

DIESSE FIRENZE
Didattica e Innovazione Scolastica
Centro per la formazione e l'aggiornamento

scienzAfirenze
SETTIMA EDIZIONE

Docenti e studenti a confronto su:

SULLE SPALLE DEI GIGANTI
interrogare la realtà guidati da un maestro

Aula Magna
Polo delle Scienze Sociali, Università di Firenze
Firenze, 19 – 20 aprile 2010

Secondo classificato – Sezione Triennio

Titolo: *Coulomb, che forza*

Di: M. Vittoria Busi, Giulio Gipsy Crespi, Lorenzo Gay, Filippo Sangregorio.

Scuola: Liceo Ginnasio “G. Berchet” – Milano

Docente: Barbara Chierichetti

Motivazione: Un cammino consapevole ed efficace che permette di passare dalla curiosità che suscita in noi un aspetto del reale alla domanda di senso che sostiene la “fatica” dell’imparare un metodo per conquistare la risposta che nel reale si cela. Ripercorrendo gli stessi passi e soprattutto immedesimandosi nelle stesse difficoltà del maestro che per primo scoprì la legge del fenomeno di interesse è rilevante la capacità di cogliere le sue osservazioni e riflessioni quali preziosi suggerimenti per individuare e comprendere l’aspetto chiave per interpretare correttamente i dati sperimentali, laddove appaiono in disaccordo con le previsioni teoriche.

RELAZIONE DEL DOCENTE

La proposta è stata rivolta a studenti di classe III del liceo classico che non avevano mai svolto un'attività sperimentale.

In questo lavoro si è voluto ripercorrere le tracce di Coulomb nella verifica della legge dell'inverso del quadrato della distanza nella interazione tra cariche dello stesso segno.

Particolare attenzione è stata rivolta alla osservazione della variazione dell'intensità della forza nel tempo dovuta alla graduale diminuzione di carica presente sulle sferette interagenti.

Tutta l'attività sperimentale si è attuata nel laboratorio di fisica durante ore extracurricolari mentre le nozioni teoriche necessarie per comprendere il fenomeno da osservare erano già state presentate agli studenti durante lezioni curricolari.

Lo sviluppo del percorso realizzato con gli studenti si può sostanzialmente dividere in tre fasi.

- Prima fase: studio dell'apparato sperimentale

Una prima parte degli incontri è stata dedicata alla conoscenza dell'apparato sperimentale da utilizzare, al suo montaggio e funzionamento. In questo momento iniziale è stato di fondamentale importanza il contributo di insegnanti e tecnici che, con i loro consigli e il loro aiuto anche materiale, hanno consentito la messa a punto della bilancia di torsione presente nella scuola.

- Seconda fase: Esecuzione delle misurazioni

Questo momento ha occupato larga parte del tempo dedicato a tale lavoro. Poiché infatti le misure di elettrostatica sono molto delicate e dipendono da fattori atmosferici e inoltre lo strumento stesso, la bilancia di torsione, è molto sensibile e capace di rilevare le più lievi vibrazioni, non sempre è stato possibile intervenire in modo efficace per ottenere misure significative. Per questi motivi è stato necessario eseguire diverse prove.

- Terza fase: discussione ed elaborazione dei dati

I dati raccolti dagli studenti venivano via via discussi ed elaborati inizialmente in modo grezzo ai fini di comprenderne il significato e l'attendibilità; spesso, al termine di una serie di misure, si metteva a fuoco quali dovevano essere le modifiche da introdurre per migliorarne la qualità.

Infine quando, anche grazie alla corrente siberiana che ha investito Milano e reso l'aria secca, siamo riusciti ad eseguire delle misure soddisfacenti, abbiamo cercato di giudicare i risultati ottenuti.

Alcune osservazioni personali:

1. L'apparato sperimentale è stato *perfezionato* in itinere: man mano che ci si accorgeva delle esigenze sperimentali si correggeva, si apportava qualche modifica ecc. Questo da una parte ha dilatato i tempi previsti per la realizzazione delle misure, dall'altra ha permesso agli studenti di approfondire la conoscenza del fenomeno *sul campo*.
2. Questa esperienza è stata significativa perché è stata l'occasione di comprendere che quando un fenomeno si presenta in natura, ad esso concorrono più fattori e l'operazione di isolare l'aspetto particolare che si desidera considerare richiede lo studio e la conoscenza di tutti quelli che si vogliono rendere trascurabili ai fini delle misurazioni.
3. Infine eseguire misure di elettrostatica significa osservare degli effetti la cui causa (le cariche) non è visibile. Questo pone seriamente il problema dell'interpretazione dei dati osservati. A questo riguardo sono state molto preziose le osservazioni e le considerazioni lasciateci da chi ci ha preceduto in questa avventura conoscitiva anche se, fino a quando non ci si paragona col dato, non è possibile rendersi realmente conto del peso dei vari aspetti.

Indice:

- Introduzione.....pag.2
- L'esperienza di Coulomb.....pag.2
 - Coulomb
 - La bilancia di torsione
 - Le sue memorie
- La nostra bilancia.....pag.3
 - La bilancia di torsione di Schurholz
 - Esecuzione delle misure
- Fattori che influenzano l'esperienza.....pag.4
 - L'esperienza
 - Sistema di smorzamento
 - L'umidità, la polvere: il processo di scarica.
- Osservazione dati.....pag.7
 - Risultati delle misure
 - Elaborazione
- Conclusione.....pag.10
- Bibliografia.....pag.10

Introduzione

“Con quale parola possiamo sorprendere la risposta dello scienziato al fascino del reale che lo invita? Forse con la parola “curiosità”. Non c’è ricerca se lo stupore non diventa domanda.”¹

Con questo lavoro ci proponiamo di presentare un’esperienza per noi nuova e interessante, la quale ci ha permesso di verificare sperimentalmente la legge riguardante la forza di Coulomb e soddisfare la nostra “curiosità”. Attraverso un lungo, talvolta un po’ tortuoso ma appassionante percorso ci siamo avvicinati alla fisica sperimentale e abbiamo potuto costatare con i nostri occhi la veridicità della legge di Coulomb.

L’esperimento di Coulomb

Charles Augustin Coulomb, un ingegnere militare francese nato nel 1736, fu il primo a sfruttare la torsione invece che la gravità per la misurazione della forza di interazione tra due cariche. Questa tecnica gli valse la vittoria a una competizione a premio che gli permise di entrare nell’*Académie de Paris* nel 1781. Dopo i primi studi di meccanica si dedicò allo studio di fenomeni elettrici e magnetici i cui risultati vennero pubblicati nelle *Mémoires sur l’électricité et le magnetisme* tra il 1784 e 1791. Particolare importanza ha per noi la prima memoria che Coulomb pubblicò nel 1785, di cui riporteremo alcuni frammenti: *..ho sperimentalmente determinato le leggi della forza di torsione di un filo di metallo, e ho trovato che questa forza è direttamente proporzionale all’angolo di torsione [..]. Ho mostrato nella medesima memoria, che per mezzo di questa forza di torsione è possibile misurare con precisione delle forze assai deboli come, ad esempio, un decimillesimo di grain.²*

Egli, grazie ai suoi studi approfonditi sulle proprietà meccaniche delle corde, inventò la bilancia a torsione (figura 1). Utilizzò questo strumento per misurare minute forze elettriche. Alla base di questa bilancia c’è un cilindro di vetro; all’interno del cilindro si trova

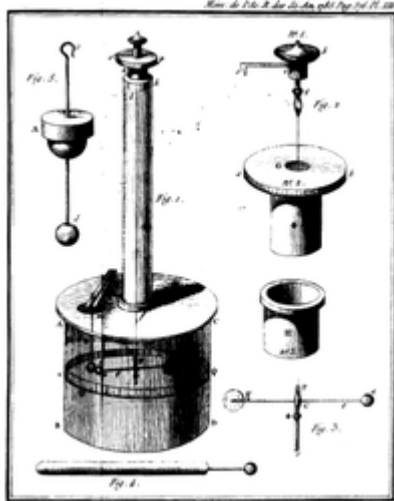


Figura 1. Bilancia di torsione di Coulomb

un’asticciola alla quale è legato un filo tenuto in tensione da un piccolo peso e fissato all’estremità superiore a una manopola ruotabile manualmente. A una estremità dell’asticciola è posta una sferetta, caricata per contatto da un’altra sfera, elettricamente carica, inserita all’interno del cilindro attraverso un foro presente nella parte superiore. Coulomb, dopo aver calato la sferetta carica nel foro e caricato per contatto la sferetta posta all’estremità dell’asticciola, osserva che le due sfere si allontanano causando la rotazione dell’asticciola.

Questa rotazione prosegue fino a che la torsione del filo determina un momento di forze opposto a quello associato alla forza repulsiva elettrica. Si giunge così a una posizione di equilibrio e l’angolo di rotazione dell’asticciola ha un certo valore α . La distanza tra le due sferette, se non supera i 25-30 gradi, per approssimazione, è direttamente proporzionale ad α . L’esperimento di Coulomb prosegue con una torsione manuale del filo: ruotando la manopola, posta nella parte

¹ M. Bersanelli, M. Gargantini, *Solo lo stupore conosce*, BUR

² C. A. Coulomb, *Prima memoria sull’elettricità e sul magnetismo*

superiore della bilancia, di un angolo β , l'asticciola cambia posizione formando un nuovo angolo α_2 minore di α . In questo nuovo assetto la forza è proporzionale all'angolo di torsione del filo ($\alpha+\beta$). L'ingegnere parigino voleva dimostrare che la forza con cui interagiscono le due cariche è inversamente proporzionale al quadrato della distanza.

Tenendo conto di quanto detto in precedenza, cioè che l'angolo di torsione del filo ($\alpha+\beta$) è direttamente proporzionale alla forza, e che l'angolo α descritto dall'asticciola rispetto alla sua posizione iniziale è direttamente proporzionale alla distanza tra le due sferette, possiamo far corrispondere a tale condizione la relazione ($\alpha+\beta$) α^2 =costante.

Coulomb, a causa delle minute forze che stava considerando e dello strumento non sempre preciso, impiegò parecchi anni per analizzare il comportamento delle cariche e il loro processo di scarica e infine pubblicò tre misure.

Le principali difficoltà che dovette affrontare furono le seguenti:

- il filo a cui era sospesa l'asticciola si sarebbe spesso attorcigliato quando non era teso
- le misure degli angoli non potevano avere una precisione superiore ai 2-3 gradi
- infine, usando le parole di Coulomb: *l'elettricità delle due sfere diminuisce un po' durante il tempo in cui si esegue l'esperimento, [...] Se si desidera una maggiore precisione o se l'aria è umida, e nel caso in cui l'elettricità si perda rapidamente, si deve con una prima osservazione determinare la diminuzione dell'azione elettrica delle due sfere in ogni minuto, servirsi poi di questa prima osservazione per correggere i risultati degli esperimenti che si vorranno fare quel giorno.*³

A conclusione di tale memoria, scrisse: *Risulta dunque da questi tre tentativi che l'azione repulsiva che le due palle elettrizzate con elettricità della stessa natura esercitano una sull'altra segue la ragione inversa del quadrato delle distanze.*⁴

I risultati ottenuti da Coulomb furono subito presi in considerazione e riconosciuti come validi all'interno della Francia; difatti non mancò l'approvazione per il suo esperimento da parte dei colleghi parigini. Fuori dalla Francia però l'approvazione per la legge di Coulomb tardò ad arrivare e fino all'inizio del 1800 non fu nemmeno presa in considerazione. Le critiche si basavano principalmente sul fatto che la terza misurazione di Charles Augustine Coulomb si scosta dalle prime due del 7,5%, differenza non trascurabile. Solo dopo il 1800 in Inghilterra e in Germania alcuni libri di fisica iniziarono a riportare la legge di Coulomb. Ancora nel 1830 gli attacchi alla validità della legge sulla forza coulombiana da parte di fisici, quali P.L. Simon o William Snow Harris, non erano cessati.

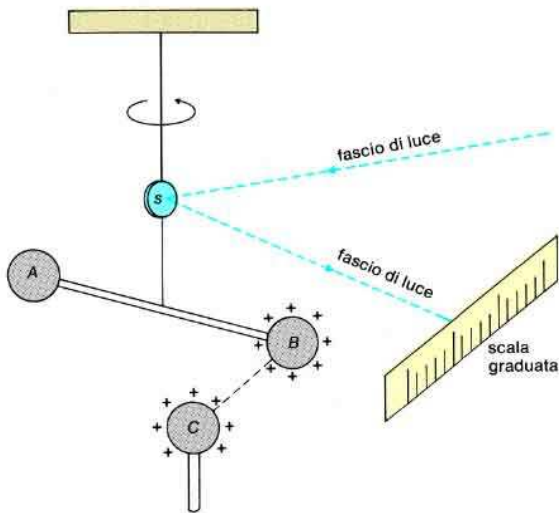
La nostra bilancia

Per eseguire i nostri esperimenti in laboratorio, abbiamo usato la bilancia a torsione di Schurholz, che presenta caratteristiche analoghe a quella usata per la prima volta da Coulomb; essa è costituita da un braccio verticale collegato rigidamente a un pesante piedistallo; l'asta verticale sorregge una manopola girevole, alla quale è fissato un sottile filo di torsione che trova la sua conclusione sul piedistallo stesso. A metà, il filo è interrotto da un cilindro isolante, sul quale sono fissati una sferetta mobile e un piccolo specchietto che serve a riflettere un raggio laser. Dalla parte opposta del cilindro, è fissato un apparato di smorzamento delle oscillazioni, costituito da una sottile asta metallica alla cui estremità è fissata una bandierina, immersa in una vaschetta contenente acqua (e sale). Una seconda sferetta adiacente alla prima e di dimensioni uguali è posta su un supporto a slitta munito di

³ C. A. Coulomb, *Prima memoria sull'elettricità e sul magnetismo*

⁴ C. A. Coulomb, *Prima memoria sull'elettricità e sul magnetismo*

una scala graduata che permette di stabilire la distanza tra le stesse. Per eseguire gli esperimenti, si caricano entrambe le sfere grazie ad un filo posto a contatto con esse e collegato al generatore elettrostatico di Van de Graaf. Una volta caricatele entrambe (le sfere sono poste a contatto in modo da distribuire uniformemente la carica elettrica), la forza elettrostatica fra le due sfere causa lo spostamento di quella mobile, finché viene raggiunta una posizione di equilibrio che corrisponde alla situazione in cui la forza di repulsione delle cariche è uguale alla forza di torsione del filo. Tale torsione produce una rotazione dello specchietto solidale con il filo che viene osservata inviando sullo specchio un raggio luminoso che una volta riflesso viene raccolto su uno schermo disposto a 3,50 metri di distanza dalla bilancia. Dunque dallo



scostamento della proiezione del raggio luminoso sullo schermo (fig.2-3), abbiamo ricavato le rispettive ampiezze degli angoli di torsione del filo calcolando l'arcotangente del rapporto tra lo spostamento e la distanza specchio - schermo. Tali angoli sono proporzionali alla forza con cui interagiscono le due cariche.

Figura 2

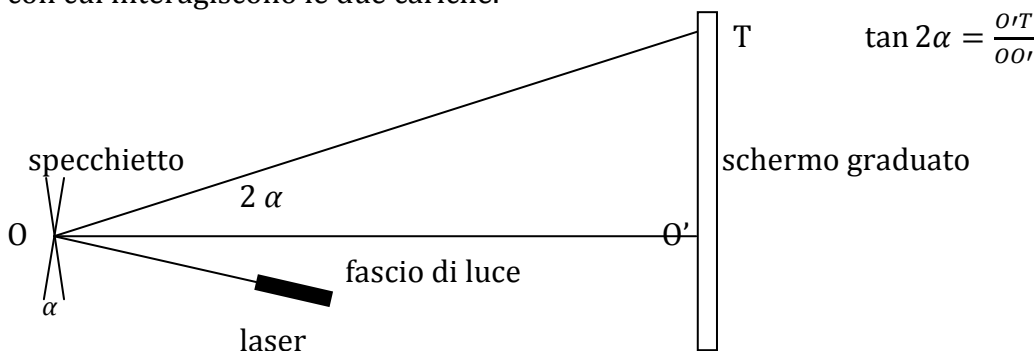


Figura 3.

Fattori che influenzano l'esperienza

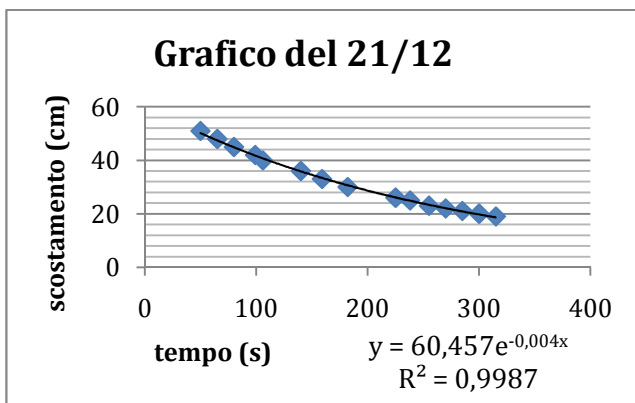
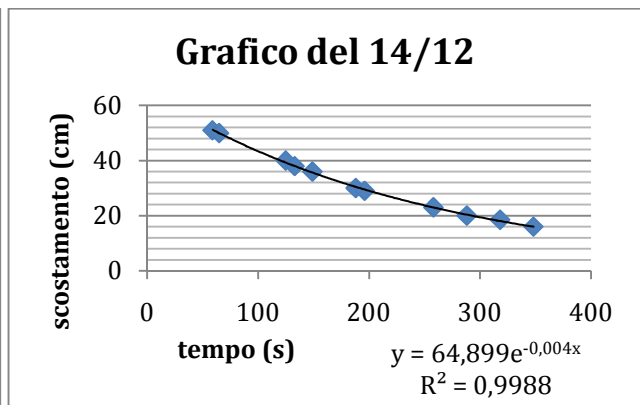
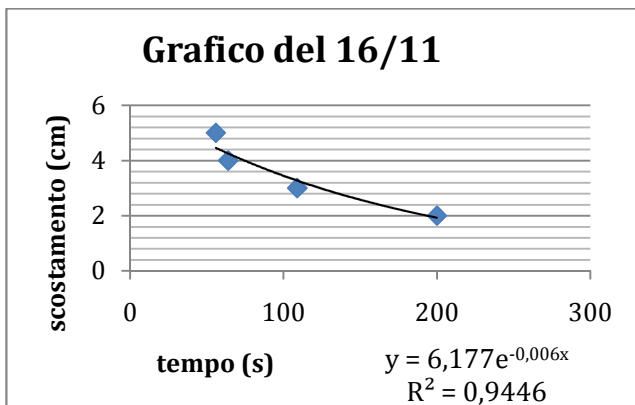
Durante la nostra esperienza molti sono stati i dettagli che abbiamo dovuto considerare, pur minimi, molti gli accorgimenti che abbiamo adottato. Con le parole del batteriologo Theobald Smith: "... è l'attenzione che poniamo alle minuzie apparentemente irrilevanti, senza attrattiva e assai fastidiose, che determina il risultato"⁵. Da neofiti dell'esperienza di laboratorio, all'inizio del nostro percorso abbiamo dovuto imparare a coordinare le nostre azioni e i nostri ruoli nel corso dell'esperimento in modo da assicurarne il corretto sviluppo e non influire sui risultati: acquisire confidenza con gli strumenti; come puntare il laser e che inclinazione dare allo specchietto per la riflessione; quale distanza porre tra la bilancia di torsione e lo schermo, ridotta a 3,50 m dopo essere stata inizialmente posta a 4 m, di modo che la luce riflessa del laser, e quindi le misure dell'angolo, fossero le più precise possibili. Inoltre abbiamo anche dovuto imparare come caricare correttamente le due sfere conduttrici: caricarle tanto da impedire una scarica veloce e ottenere quindi risultati osservabili lungo un intervallo

⁵ M. Bersanelli, M. Gargantini, *Solo lo stupore conosce*, BUR

relativamente lungo e porre quindi il contatto tra le due, per distribuire uniformemente una stessa quantità di carica elettrica dello stesso segno (repulsiva) su entrambe. La coordinazione dei nostri movimenti durante l'esperienza è divenuta fondamentale a causa della forte suscettibilità alle vibrazioni della bilancia: un passo sbagliato, un movimento brusco, persino l'autobus in strada, qualunque cosa provocasse una vibrazione aumentava notevolmente l'oscillazione del filo di torsione e della sfera mobile quindi, tanto da impedirci la raccolta di misurazioni accettabili. Essendo costantemente in oscillazione il riflesso del laser sullo schermo, era impossibile stabilire l'istante preciso e lo scostamento esatto quando la situazione (dopo il contatto) tra le due cariche a distanza prefissata (20, 15, 10 cm...) l'una dall'altra si fosse stabilizzata. Dietro il filo di torsione è situato un sistema di smorzamento, costituito da una vaschetta d'acqua in cui pesca una bandierina metallica fissata al sostegno della sfera mobile: l'oscillazione della sfera, dello specchietto e quindi del riflesso del laser sullo schermo è smorzata dalla resistenza che l'acqua esercita sullo spostamento della bandierina. Dopo che nelle prime esperienze l'oscillazione rimaneva considerevole, abbiamo aggiunto all'acqua del sale grosso, così da aumentare la densità della soluzione acqua + sale e aumentare quindi la resistenza allo spostamento della bandierina e smorzare finalmente l'oscillazione del filo di torsione. Una variabile fondamentale di cui abbiamo dovuto tenere conto è stata l'umidità. L'aria con un alto tasso di vapore acqueo (umidità relativa) è molto ionizzata, ossia contiene un numero considerevole di ioni, particelle elettricamente cariche; le particelle dell'aria, composta prevalentemente da gas stabili come azoto, ossigeno e diossido di carbonio, sono prevalentemente neutre mentre il vapore acqueo è costituito in prevalenza da ioni. Più l'aria è secca, priva cioè di umidità, più è isolante, più invece diventa umida più aumenta la sua conduzione elettrica. Un conduttore elettrizzato come le nostre sfere attira quindi nelle giornate particolarmente umide le particelle ionizzate dell'aria più vicina, respingendo gli ioni di carica opposta: si crea intorno ai conduttori un campo elettrico (effetto corona). Gli ioni di carica contraria attirati sono neutralizzati dai conduttori (le due sfere), che riducono così notevolmente la propria carica. L'umidità rappresenta quindi il principale fattore di scarica delle sfere, impedendo il corretto sviluppo dell'esperienza. Tale dato ci è stato confermato dalla stessa esperienza. Abbiamo posto a confronto i risultati ottenuti misurando il tempo di scarica, rilevato dallo scostamento del riflesso del laser sullo schermo man mano regressivo verso il punto di torsione zero del filo, delle sfere poste a una distanza fissa di 15 cm, in data 14/12, caratterizzata dal gran gelo causa correnti siberiane, in data 21/12, in cui nevicò, e in data 16/11, in cui il tasso di umidità superò il 90%.

Dati del 16/11		Dati del 14/12		Dati del 21/12	
asse x	asse y	Asse x	Asse y	Asse x	Asse y
Tempo (s)	Scostamento (cm)	Tempo (s)	Scostamento (cm)	Tempo (s)	Scostamento (cm)
56	5	59	51	50	51
64	4	65	50	65	48
109	3	125	40	80	45
200	2	133	38	99	42
		149	36	106	40
		188	30	140	36
		196	29	159	33
		258	23	182	30
		288	20	225	26
		318	18,5	238	25
		348	16	255	23
				270	22

Ponendo quindi in un sistema di assi cartesiani il tempo in secondi sull'asse delle ascisse e il valore dello scostamento del laser sullo schermo in cm sull'asse delle ordinate otteniamo dei punti interpolabili mediante una funzione esponenziale e di equazione: $y = Ae^{-kx}$.



Dove A è il valore costante della funzione moltiplicato per e (numero neperiano), e K rappresenta il fattore di scarica, un numero costante nella funzione che tiene conto dei fattori che contribuiscono alla scarica. Osservando quindi il valore di K nei giorni anticipati osserviamo come il valore sia uguale nelle giornate caratterizzate dal gelo e quindi da scarsa umidità ($K=0,004$), mentre differisca nella giornata caratterizzata da un alto tasso di umidità

($K=0,006$): ciò non può che confermare l'influenza dell'umidità nell'esperienza, in particolare nel processo di scarica. Più alta è l'umidità dell'ambiente circostante, più è veloce il processo. Per contrastare l'umidità della stanza in cui l'esperienza era condotta abbiamo posto nelle vicinanze della bilancia una stufetta elettrica, in modo da seccare e asciugare il più possibile l'apparato sperimentale e l'aria circostante. Durante le esperienze condotte con l'ausilio della stufetta siamo riusciti a osservare un più lungo tempo di scarica.

Oltre all'umidità abbiamo considerato anche il fattore polvere: l'esperienza è stata condotta con strumentazioni inutilizzate da tempo prima del nostro arrivo. Le particelle di polvere presenti sugli strumenti di lavoro (la polvere presente nell'aria per esempio, come l'umidità, influisce notevolmente sulla velocità di scarica), nonostante accurata pulizia, non possono che avere accelerato il processo di scarica durante i primi passi della nostra esperienza; negli ultimi incontri, dopo che la bilancia di torsione le sfere e il generatore elettrostatico erano stati più volte sottoposti a pulizie, abbiamo verificato un più lungo tempo di scarica. Osservando lo scostamento notiamo che il valore dei dati raccolti il 16/11 è pari a circa 1/10 di quello delle misure del 14 e 21/12: come affermato in precedenza, la stessa esperienza ci conferma come la nostra confidenza con l'apparato strumentale e lo svolgersi dell'esperienza, in particolare del caricamento, fosse fondamentale anche per i risultati.

Altri aspetti avrebbero dovuto essere considerati oltre all'umidità, come l'effetto di induzione: a distanze ravvicinate la repulsione tra le cariche omonime genera una distribuzione non uniforme degli elettroni sulle superfici e un conseguente spostamento dei baricentri delle cariche stesse; la distanza tra questi ultimi aumenta e diminuisce la forza repulsiva.

Osservazione dati

Le seguenti tabelle mostrano i dati raccolti in laboratorio nelle giornate 14 e 21 Dicembre 2009, seguendo tale procedura: dopo aver caricato le sfere per circa 30 secondi, la sfera sul supporto a slitta viene spostata alla distanza di 20 cm dall'altra e al momento della separazione si avvia la misurazione del tempo; una volta stabilizzatasi la proiezione del laser sullo schermo, si prende nota della misura in cm dello scostamento dal punto zero in relazione ai secondi trascorsi; dopo aver registrato i dati si procede similmente ponendo la distanza tra le due sfere a 15 e a 10 cm. In alcuni casi abbiamo appuntato due valori diversi dello scostamento alla stessa distanza per osservare come esso varia nel tempo.

14 Dicembre - 1° Sessione

Misura 1.A

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	$tg2\alpha$	2α (rad)	$2\alpha^\circ$
47	23	20	0,0657	0,0656	3,7597
106	31	15	0,0886	0,0883	5,0616
182	50	10	0,1429	0,1419	8,1301

Misura 1.B

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	$tg2\alpha$	2α (rad)	$2\alpha^\circ$
65	23	20	0,0657	0,0656	3,7597
80	20	20	0,0571	0,0571	3,2705
140	29	15	0,0829	0,0826	4,7365
225	45	10	0,1286	0,1279	7,3264

Misura 1.C

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	$tg2\alpha$	2α (rad)	$2\alpha^\circ$
65	23	20	0,0657	0,0656	3,7597
99	20	20	0,0571	0,0571	3,2705
159	28	15	0,08	0,0789	4,5739
238	45	10	0,1286	0,1279	7,3264

2° Sessione

Misura 2.A

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	$tg2\alpha$	2α (rad)	$2\alpha^\circ$
65	18	20	0,0514	0,0514	2,944
125	25	15	0,0714	0,0713	4,0856
196	41	10	0,1171	0,1166	6,6813

Misura 2.B

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	$tg2\alpha$	2α (rad)	$2\alpha^\circ$
59	21	20	0,06	0,0599	3,4336
125	30	15	0,0857	0,0855	4,8991
188	51	10	0,1447	8,2905	8,2905

21 Dicembre - 3° Sessione

Misura 3.A

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	$tg2\alpha$	2α (rad)	$2\alpha^\circ$
48	16	20	0,0457	0,0457	2,6174
76	26	15	0,0743	0,0741	4,2485
122	47	10	0,1343	0,1335	7,6483

Tra le misurazioni che abbiamo effettuato abbiamo tenuto in considerazione le tre sessioni giudicate più attendibili per precisione e accuratezza nello svolgere l'esperimento (certificate dal coefficiente di correlazione, che esprime l'accordo tra la legge teorica e la legge sperimentale, molto prossimo al valore 1 – vedi grafici 14/12 e 21/12). Come descritto nelle tabelle, dalle misure dello scostamento del raggio luminoso sullo schermo graduato abbiamo ricavato le rispettive ampiezze degli angoli di torsione, come precedentemente mostrato. Nelle tabelle si può osservare come entro la terza cifra decimale la tangente e l'arco in radianti coincidano numericamente. Questo dato ci permette di assimilare l'angolo alla sua tangente e di usare quindi la misura dello scostamento per verificare che il prodotto $F \cdot d^2$ è costante.

A questo scopo è necessario includere un fattore di correzione che tenga conto della scarica delle sfere; gran parte del lavoro di Coulomb fu impiegata nel tentativo di risolvere questo problema. I grafici della scarica elettrica a distanza fissa mostrano che la velocità di scarica ha un andamento esponenziale:

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

dove Q_0 è il valore della carica all'istante iniziale, $Q(t)$ il valore della carica al passare del tempo, k è una costante.

Tenendo conto della relazione (1), la forza con cui interagiscono le due cariche varierà nel tempo secondo questa legge:

$$F(t) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \cdot \frac{Q_{A0} \cdot Q_{B0}}{d^2} \cdot e^{-2kt} = F \cdot e^{-2kt}$$

da cui si ottiene che:

$$F \cdot d^2 = F(t) \cdot e^{2kt} \cdot d^2 = K \quad (2)$$

Poiché $F(t) \propto \alpha(t)$, dove $\alpha(t)$ corrisponde all'angolo di torsione, e $\alpha(t) = \alpha_0 \cdot e^{-2kt}$, per verificare la relazione (2) possiamo verificare che:

$$d^2 \cdot \alpha_0 = K$$

(n.b. Anziché l'angolo α abbiamo considerato nella relazione l'angolo 2α . Questo non toglie valore alla verifica poiché il fattore 2 non altera la proporzionalità).

Riportiamo di seguito i valori dei prodotti $d^2 \cdot \alpha_0$ ottenuti.

1° Sessione

Misura 1.A

d (cm)	$\alpha(t)$ (cm)	α_0 (cm)	$d^2 \cdot \alpha_0$ (cm ³)
20	23	$23 \cdot e^{0,004 \cdot 47} = 27,7572$	11103
15	31	$31 \cdot e^{0,004 \cdot 106} = 47,3699$	10658
10	50	$50 \cdot e^{0,004 \cdot 182} = 103,5467$	10355

Misura 1.B

d (cm)	$\alpha(t)$ (cm)	α_0 (cm)	$d^2 \cdot \alpha_0$ (cm ³)
20	23	$23 \cdot e^{0,004 \cdot 65} = 29,8294$	11931
20	20	$20 \cdot e^{0,004 \cdot 80} = 27,5426$	11017
15	29	$29 \cdot e^{0,004 \cdot 140} = 50,7695$	11423
10	45	$45 \cdot e^{0,004 \cdot 225} = 110,6821$	11068

Misura 1.C

d (cm)	$\alpha(t)$ (cm)	α_0 (cm)	$d^2 \cdot \alpha_0$ (cm ³)
20	23	$23 \cdot e^{0,004 \cdot 65} = 29,8294$	11931
20	20	$20 \cdot e^{0,004 \cdot 99} = 29,7173$	11887
15	28	$28 \cdot e^{0,004 \cdot 159} = 52,889$	11900
10	45	$45 \cdot e^{0,004 \cdot 238} = 116,5899$	11659

2° Sessione

Misura 2.A

d (cm)	$\alpha(t)$ (cm)	α_0 (cm)	$d^2 \cdot \alpha_0$ (cm ³)
20	18	$18 \cdot e^{0,004 \cdot 65} = 23,3447$	9338
15	25	$25 \cdot e^{0,004 \cdot 125} = 41,2180$	9274
10	41	$41 \cdot e^{0,004 \cdot 196} = 89,7988$	8979

Misura 2.B

d (cm)	$\alpha(t)$ (cm)	α_0 (cm)	$d^2 \cdot \alpha_0$ (cm ³)
20	21	$21 \cdot e^{0,004 \cdot 59} = 26,5897$	10636
15	30	$30 \cdot e^{0,004 \cdot 125} = 49,4616$	11129
10	51	$51 \cdot e^{0,004 \cdot 188} = 108,1832$	10818

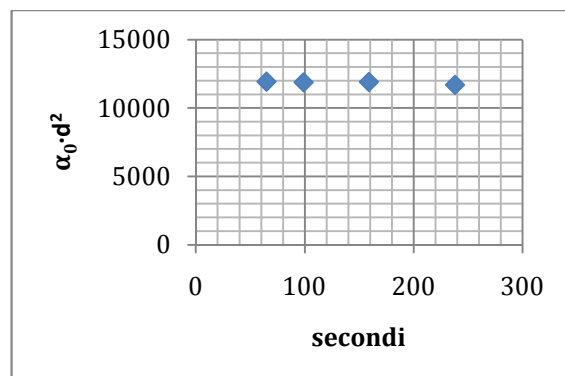
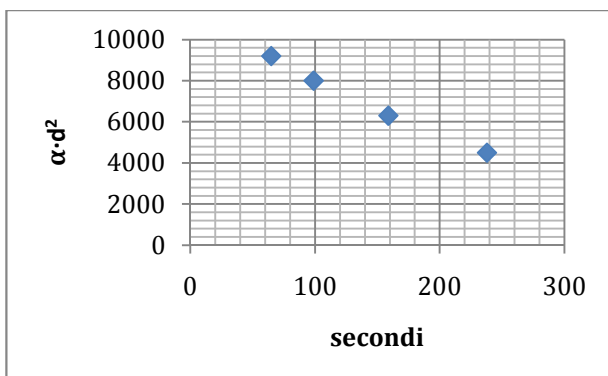
3° Sessione

Misura 3.A

d (cm)	$\alpha(t)$ (cm)	α_0 (cm)	$d^2 \cdot \alpha_0$ (cm ³)
20	16	$16 \cdot e^{0,004 \cdot 48} = 19,3867$	7755
15	26	$26 \cdot e^{0,004 \cdot 76} = 35,237$	7928
10	47	$47 \cdot e^{0,004 \cdot 122} = 76,5656$	7657

I prodotti ricavati risultano costanti con buona approssimazione e confermano la legge di Coulomb.

Di seguito sono riportati due grafici che rappresentano il valore del prodotto (ottenuto dai dati della misura 1.B) in funzione del tempo: nel primo esso non include la correzione dovuta alla perdita di carica, nel secondo ne tiene conto.



Conclusione

Grazie a questa esperienza, per la prima volta ci siamo posti di fronte alla fisica come protagonisti, non limitandoci allo studio teorico della legge ma scoprendo anche tutto ciò che vi è dietro: il tempo e lo spazio dedicati allo svolgimento di un esperimento, il dover affrontare inaspettate difficoltà e considerare i minimi dettagli, l'analisi dei dati ottenuti e la loro elaborazione, per giungere infine alla formulazione (nel nostro caso conferma) di una legge. Questo lavoro ci ha posto di fronte a una verità oscura eppure così evidente, che ogni esperienza nella sua singolarità e irripetibilità obbedisce necessariamente a delle leggi. Leggendo "il libro del mondo" attraverso queste leggi si disvela ai nostri occhi l'intimo ordine naturale delle cose.

Bibliografia:

- U. Amaldi - FISICA PER TEMI VOL.2 – Zanichelli.
- M.E. Bergamaschini, P. Marazzini, L. Mazzoni - L'INDAGINE DEL MONDO FISICO vol.E – Signorelli.
- J. L. Heilbron – ALLE ORIGINI DELLA FISICA MODERNA (il caso dell'elettricità) – Il Mulino.
- M. Bersanelli, M. Gargantini – SOLO LO STUPORE CONOSCE – BUR.

Sitografia:

- www.museonline-ponset.it