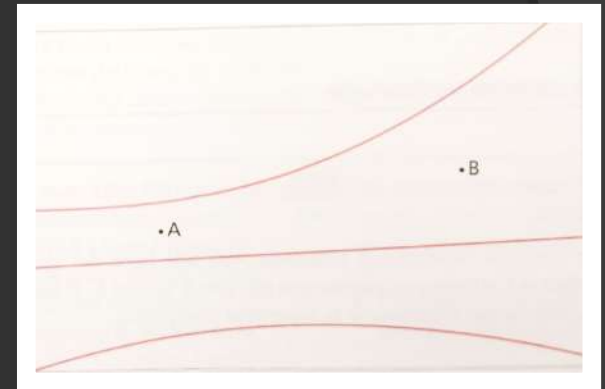
- Cambia il lavoro fatto dalla forza peso del prof se, invece di far lezione andando su e giù per l'aula, cammina avanti e indietro sui banchi?
- Gli studenti riflettono sulle grandezze lavoro ed energia. Rammentano, tranne pochi studenti, che abbiamo definito l'energia potenziale gravitazionale a meno di una costante.
- Il docente assegna un problema: calcolare il lavoro compiuto dalla forza peso per muovere un corpo tra due punti A e B sulla superficie di una sfera omogenea: quasi tutti riconoscono che il lavoro è nullo.
- Riconosciamo allora le superfici equipotenziali tra Terra e Luna nelle linee rosse in figura.
- Questo modo di procedere si è rivelato di estrema utilità quando, subito dopo, si è introdotto il concetto di potenziale elettrico.



Vediamo cosa abbiamo capito

- Viene somministrata in classe la seguente verifica formativa composta da sei quesiti e dalla durata di 30 minuti di cui riportiamo sinteticamente le risposte.

1. Considera il campo elettrico le cui linee di forza sono mostrate in figura. Stabilisci, motivando la risposta se il campo elettrico è più intenso nel punto A o nel punto B.



- 18 le risposte apparentemente corrette, 2 errate. Apparentemente perché quando si vanno a leggere le motivazioni alla risposta si scopre che la maggioranza degli studenti non ha afferrato il motivo per cui il campo in A è più intenso. In diversi hanno ragionato in termini di distanza dalle linee di forze e non in termini di densità delle linee. Come se le linee stesse rappresentassero particelle cariche.

Il rassicurante inverso del quadrato

- Vale la pena riportare queste immagini tratte dai test. Molti studenti si rifugiano nella formula nonostante l'assenza di cariche puntiformi!

il campo elettrico è più intenso nel punto A perché il campo è inversamente proporzionale alla DISTANZA

~~IL CAMPO ELETTRICO~~ IL CAMPO ELETTRICO È PIÙ INTENSO NEL PUNTO A PERCHÉ ATTIRA VERSO DI SE LE LINEE DI CAMPO E COME SI VEDE NELLA FIGURA IL PUNTO A È PIÙ VICINO ALLA LINEA RISPETTO AL PUNTO B

il modulo sarà più intenso nel punto A che è più prossimo alle linee

L'importanza della verbalizzazione

Sono più vicine nel punto A perché la distanza fra il punto e la linea è minore rispetto a quella del punto B

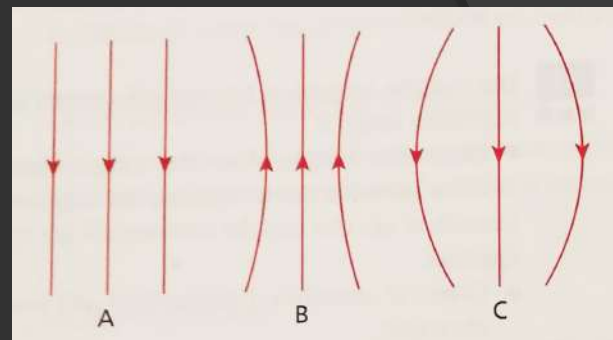
L'intensità del campo elettrico dipende dalla distanza della carica presa in considerazione dalle linee di campo quindi in questo caso il punto A è più intenso.

IL CAMPO ELETTRICO È PIÙ INTENSO NEL PUNTO A PERCHÉ A ESSO SONO PIÙ VICINE LE FORZE

- Anticipiamo qui un aspetto importante di questo percorso: il processo di verbalizzazione è servito a migliorare, sia l'apprendimento della fisica, sia, in generale, le capacità espositive e la proprietà di linguaggio degli studenti, sia italiani che stranieri, in questa classe ben sei su ventiquattro.

Vediamo cosa abbiamo capito

2. In figura sono rappresentate le linee di forza del campo elettrico in tre regioni di spazio A, B, C. Per ciascuna regione stabilisci, motivando la risposta, se il campo elettrico è uniforme



- 17 le risposte corrette, 4 non motivano, per alcuni il numero delle linee di forza coincide con l'intensità e non con la direzione.

3. Le linee di forza che convergono verso una certa carica sono 25 mentre quelle che escono da una seconda carica di $+100 \text{ nC}$ a essa vicina sono 5. Qual è il valore della prima carica? Motiva il procedimento seguito.

- Qui si vede come la classe non aveva ancora metabolizzato i concetti: in 8 non rispondono; 9 deducono correttamente il modulo della carica ma non il segno; 1 il segno ma non il modulo. Uno studente scrive: *"le linee di forza radiali sono quelle che disegniamo noi, non ha senso stabilire la carica da queste forze"*. Di fatto fraintendendo che il numero di linee è sì arbitrario, ma comunque proporzionale al modulo del campo.

Vediamo cosa abbiamo capito

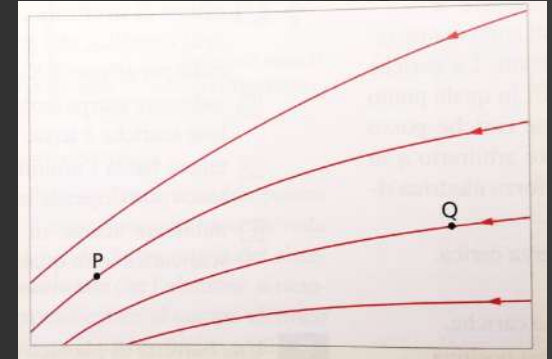
4. In un sistema di riferimento cartesiano è presente un campo elettrico uniforme le cui linee di forza sono parallele all'asse x e dirette nel verso positivo delle ascisse.

Considera una carica puntiforme positiva inizialmente ferma posta nell'origine del sistema di riferimento. Quale tipo di moto e quale traiettoria seguirà la carica? Cambierebbe qualcosa se la particella possedesse una velocità iniziale non nulla lungo l'asse y ?

- Per la prima parte sono 13 le risposte corrette ma uno studente scrive che il moto è uniformemente accelerato ovvero a (e non v) è crescente. In 4 si limitano a scrivere che il moto è verso destra. Uno studente scrive che il moto sarà a velocità costante.
- Nella seconda parte solo 4 studenti inferiscono che il moto sarà parabolico, 2 scrivono di moto in diagonale, 1 di moto anche lungo l'asse y . In 2 che l'accelerazione sarà maggiore che nel primo caso; 1 che non cambia niente; il resto della classe non risponde.
- La successiva discussione con gli studenti evidenzia non tanto lacune nelle conoscenze di meccanica, tutti ne ricordano i principi, ma difficoltà a calarli in un nuovo contesto.

Vediamo cosa abbiamo capito

5. In una regione di spazio è presente un campo elettrico le cui linee di forza sono rappresentate in figura. Due particelle uguali con carica -2nC sono poste, rispettivamente, nei punti P e Q e poi lasciate libere di muoversi. Traccia i vettori accelerazione nei punti P e Q, rispettando la loro intensità relativa, ossia tracciando un vettore più lungo dell'altro se una particella possiede un'accelerazione iniziale maggiore. Spiega le scelte effettuate.



- Qui in 2 non rispondono, 1 scrive la legge oraria del m.u.a. 1 disegna solo i vettori ma con verso discorde, 1 scrive che l'accelerazione è maggiore in Q perché più vicino (ma non specifica a cosa), 2 giustificano perché la carica è negativa. Per 13 studenti l'accelerazione è maggiore in P perché più vicino alla sorgente del campo (9 però con verso concorde a quello della linea di campo, 1 con direzione non tangente alle linee di forza)

6. Ipotizza la particella in P inizialmente ferma: quale traiettoria descriverà durante il moto? Cambierebbe la tua risposta se fosse invece inizialmente in moto?

- Per 5 studenti segue la linea di campo, per altri 5 prosegue in linea retta. 1 un arco leggermente più ampio della linea su cui è posta la carica, 1 verso il basso, 1 parabolica. In 6 non rispondono.

Problemi di linea

- ◉ Questa verifica formativa ha messo in evidenza ciò che temevamo: il passaggio da forza a campo e l'introduzione delle linee di forza non è assolutamente banale e ha bisogno di essere affrontato nei giusti tempi.
- ◉ Di esercizi di questo tipo, molto qualitativi, sono presenti nei libri di testo ma rappresentano una minoranza rispetto alla pleora di problemi in cui c'è da solo da sostituire numeri nelle formulette o tutt'al più invertirle.
- ◉ Gli stessi studenti tendono a prenderli sottogamba ritenendoli meno importanti. Anche in fase di correzione dei compiti assegnati a casa, venivano sempre richiesti quelli dove c'erano da fare i calcoli e non le risposte ai quesiti più teorici. Stava ogni volta al docente soffermarvicisi.
- ◉ Dopo avere insistito sull'argomento e aver verificato che il concetto di linea era stato ben assimilato, siamo passati a parlare del flusso.

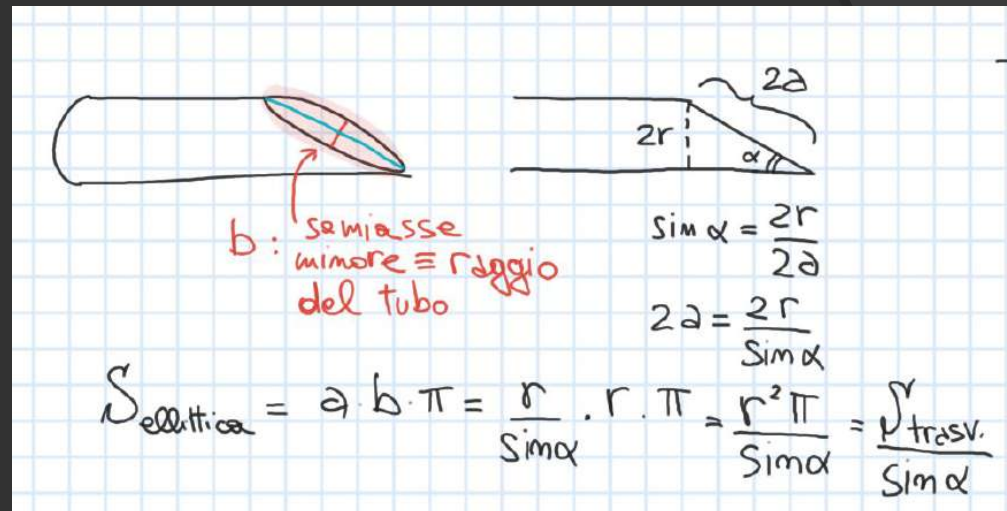
L'analogia con i fluidi

- ◉ Il docente, dopo aver fatto alcuni richiami di meccanica dei fluidi introduce il concetto generale di portata (di un fiume, di un condotto) fino alla definizione prodotto della velocità per la sezione trasversale di una condotta.
- ◉ A questo punto, il docente, coltello alla mano, affetta per obliquo, rispetto al suo asse, un tubo di cartone.
- ◉ Discute con gli studenti se la quantità di fluido che fuoriesce dalla sezione continua ad essere la stessa. Si conviene che così debba essere.
- ◉ Si discute la forma della sezione, sembra ellittica. Facciamo nostra questa ipotesi: come dimostrare che la forma è effettivamente quella di una ellisse?



Dalle linee di campo al concetto di flusso

- Nella successiva ora di matematica si richiamano le proprietà dell'ellisse e si verifica che il tubo presenta effettivamente una sezione ellittica.

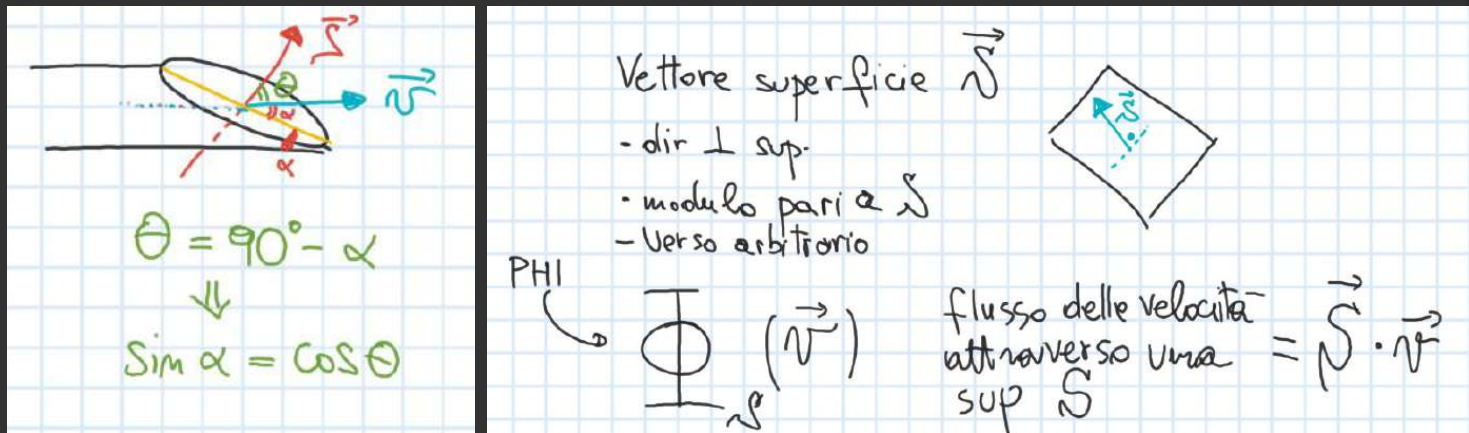


- Si cerca di scrivere il flusso in funzione dell'area dell'ellisse, della velocità del fluido e dell'angolo di inclinazione.
- Il docente chiede: “ricordate in fisica dove si è incontrata una legge del genere? Per il lavoro, il prodotto scalare. Cosa manca però? La superficie non è un vettore e compare un seno invece di un coseno. Il docente fa vedere come, manipolando i termini si può proprio scriverla così.

$$Q = \int_{\text{trasv.}} \cdot \vec{v} = S_{\text{ell.}} \cdot \sin \alpha \cdot v = S_{\text{ell.}} \cdot v \cdot \cos \theta = \vec{S} \cdot \vec{v}$$

Lo strano vettore superficie

- La superficie non è un vettore. Ma si possono usare i vettori per individuare una superficie. A qualche studente fa specie misurare un vettore in metri quadrati. il docente fa notare che nessuno di loro ha mai obiettato che le forze si misurino in newton.



- Fatti un pò di esempi numerici, si generalizza il risultato e, dal flusso di un liquido, si passa al flusso di un campo. Ci si interroga sul significato da dare a questo campo che "sgorga" da una carica elettrica e attraversa superfici immaginarie. Gli studenti vorrebbero subito associare a questa grandezza fisica qualcosa di più tangibile. Sentono la cosa assolutamente astratta.

Linee e flusso: c'è molto di non detto

- I libri di testo danno quasi come immediato il passaggio logico per cui il flusso è proporzionale alle linee di campo. Questo è vero solo se il campo varia con l'inverso del quadrato della distanza. Già dal primo esempio in figura, si vede che le linee di campo associate ad una carica puntiforme esterna alla superficie danno un numero netto di linee nullo. Ma siamo sicuri che siano uguali e opposti anche i flussi?
- Ovvero il flusso inteso come prodotto di E per S è proprio proporzionale al numero di linee di campo?
- Abbiamo ritenuto utile proporre agli studenti cosa succedeva con un campo che variava con l'inverso della distanza oppure con il cubo della distanza. In questi due casi numero di linee e flusso non sarebbero più proporzionali!
- Basta prendere due superfici sferiche concentriche. Se raddoppio il raggio il campo si riduce di un quarto e la superficie aumenta di quattro volte.
- Se il campo fosse stato, ad esempio, inversamente proporzionale alla distanza il flusso sarebbe, a parità di linee di forza, raddoppiato!
- Se invece fosse stato inversamente proporzionale al cubo della distanza, il flusso sarebbe diminuito con la distanza.

$\oint_S (\vec{E}_{Q \text{ esterna}}) = 0$

Il num. di linee di campo che attraversano S_1, S_2, S_3 è sempre lo stesso
 \downarrow
 è indipendente dalla forma di S

$r_2 = 2r_1$
 $S_2 = 4S_1$
 $n_1 = n_2$ numero di linee
 $\frac{n_1}{S_1} = 4 \frac{n_2}{S_2}$ densità di linee per unità di superficie

Se $E \propto \frac{1}{r^2}$ $E_2 = \frac{1}{4} E_1 \Rightarrow E_2 \cdot S_2 = E_1 \cdot S_1$
 Se $E \propto \frac{1}{r}$ $E_2 = \frac{1}{2} E_1 \Rightarrow E_2 S_2 = 2 E_1 S_1$
 Se $E \propto \frac{1}{r^3}$ $E_2 = \frac{1}{8} E_1 \Rightarrow E_2 S_2 = \frac{1}{2} E_1 S_1$

Il teorema di Gauss

- Gli esempi ed esercizi precedenti sono serviti a rendere più chiaro il senso del teorema di Gauss.
- Sono seguite alcune lezioni frontali dove l'utilizzo del teorema di Gauss ci ha consentito di trovare l'espressione del campo per varie configurazioni (carica distribuita uniformemente su una superficie sferica, filo carico, piano carico).
- Siamo poi tornati in laboratorio per osservare il fenomeno della gabbia di Faraday.
- Gli studenti, alla luce di quanto appreso in precedenza, hanno saputo inferire in maniera corretta del perché l'elettroscopio all'interno della gabbia non misura alcun eccesso di carica mentre invece le foglioline di quello esterno divergevano.

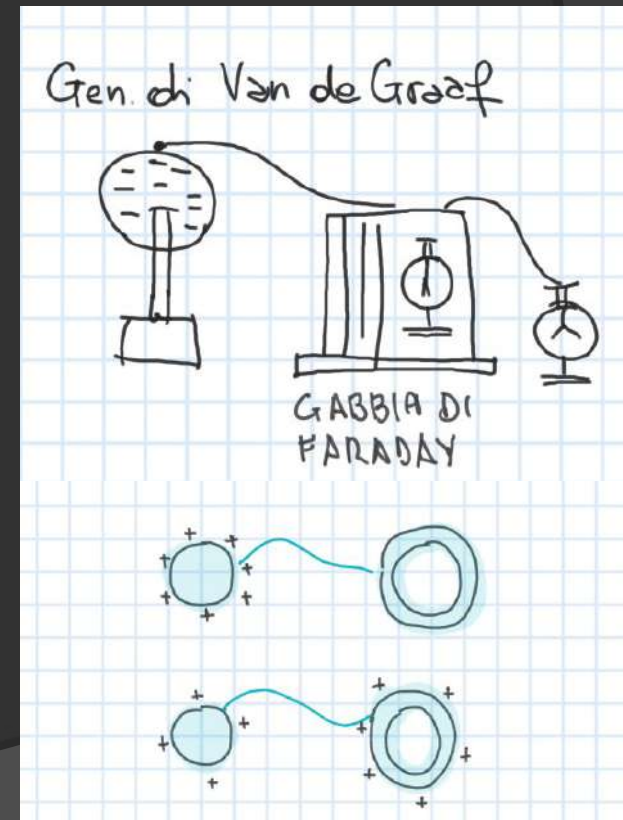


La difficoltà di modellizzare

- Occorrerebbe molto tempo per fare acquisire una buona capacità di modellizzare un problema. Nella figura a fianco c'è un classico esempio, visto in laboratorio e poi interpretato dal punto di vista teorico in classe della gabbia di Faraday con i due elettroscopi a foglie posti, uno all'interno, uno all'esterno della gabbia e ad essa collegati mediante catenelle metalliche.
- Come visto gli studenti sono riusciti piuttosto bene a capire e interpretare il problema.
- Esito opposto nella risoluzione di questo esercizio in cui pochi hanno ravvisato la stessa, identica, situazione:

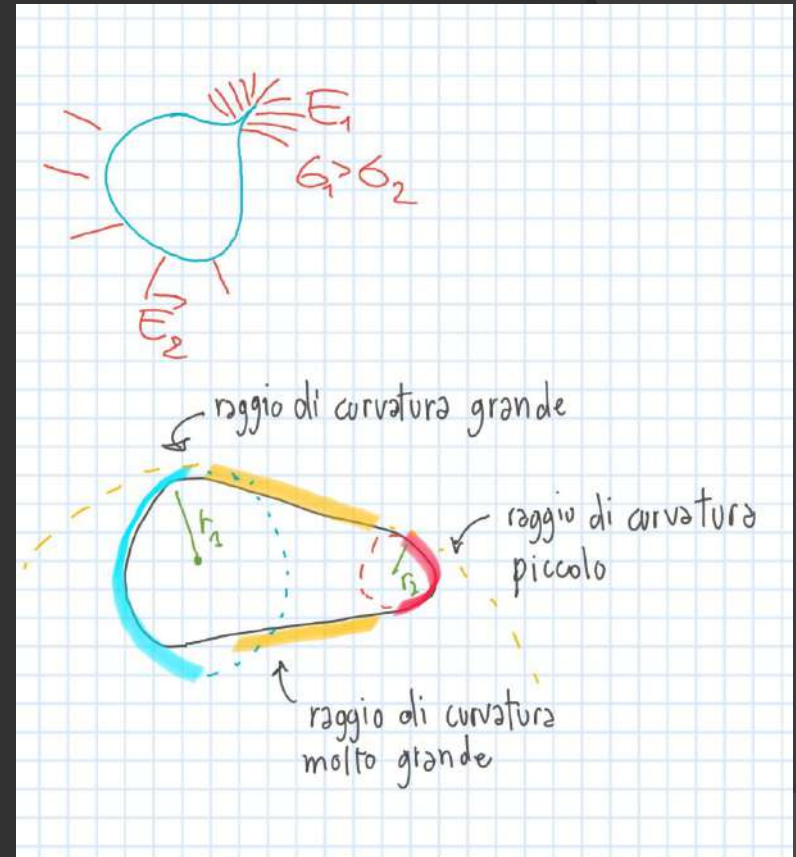
Una sfera conduttrice di raggio $R_1 = 10$ cm viene caricata a un potenziale, rispetto a terra di 50 V. Viene poi collegata mediante un sottile filo conduttore a un guscio conduttore sferico di raggio esterno $R_2 = 30$ cm e raggio interno $R_3 = 25$ cm. Calcola la quantità di carica distribuita, all'equilibrio elettrostatico, sulle superfici interna ed esterna del guscio specificando il segno, i valori del potenziale sulle due superfici, il lavoro necessario per portare un elettrone dalla prima sfera alla superficie interna del guscio.

Pur sapendo che all'interno della gabbia non c'era eccesso di carica, più di mezza classe ha giudicato carico l'interno della sfera cava!



Il potere delle punte

- Siamo tornati a parlare del potere delle punte, altra questione in sospeso (vedi slide n.20).
- Avevamo congetturato che le cariche dello stesso segno, respingendosi, si allontanano le une dalle altre. Questo ragionamento andrebbe bene nel caso di una sfera ma gli esperimenti ci dicono che i campi elettrici sono più intensi in presenza di punte. Perché?
- Grazie al teorema di Coulomb, il docente perviene alla dimostrazione che risolve il nostro problema.



Verifiche

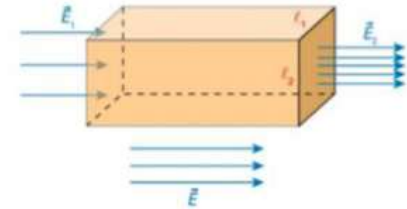
- Durante il percorso sono state fatte una verifica formativa scritta, trattata nelle slide precedenti, due verifiche sommative scritte ed una orale.
- Nelle verifiche scritte sono stati proposti problemi in cui si è privilegiato il ragionamento prima che alle capacità di calcolo algebrico o vettoriale. Agli studenti è sempre stato richiesto di motivare e giustificare le procedure e le strategie adottate.
- Ad esempio nella seconda verifica sommativa era presente l'esercizio proposto nella slide n.55.
- Un altro esercizio lo riportiamo nella slide seguente.
- I risultati delle verifiche formative sono state generalmente positive, nessuna insufficienza grave. Abbiamo registrato un generale miglioramento sia dal punto espositivo che dal punto di vista del ragionamento logico specie per gli alunni più fragili.

Un esempio di problema

- Qui riportiamo un altro esercizio riteniamo significativo.

Esercizio 3. Una superficie gaussiana a forma di parallelepipedo retto è immersa in un campo elettrico esterno, perpendicolare alle basi come nella figura. I lati di base misurano 30 cm e 20 cm e a sinistra si misura un campo $E_1 = 6,0 \text{ N/C}$, mentre a destra si ha $E_2 = 10 \text{ N/C}$.

- (a) Calcola la carica contenuta all'interno della superficie.
- (b) Che cosa si può dire della carica interna se il campo E assume lo stesso valore in prossimità delle basi?



- In questo problema lo studente deve inferire che se il numero di linee entranti ed uscenti è diverso allora deve essere presente una carica interna al volume racchiuso dal parallelepipedo così come prevede il teorema di Gauss.
- I calcoli rimangono molto semplici si tratta di moltiplicare il modulo del campo per l'area di base e sono solo successivi al ragionamento e all'applicazione delle conoscenze teoriche.

Valutazione dell'efficacia del percorso didattico

- Ci possiamo ritenere molto soddisfatti di quanto fatto dal momento che, al termine del percorso, abbiamo registrato un ottimo profitto del gruppo classe.
- Anche gli elementi più fragili e generalmente meno propositivi hanno apportato il loro contributo alle discussioni in classe che sono servite anche a renderli più sicuri nell'esposizione orale.
- Possiamo quindi affermare che gli studenti hanno acquisito la capacità di legare in maniera logica e strutturata una serie di scoperte, esperimenti e teorie.
- Sono riusciti a rafforzare la capacità di porsi domande sul significato di un esperimento, sugli obiettivi che ci si prefigge e, aspetto fondamentale della fisica, di metterne costantemente sotto prova la validità.

Bibliografia

- Arons - Guida all'insegnamento della fisica (Zanichelli)
- Bellone - La relatività. Da Faraday a Einstein (Loescher)
- Corbò - Eppur si muove! Volume 3 (Ferraro)
- Germolé - Pagine di storia dell'elettricità (Ibiskos)
- Hecht - Fisica 1 (Zanichelli)
- Romeni - Fisica e realtà, volume 2 (Zanichelli)
- Toscano - Una forza della natura (Sironi)
- Violino, Robutti - La fisica e i suoi modelli (Zanichelli)
- AA.VV. - PPC - Progetto Fisica, volume B (Zanichelli)

