

SULLE SPALLE DEI GIGANTI

l'esperimento storico di coulomb

*a cura di Barbara Chierichetti**

L'esecuzione di una misura come «sensata esperienza», richiede spesso un'analisi delle condizioni sperimentali e dei possibili accorgimenti per operare il più possibile in condizioni controllate, e quindi comporta un contenuto teorico non indifferente: anche in un liceo classico quindi, dove magari gli studenti non sono abituati a lavorare in laboratorio, la sfida non facile di riprodurre le condizioni in cui sia possibile misurare la forza coloumbiana ha avuto il suo fascino. Di seguito si riporta la tesina presentata dagli studenti al convegno durante il quale si è svolta la premiazione del Concorso ScienzAfirenze.

Siamo stati provocati da questa affermazione: «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».[4, p.27] Da qui è nata l'idea di un lavoro sperimentale, sebbene non avessimo mai fatto esperimenti in laboratorio. In questo modo abbiamo cercato di soddisfare la nostra «curiosità», ripercorrendo le tracce di Coulomb nella verifica della legge dell'inverso del quadrato della distanza, nell'interazione tra cariche dello stesso segno. Particolare attenzione è stata rivolta all'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 dall'insegnante durante lezioni curricolari.

Lo sviluppo del percorso che è stato realizzato si può sostanzialmente dividere in tre fasi.

Prima fase: studio dell'apparato sperimentale

In questo momento iniziale è stato di fondamentale importanza il contributo del tecnico di laboratorio di fisica del liceo "G. Cremona" Domenico Diaco che, con i suoi consigli e il suo aiuto anche materiale, ha consentito la messa a punto della bilancia di torsione presente nella scuola.

* Docente di Matematica e Fisica al Liceo classico "G. Berchet" di Milano, ha guidato l'attività sperimentale qui raccontata nella classe III G nell'anno scolastico 2009-2010. Tale attività, condotta dagli studenti di M. Vittoria Busi, Giulio Gipsy Crespi, Lorenzo Gabriel Gay, Filippo Sangregorio ha conseguito il secondo premio al Concorso ScienzAfirenze 2009.

Charles Augustin de Coulomb (1736-1806)



Seconda fase: esecuzione delle misurazioni

Poiché 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 numerose prove.

Terza fase: discussione ed elaborazione dei risultati

I dati raccolti venivano via via discussi ed elaborati; spesso, al termine di una serie di misure, si metteva a fuoco quali dovevano essere le modifiche da introdurre nel metodo di misurazione per migliorarne la qualità. Infine, anche grazie alla corrente siberiana che ha investito Milano e reso l'aria secca, siamo riusciti a eseguire misure soddisfacenti.

L'esperimento di Coulomb

Charles Augustin Coulomb (1736 - 1806), un ingegnere militare francese, 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 magnétisme* tra il 1784 e 1791. Particolare importanza ha per noi la prima memoria che Coulomb pubblicò nel 1785, in cui egli afferma: «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, per esempio, un decimillesimo di grain».¹

¹ GA. Coulomb, *Prima memoria sull'elettricità e sul magnetismo*.

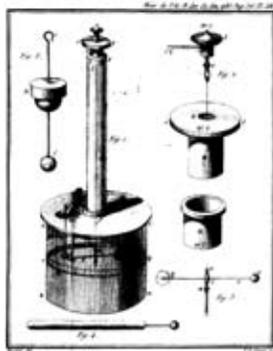
La bilancia di torsione

Coulomb, grazie ai suoi studi approfonditi sulle proprietà meccaniche delle corde, fu in grado di costruire una bilancia a torsione e utilizzò questo strumento per misurare deboli forze elettriche.

Alla base di questa bilancia c'è un cilindro di vetro; all'interno del cilindro si trova 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 un'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 mo-

Bilancia di torsione di Coulomb



mento 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, in prima approssimazione, è direttamente proporzionale ad α . L'esperimento di Coulomb prosegue con una torsione manuale del filo: ruotando la manopola, posta nella parte 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 vuole 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:

$$(\alpha+\beta) \alpha^2 = \text{costante.}$$

Le memorie di Coulomb

Coulomb, a causa delle deboli 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 attorcigliava spesso quando non era teso.

Le misure degli angoli non potevano avere una precisione superiore ai 2-3 gradi.

Infine, usando le parole dello stesso 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.»²

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».³

I risultati ottenuti da Coulomb furono subito presi in considerazione e riconosciuti come validi all'interno della Francia, in particolare dai suoi colleghi parigini. Fuori dalla Francia però l'approvazione per la legge di Coulomb tardò ad arrivare e fino all'inizio dell'Ottocento non fu nemmeno presa in considerazione. Le critiche si basavano principalmente sul fatto che la terza

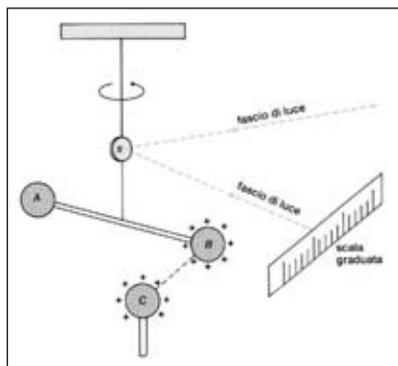
² *Ibidem.*

³ *Ibidem.*

misurazione di Coulomb si scosta dalle prime due del 7,5%, differenza non trascurabile. Solo dopo il 1800 in Inghilterra e in Germania alcuni testi 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 Paul Ludwig Simon o William Snow Harris, non erano cessati.

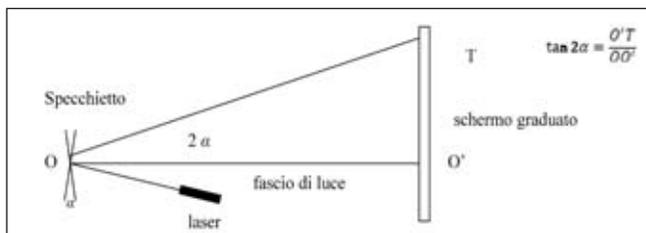
La bilancia di torsione di Schurholz

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 attaccato un sottile filo di torsione che è fissato all'altro estremo 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 una scala graduata che permette di stabilire la distanza tra le stesse. Per eseguire



gli esperimenti, si caricano entrambe le sfere grazie a un filo posto a contatto con esse e collegato al generatore elettrostatico di Van der Graaf. Una volta caricate 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.

Le nostre misure



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

Fattori che influenzano l'esperimento

Durante l'esperimento molti sono stati i dettagli che abbiamo dovuto considerare, sia pur minimi, e 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»[4, p. 105]. Da neofiti dell'attività sperimentale, 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; acquisire confidenza con gli strumenti; imparare a puntare il laser e a dare la giusta inclinazione allo specchietto per la riflessione; porre una giusta distanza tra la bilancia di torsione e lo schermo, per far sì che la luce riflessa dal laser consentisse misure dell'angolo più precise possibili. Inoltre abbiamo anche dovuto imparare come caricare correttamente le due sfere conduttrici: occorre dare una carica abbastanza grande da impedire una scarica veloce (che renderebbe troppo breve il tempo di osservazione) e porle quindi in contatto, 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 quindi della sfera mobile, tanto da impedirci la raccolta di misurazioni accettabili. Essendo costantemente in oscillazione il riflesso del laser sullo schermo, era impossibile stabilire l'istante preciso in cui la situazione si fosse stabilizzata e quindi misurare lo scostamento esatto (dopo il contatto) tra le due cariche a distanza prefissata l'una dall'altra (20, 15, 10 cm, eccetera), e questo fatto influenzava ovviamente la precisione delle misure.

Il sistema di smorzamento

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. Dato che nelle prime misure l'oscillazione rimaneva considerevole, abbiamo aggiunto all'acqua del sale grosso, così da aumentare la densità del liquido, e aumentare quindi la resistenza allo spostamento della bandierina.

Il processo di scarica: l'effetto dell'umidità

Una variabile fondamentale di cui abbiamo dovuto tenere conto è stata l'umidità. L'aria con un alto tasso di vapore acqueo è molto ionizzata; infatti

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 e 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, contenenti gli ioni di carica opposta e riduce così notevolmente la propria carica. L'umidità rappresenta quindi il principale fattore di scarica delle sfere, impedendo il corretto sviluppo dell'esperimento. Abbiamo misurato il tempo di scarica, rilevato dallo scostamento del riflesso del laser sullo

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
		256	23	182	30
		266	20	225	26
		316	18,5	236	25
		346	16	255	23
				270	22

schermo man mano regressivo verso il punto di torsione zero del filo, delle sfere poste a una distanza fissa di 15 cm, in tre date diverse e abbiamo confrontato i risultati; alla data 16/11 il tasso di umidità superava il 90%, la data 14/12 era caratterizzata dal gran gelo causato da correnti siberiane, quindi con aria molto secca, e alla data 21/12 nevicava.

Rappresentando in un sistema di assi cartesiani il valore dello scostamento del laser sullo schermo in centimetri in funzione del tempo in secondi otteniamo dei punti interpolabili mediante la funzione esponenziale $y = Ae^{-kx}$ dove A è una costante e k rappresenta il fattore di scarica, una costante che tiene conto dei fattori che contribuiscono alla scarica. Calcolando il valore di k nei giorni prima indicati osserviamo come sia sempre lo stesso 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'esperimento, 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'esperimento era condotto 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 misure eseguite con l'ausilio della stufetta siamo riusciti a ottenere un più lungo tempo di scarica.

Grafico del 16/11

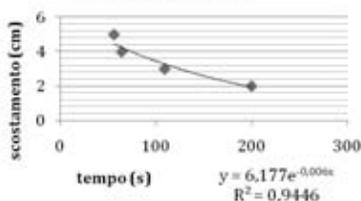


Grafico del 14/12

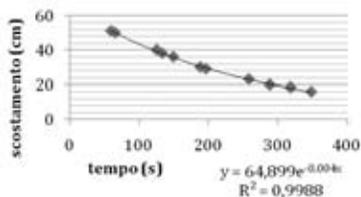
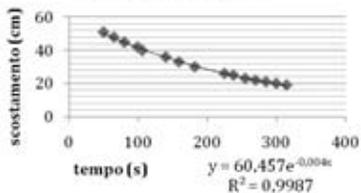


Grafico del 21/12



Il processo di scarica: l'effetto della polvere

Oltre all'umidità abbiamo considerato anche il fattore polvere: l'esperimento è stata condotto con strumentazioni inutilizzate da tempo prima del nostro arrivo. Le particelle di polvere presenti sugli strumenti di lavoro (la polvere presente nell'aria, 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 del nostro esperimento; 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 14/12 e 21/12: come affermato in precedenza, la stessa esperienza ci conferma come la nostra confidenza con l'apparato strumentale e lo svolgersi dell'esperimento, in particolare del caricamento, fosse fondamentale anche per i risultati.

Altri aspetti avrebbero dovuto essere considerati oltre all'umidità e alla polvere, 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 dei risultati

Le seguenti tabelle mostrano i dati raccolti in laboratorio nelle giornate 14/12 e 21/12, con la seguente 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 centimetri 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 cm 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: prima sessione

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	<i>tg2α</i>	<i>2α (rad)</i>	<i>2α°</i>
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.A

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	<i>tg2α</i>	<i>2α (rad)</i>	<i>2α°</i>
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.B

<i>secondi</i>	<i>spettro (cm)</i>	<i>distanza (cm)</i>	<i>tg2α</i>	<i>2α (rad)</i>	<i>2α°</i>
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

Misura 1.C

14 dicembre: seconda sessione

secondi	spettro (cm)	distanza (cm)	tg2α	2α (rad)	2α°
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

Misura2.A

secondi	spettro (cm)	distanza (cm)	tg2α	2α (rad)	2α°
59	21	20	0,06	0,0599	3,4336
125	30	15	0,0857	0,0855	4,8991
188	51	10	0,1447	0,1447	8,2905

Misura2.B

21 dicembre: terza sessione

secondi	spettro (cm)	distanza (cm)	Tg2α	2α (rad)	2α°
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

Misura3.A

Risultati

Tra le misurazioni che abbiamo effettuato abbiamo tenuto in considerazione le tre sessioni giudicate più attendibili per precisione e accuratezza nell'esecuzione dell'esperimento (certificate dal coefficiente di correlazione, che esprime l'accordo tra la legge teorica e la legge sperimentale, molto prossimo al valore 1 – si vedano i grafici del 14/12 e del 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.

Elaborazione dei risultati

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 cari-

che 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:

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

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.

prima sessione

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.A

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

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	$20 \cdot e^{0,004 \cdot 99} = 29,7173$	11887
15	28	$28 \cdot e^{0,004 \cdot 159} = 52,889$	11900

Misura 1.C

seconda sessione

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.A

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

Misura 2.B

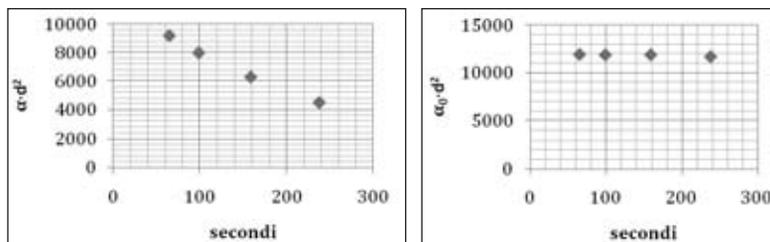
terza sessione

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

Misura 3.A

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: il primo non include la correzione dovuta alla perdita di carica, nel secondo se ne tiene conto.



Conclusioni

Grazie a questa attività sperimentale, per la prima volta ci siamo posti di fronte alla fisica come protagonisti, non limitandoci allo studio astratto 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.

L'esperienza è stata significativa perché è stata l'occasione di comprendere che quando un fenomeno si presenta in natura, a 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.

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 effetti.

Questo lavoro ci ha infine permesso di constatare che ogni fenomeno, pur nella sua irripetibilità e singolarità, obbedisce ultimamente a delle leggi.

Leggendo «il libro del mondo» attraverso queste leggi si rivela ai nostri occhi l'intimo ordine naturale delle cose. ❖

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE E SITOGRAFICHE

- [1] U. Amaldi, *Fisica per temi* VOL. 2, Zanichelli, Bologna 2008.
- [2] M.E. Bergamaschini, P. Marazzini, L. Mazzoni - *L'indagine del mondo fisico* vol. E, Signorelli, Milano 2001.
- [3] J. L. Heilbron, *Alle origini della fisica moderna (Il caso dell'elettricità)*, Il Mulino, Bologna 1984.
- [4] M. Bersanelli, M. Gargantini, *Solo lo stupore conosce*, RCS, Milano 2003.
- [5] www.museonline-ponset.it