

La misura della carica dell'elettrone: un percorso didattico

Alessandro Cordelli

Liceo Statale “Giosuè Carducci” Liceo Classico – Liceo linguistico
alessandro.cordelli@istruzione.it

Riassunto

In questo contributo viene presentato un percorso didattico sui fondamenti dell'elettromagnetismo. Prendendo le mosse da una estesa discussione in classe sul concetto di carica elettrica si giunge ad elaborare il corretto concetto di carica quantizzata. A questo punto il passo successivo è la misura della carica dell'elettrone. Il metodo qui proposto è di semplice realizzazione e permette di ottenere buoni risultati. Si tratta infatti di misurare la variazione in massa di un elettrodo in una cella elettrochimica e di confrontarla con la carica totale transitata nel circuito.

Abstract

In this paper a didactic pattern on foundations of electromagnetism is presented. Starting from a wide discussion within the class, the concept of quantized electric charge is correctly pointed out. It is then worthwhile to try a measure of the elementary charge. The experiment here proposed is easy to set up and gives a reliable value within the allowed precision. The variation in mass of an electrode in a reaction cell is compared with the total charge which has travelled through the circuit.

Introduzione

Nella didattica delle scienze sperimentali viene solitamente riservata non troppa attenzione a quei valori che, come la velocità della luce nel vuoto o la costante di gravitazione universale, misurano elementi di riferimento essenziale della realtà fisica: sembra effettivamente che ci sia molto poco da discutere e da capire sulle costanti fondamentali della natura. Sono numeri che – per quanto ne sappiamo – stanno eternamente lì, e neanche gli scienziati hanno una chiara idea del perché abbiano proprio quei valori e non altri.¹ Per uno studente si tratta quasi sempre di valori da andare a cercare nell'ultima pagina del libro quando servono per un esercizio. Alcuni insegnanti vogliono che si sappiano a memoria, altri si accontentano dell'ordine di grandezza; giusto per motivare il fatto che la forza di gravità è così debole tra oggetti che non sono corpi celesti, o che gli effetti quantistici si possono osservare solo a scala atomica e subatomica.

La proposta didattica qui presentata va controcorrente rispetto a tale linea di pensiero. Ci si è posti infatti alcune domande: può avere senso proporre a degli studenti liceali la misura di una delle costanti fondamentali della natura? Possono realmente aumentare la loro comprensione della fisica e della chimica nel misurare un valore numerico che comunque è reperibile su qualsiasi libro? E se un vantaggio può esserci, si tratta solo del superamento delle usuali difficoltà che si incontrano nell'attività di laboratorio o vi è qualcosa di più specifico?

L'esperienza è stata proposta in una quinta liceo linguistico sperimentale, ex-progetto “Brocca”. L'effettiva realizzazione dell'esperienza è stata preceduta da una estesa discussione in classe sulla natura dell'elettricità e sulla struttura della materia. Poiché – pur essendo stata realizzata all'interno del corso di fisica – si tratta essenzialmente di una esperienza di chimica riadattata (nella versione originale, assumendo come dato la carica dell'elettrone, si chiedeva di misurare la carica di uno ione), l'attività in laboratorio è stata realizzata in compresenza con l'insegnante di chimica e quello di fisica. I ragazzi sono stati suddivisi in piccoli gruppi e hanno lavorato in maniera autonoma producendo successivamente delle relazioni. Tutti quanti sono riusciti a compiere le operazioni previste in maniera sostanzialmente corretta e alcuni hanno ottenuto risultati decisamente buoni. Nel presente lavoro viene proposta anche una possibile variante all'esperimento, che nella sua versione originale prevede l'uso di una sola cella e una sola specie ionica, mediante l'utilizzo di più celle in serie, ciascuna con una specie ionica diversa dalle altre.

La discussione sulla natura della carica elettrica

Il percorso didattico che ha condotto all'esperienza sulla misura della carica dell'elettrone prende le mosse dalla discussione in classe sulla natura dell'elettricità. A differenza di altri ambiti di fenomeni, come quelli meccanici, o il suono, o la luce, gli alunni non hanno esperienza diretta dell'elettricità, se si eccettua la scossa che solitamente si prende nelle giornate fredde e secche toccando la carrozzeria dell'automobile. Tuttavia sono tutti ben consapevoli del fatto che la maggioranza delle apparecchiature tecnologiche si basa sul passaggio della corrente elettrica.

1. A tale proposito bisogna però ricordare che nel 1937 P.A.M. Dirac propose un modello cosmologico che prendeva le mosse proprio dall'osservazione di alcune apparenti coincidenze nei valori delle costanti fondamentali (Dirac, 1937).

La misura della carica dell'elettrone: un percorso didattico

Si tratta però di una forma indiretta di esperienza che non aiuta a farsi un'idea della natura del fenomeno in esame. In diversi propongono un'immagine di elettricità come di un fluido (non si può non notare la stretta analogia con le prime ipotesi sulla natura dei fenomeni elettrici formulate nel XVIII secolo). Altri ancora sfruttano reminiscenze del corso di chimica degli anni precedenti e citano la carica elettrica delle particelle elementari, ma ancora non è del tutto chiaro se si tratta di una proprietà essenziale come la massa, o accidentale (se cioè un elettrone possa perdere in tutto o in parte la propria carica elettrica rimanendo tuttavia ancora un elettrone). Inoltre, a questo livello nessuno cita la natura quantizzata della carica elettrica.

Come si vede, il profilo epistemologico² del concetto di carica elettrica che emerge dall'esperienza quotidiana e dal senso comune (bisogna infatti tenere conto del fatto che nella sperimentazione linguistica dell'ex-progetto "Brocca" lo studio della fisica si svolge solo negli ultimi due anni e quindi questi studenti non hanno finora mai affrontato uno studio sistematico dei fenomeni elettrici) è nebuloso e poco significativo.

Una prima chiarificazione si ha dopo gli esperimenti sull'elettizzazione dei corpi (per strofinio, contatto, induzione). Nella discussione che segue si cercano delle interpretazioni, un modello, in grado di giustificare i fenomeni osservati senza contraddizioni. È in questa fase di approfondimento che alcuni studenti prendono consapevolezza del fatto che la carica elettrica incontrata nel corso di chimica durante gli anni precedenti e la carica elettrica di cui si sta parlando attualmente sono in effetti la stessa cosa, malgrado la diversità dei contesti. Il principio di conservazione della carica, in particolare, viene riconosciuto proprio riflettendo sulle reazioni di dissociazione ionica (come quella del cloruro di sodio in acqua).

Appare quindi ragionevole affermare che un atomo può ionizzarsi e uno ione cambiare la propria carica ma solo acquisendo o cedendo *particelle* cariche, e non mediante trasferimento di carica elettrica senza un passaggio di materia associato (tipo fluido elettrico). La strada a questo punto è aperta per cercare di realizzare un'esperienza che conduca alla misura della carica dell'elettrone.

Prerequisiti, progettazione e analisi dell'esperienza

Sebbene questa esperienza sia assolutamente fondamentale per tutto l'elettromagnetismo, la sua realizzazione è rimandata a una fase dello svolgimento dell'unità didattica in cui sono già state introdotte le correnti, sia di natura elettronica che di natura ionica. Si tratta infatti di far circolare, utilizzando un generatore di tensione continua, una corrente elettrica all'interno di una soluzione elettrolitica e di misurare dopo un certo tempo le variazioni di massa degli elettrodi. Assumendo come noto il peso atomico e la carica degli ioni delle specie coinvolte è possibile calcolare il numero degli ioni coinvolti nel processo e quello degli elettroni scambiati. Poiché tramite la misura della corrente si può risalire alla carica totale transitata, il rapporto tra questa grandezza e il numero degli elettroni darà infine la carica del singolo elettrone.

I prerequisiti per una corretta e completa comprensione dell'esperienza e dei concetti ad essa associati, sono di tre ordini:

matematici:

- trattamento di numeri molto grandi o molto piccoli
- esponenti negativi
- utilizzo delle potenze del dieci per la notazione scientifica;

fisici:

- definizione di corrente elettrica
- utilizzo dell'amperometro
- concetto di circuito elettrico e ruolo del generatore
- i meccanismi della conduzione nei solidi e nei liquidi;

chimici:

- concetto di mole e numero di Avogadro
- peso atomico
- concetto di ione e di cariche ad esso associate
- reazioni di ionizzazione agli elettrodi di una cella elettrolitica

Passiamo adesso ad illustrare l'idea che sta alla base di questa esperienza. Si tratta di un semplice circuito in serie formato da un generatore, un amperometro e un becker contenente un sale in soluzione; due elettrodi metallici dello stesso tipo sono immersi nella soluzione e collegati al resto del circuito. Per la scelta della specie ionica su cui operare, si è discusso per scegliere la più adeguata: sono sconsigliati gli elementi del primo gruppo poiché danno origine a reazioni potenzialmente pericolose con l'acqua. Meglio scegliere elementi del secondo gruppo e in particolare quelli del

2. Il concetto di profilo epistemologico introdotto dal filosofo della scienza Gaston Bachelard (Bachelard, 1962) consiste in questo: la stessa nozione – ad esempio quella di massa – è orientata in direzioni diverse dai differenti sfondi filosofici; l'importanza relativa che il soggetto dà a questo o quell'aspetto nell'uso che fa della nozione disegna il profilo epistemologico che egli ha di essa.

gruppo IIb come lo zinco che risulta particolarmente indicato per questo genere di misura, a parte adottare alcuni accorgimenti sperimentali. Si immergono quindi due elettrodi di zinco in una soluzione di solfato di zinco (0,5 M). Al passaggio della corrente le reazioni che avvengono rispettivamente all'anodo e al catodo sono:



Avremo quindi una variazione di massa dei due elettrodi. Dal punto di vista sperimentale è opportuno misurare la diminuzione di massa dell'anodo anziché l'aumento del catodo. Infatti al catodo lo zinco non si fissa stabilmente, ma si deposita sotto forma di una sottile limatura, attaccata in maniera molto labile. Inoltre non è possibile asciugare l'elettrodo (l'operazione porterebbe via lo zinco metallico formatosi), cosa che invece è assolutamente necessaria per evitare che l'acqua residua modifichi il peso dell'elettrodo.

Al fine di ottenere un'apprezzabile variazione di massa dell'anodo è opportuno che la reazione vada avanti per tempi dell'ordine di 10-15 minuti. Con una corrente intorno all'ampere e un tempo di dieci minuti si ottiene una variazione di massa dell'ordine del decimo di grammo, facilmente misurabile almeno con una bilancia tecnica di precisione da laboratorio (sens. 0,01 g). Durante la misura la corrente non rimane costante (si hanno infatti variazioni di concentrazione e di temperatura), per tale motivo sarà necessario eseguire l'integrazione della corrente rispetto al tempo per ottenere la carica totale transitata. Poiché la variazione della corrente nel tempo è abbastanza lenta, una approssimazione più che accettabile sarà quella di leggere i valori della corrente a intervalli di un minuto e moltiplicare per l'intervallo di tempo; i valori parziali della carica così ottenuti andranno poi sommati alla fine.

Una volta che sono stati raccolti i dati, assumiamo come noto il numero di Avogadro, il peso atomico della zinco e la sua unica carica. Dividendo il peso atomico per il numero di Avogadro otteniamo la massa del singolo atomo espressa in grammi. Dividendo a sua volta la variazione di massa dell'anodo per questo valore calcoliamo il numero di atomi che hanno partecipato alla reazione. Poiché lo ione zinco è bivalente, gli elettroni coinvolti sono il doppio di tale numero. D'altra parte abbiamo anche la carica totale transitata, che viene divisa per il numero di elettroni ottenendo così la carica di un singolo elettrone.

L'esperienza: realizzazione e risultati

L'apparato sperimentale è quello mostrato in figura 1. Si tratta di un circuito in cui la cella di reazione contenente una soluzione 0,5 M di solfato di zinco è posta in serie a un generatore di corrente e un amperometro.

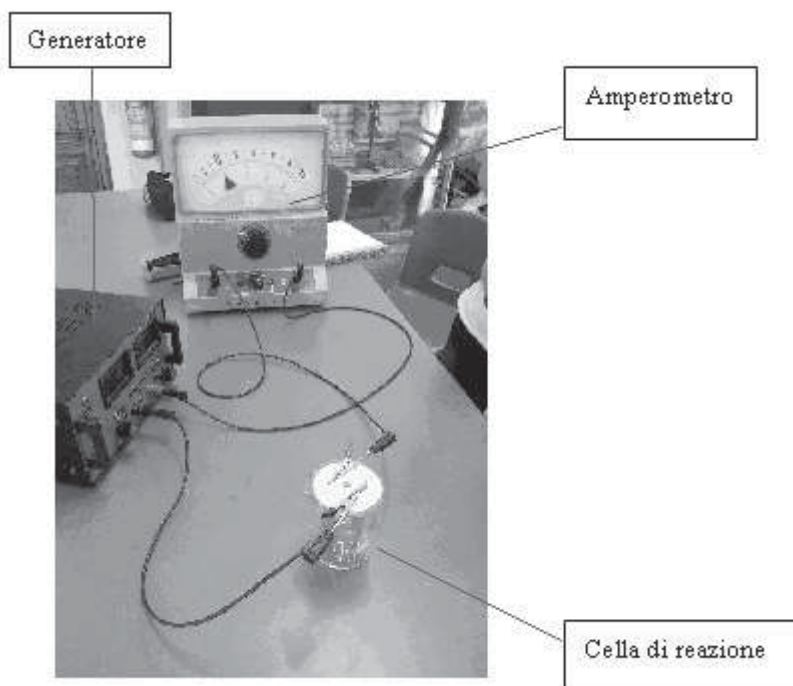


Figura 1: L'apparato sperimentale per la misura della carica dell'elettrone

La misura della carica dell'elettrone: un percorso didattico

Il primo problema che gli studenti hanno dovuto affrontare è stato la preparazione della soluzione. Poiché si trattava di produrre mezzo litro di soluzione occorrevano 0,25 moli di solfato di zinco (peso atomico 161,45), che si ottengono sciogliendo nell'acqua distillata $161,45 : 4 = 40,36$ grammi di solfato di zinco. Successivamente – dopo averle contrassegnate con un pennarello scrivendovi sopra rispettivamente “+” e “-” per evitare confusione (figura 2) – si pesano le due lamine di zinco che costituiranno gli elettrodi (di fatto occorre pesare soltanto l'anodo, ma per completezza gli studenti hanno riportato nelle loro relazioni anche la massa del catodo). A tal fine si è usata una bilancia di precisione elettronica sensibile al milligrammo. Il becker viene quindi riempito per circa 2/3 con la soluzione di solfato di zinco e i due elettrodi sono inseriti mediante un tappo di legno con fori di forma e dimensioni opportune, appositamente preparato (figura 3). A questo punto si collegano il generatore e l'amperometro mediante i cavi e tutto è pronto per iniziare la misura.

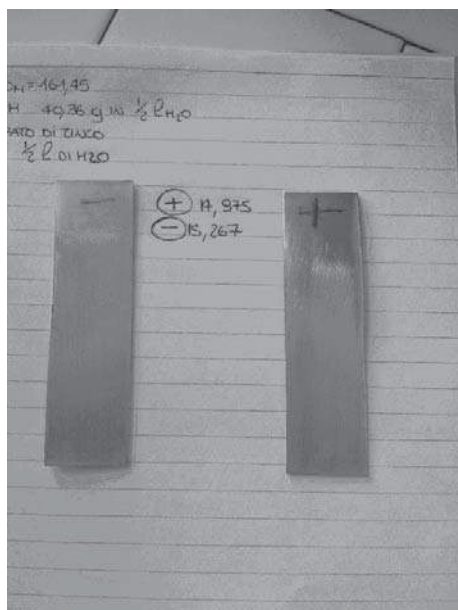


Figura 2: Gli elettrodi di zinco.



Figura 3: Il supporto per gli elettrodi.

Per avere valori opportuni della variazione di massa occorre utilizzare una corrente dell'ordine dell'ampere per un intervallo di tempo di 10-15 minuti. Poiché nel corso della misura il valore della corrente non si mantiene costante (in particolare si nota una sistematica tendenza all'aumento), per il calcolo della carica è opportuno suddividere l'intero tempo di misura in intervalli parziali. Prendendo intervalli di un minuto (misurati con un comune orologio preciso al secondo), si moltiplicherà il valore della corrente all'inizio di ognuno di essi per 60 secondi, sommando poi i risultati parziali così trovati. Questa operazione corrisponde all'integrazione approssimata della corrente rispetto al tempo. Passiamo quindi alla presentazione dei risultati ottenuti da uno dei gruppi. Il peso iniziale della lamina di zinco all'anodo era pari a: 15,349 grammi. I valori della corrente misurati ogni minuto per 10 minuti sono stati:

1,4 A; 1,5 A; 1,5 A; 1,6 A; 1,6 A; 1,6 A; 1,7 A; 1,7 A; 1,8 A; 1,8 A

Il valore della carica ottenuto moltiplicando ciascuno di tali valori per 60 secondi e poi sommando è di $9,7 \cdot 10^2 C$. Una volta terminata la misura si torna a pesare l'anodo (dopo averlo accuratamente asciugato prima con della carta e poi con un phon) ottenendo adesso il valore 15,025 grammi. La variazione di massa dell'anodo tra prima e dopo la misura è pertanto di 0,324 grammi.

Per calcolare la massa in grammi di un atomo di zinco dividiamo il peso atomico dell'elemento (che è 65,40) per il numero di Avogadro, ottenendo $1,086 \cdot 10^{-22}$ grammi. In 0,324 grammi di zinco (la differenza tra la massa iniziale e quella finale dell'anodo) ci sono quindi $0,324 / 1,086 \cdot 10^{-22} = 2,97 \cdot 10^{21}$ atomi. Ora, ricordando che lo ione zinco è bivalente, il numero di elettroni coinvolti nel processo è il doppio di quello degli atomi di zinco: $2,97 \cdot 10^{21} \times 2 = 5,94 \cdot 10^{21}$ elettroni. Per avere infine la carica dell'elettrone basterà dividere la carica totale transitata nel circuito per il numero di elettroni coinvolti: $q_e = 9,7 \cdot 10^2 / 5,94 \cdot 10^{21} = 1,6 \cdot 10^{-19} C$. Il risultato è in ottimo accordo con il valore presente in letteratura entro le cifre significative permesse dalla precisione degli strumenti di misura utilizzati.

Una versione migliorata della stessa esperienza

Quella descritta nei paragrafi precedenti è una realizzazione dell'esperienza per la misura della carica dell'elettrone semplice e facilmente comprensibile per tutti gli alunni, nella quale sono presenti tutti i nodi concettuali, senza però che

siano introdotte particolari finzze tecniche. Tuttavia il processo può essere raffinato e migliorato. In questo senso, una ulteriore riflessione sull'argomento ci ha portato a provare alcuni significativi cambiamenti per aumentare l'affidabilità delle misure. Nella nuova situazione sperimentale la precisione del risultato aumenta dalle due cifre significative della versione "di base" a tre.³ Questa versione dell'esperimento non è stata ancora proposta alle classi.

Le differenze introdotte nella nuova versione dell'esperimento sono state:

1. l'utilizzo di più celle poste in serie, ciascuna con elettrodi di un metallo diverso immersi in soluzioni di ioni dello stesso metallo;
2. la misura indiretta della corrente attraverso la caduta di tensione ai capi di una resistenza nota;
3. la registrazione dei valori della corrente tramite un sistema automatico di acquisizione dati interfacciato col computer;
4. il calcolo della carica elettrica mediante integrazione della corrente rispetto al tempo eseguita da un opportuno software di trattamento dati.

Nella figura 4 sono mostrate le quattro celle collegate in serie prima di essere riempite dalle varie soluzioni. Gli elettrodi sono rispettivamente di: zinco, rame, piombo e ferro. Le soluzioni sono tutte 0,5 M dei solfati dei vari metalli costituenti gli elettrodi. Gli ioni che partecipano alle varie reazioni sono tutti bivalenti.

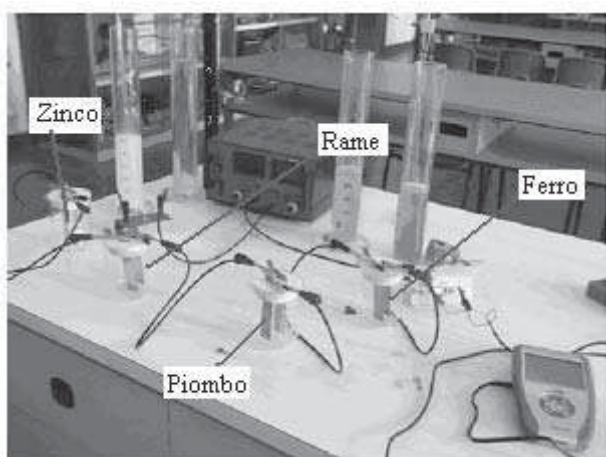


Figura 4: Le quattro celle della versione migliorata dell'esperienza.



Figura 5: La resistenza 1,00 Ω , la sonda per la misura della caduta di tensione e l'interfaccia LabQuest[®] responsabile del campionamento e della digitalizzazione del segnale.

Per la misura della corrente non viene utilizzato un amperometro, ma in serie alle quattro celle è posta una resistenza da 1,00 Ω ai capi della quale è misurata la differenza di potenziale. Poiché $\Delta V = I \cdot R$ il valore numerico della caduta di tensione misurato in Volt coincide con quello della corrente espresso in ampere. La resistenza utilizzata è di tipo ceramico con una potenza massima di 7 W e una tolleranza del 5%, mentre la sonda per la misura della tensione ha una precisione di ± 4 mV e un fondo scala di 10 V.

Uno degli aspetti più interessanti di questo montaggio sperimentale è l'utilizzo di un sistema automatico di acquisizione dati. Ai capi della resistenza da 1,00 Ω è collegata una sonda di tensione che trasferisce il segnale analogico ad una interfaccia LabQuest[®] responsabile del campionamento e della digitalizzazione. Nella figura 5 sono mostrate la resistenza, la sonda e l'interfaccia. Una volta campionato e digitalizzato il segnale viene inviato a un PC (tramite porta USB) dove viene acquisito e processato dal software LoggerPro[®] 3, un programma per la visualizzazione e il trattamento dei dati. La figura 6 mostra la schermata di LoggerPro[®] 3, con l'andamento della corrente su un intervallo di 1000 secondi.

Tra i vari strumenti di calcolo disponibili nel programma LoggerPro[®] 3 c'è anche una utility per l'integrazione delle funzioni. Dopo aver selezionato l'intervallo di integrazione (in questo caso l'intero tempo di misura) e applicato l'apposita procedura, il valore dell'integrale che dà la carica elettrica totale viene visualizzato su video e la rappresentazione del grafico cambia come mostrato in figura 7.

Una volta che la misura è terminata, si procede come nella versione "base" dell'esperienza, misurando la variazione di massa degli elettrodi e applicando lo stesso algoritmo per il calcolo di q_e .

Il fatto di avere quattro celle contemporaneamente consente di ripetere lo stesso calcolo su ognuna di esse migliorando la statistica dei risultati. Nelle prime prove che abbiamo eseguito si è osservato l'indizio un leggero effetto sistematico

3. Il merito delle miglorie introdotte va ascritto interamente al tecnico di laboratorio della nostra scuola, sig. Fausto Canesi.

La misura della carica dell'elettrone: un percorso didattico

(lieve diminuzione del valore calcolato di q_e andando dallo zinco al ferro) che al momento non è ancora ben compreso. Il valore finale ottenuto per la carica dell'elettrone è stato infatti di $1,58 \cdot 10^{-19}$ C.

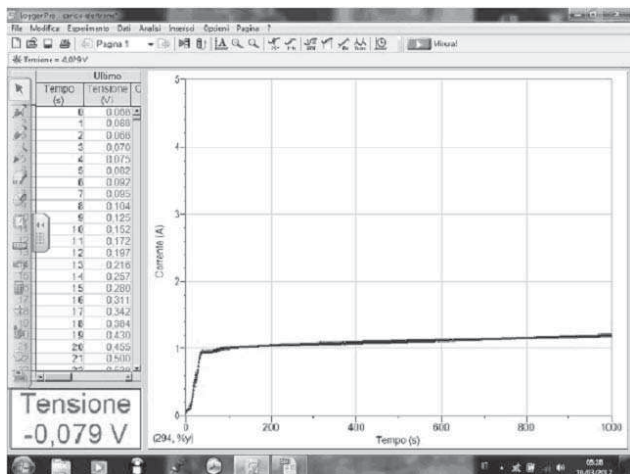


Figura 6: La schermata del programma LoggerPro® 3 con l'andamento della corrente su un intervallo di 1000 secondi.

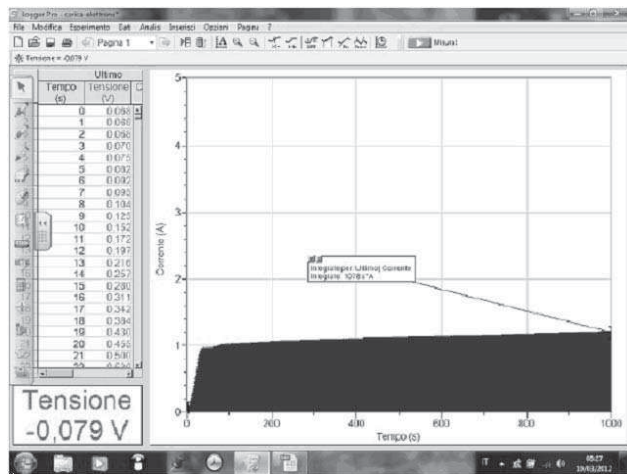


Figura 7: Output a video del programma LoggerPro® 3 dopo l'integrazione della corrente rispetto al tempo

Considerazioni conclusive

Nelle discussioni in classe seguite all'esperienza sulla misura della carica dell'elettrone si sono potuti osservare diversi spunti interessanti e ricadute positive. L'aspetto probabilmente più significativo dal punto di vista dell'acquisizione di consapevolezza sui metodi e i problemi della scienza è il fatto di aver portato in qualche modo l'indagine a un livello fondamentale della struttura della materia. Di elettrone si parla infatti molto, sia nei testi di fisica che in quelli di chimica, ma quali idee e rappresentazioni vengono richiamate alla mente di uno studente dalla parola "elettrone"? La grafica fuorviante di molti manuali suggerisce un concetto classico, come di una pallina che gira vorticosamente intorno a una pallina più grande (il nucleo) e ogni tanto salta da un atomo all'altro. Per un oggetto siffatto è verosimile aspettarsi che esistano esperimenti in grado di accedere completamente ad esso. Invece gli alunni non si trovano di fronte a niente del genere, ma **a un processo di misura indiretto, nel quale non vi sono palline che saltano ma fenomeni macroscopici (soluzioni saline, passaggio di corrente) che solo la teoria mette in relazione con l'oggetto ultimo dell'indagine.** Nei più attenti e consapevoli questo fatto può causare sorpresa se non addirittura disorientamento, ma si tratta di un disagio salutare – ed è compito dell'insegnante provocare tutta la classe su questo punto – che costituisce un valido elemento per acquisire quel cambio di paradigma richiesto dalla meccanica quantistica. In altri termini, è in esperienze come questa che lo studente tocca con mano due aspetti fondamentali del mondo microscopico: non è mai possibile accedere all'oggetto "tutto insieme" ma solo ad alcuni parametri volta per volta implicati dalla particolare situazione sperimentale (come richiede il principio di complementarità); l'accesso all' "oggetto" avviene sempre in maniera indiretta mediante lo strumento di misura e quindi attraverso grandezze macroscopiche⁴.

Ringraziamenti

La sperimentazione didattica descritta in queste pagine è stata realizzata nell'ambito del progetto "Laboratori del Sapere Scientifico" (LSS) della Regione Toscana. Il processo di formazione degli insegnanti di chimica e di fisica della nostra scuola – sostenuto e incoraggiato dal dirigente scolastico prof. Mario Cristiano Regali – è stato seguito da vicino dal prof. Fabio Olmi che ha fornito importanti stimoli, spunti di riflessione e le modalità di effettuazione dell'esperienza di misura della carica portata da singoli ioni. Tutta la parte sperimentale non sarebbe stata possibile senza l'opera del tecnico di laboratorio, sig. Fausto Canesi. Infine, un particolare ringraziamento va agli alunni della 5EL a.s. 2011/2012, che hanno affrontato la sfida della misura della carica dell'elettrone con serietà e impegno e ai quali è idealmente dedicato questo articolo.

Bibliografia

- G. Bachelard, *La philosophie du non. Essai d'une philosophie du nouvel esprit scientifique*, Presses Universitaires de France, Paris 1962.
P.A.M. Dirac, The Cosmological Constants, *Nature*, 1937, **139**, 323.
L. D. Landau, E. M. Lifšits, *Meccanica quantistica. Teoria non relativistica*, Editori Riuniti, Roma 1982.

4. Una accurata e chiara discussione sul ruolo dello strumento di misura e sulla relazione tra la fisica classica (che governa lo strumento) e la meccanica quantistica (che governa il sistema misurato) la si può trovare nel primo capitolo dell'ormai classica opera di Landau e Lifšits sull'argomento (Landau, Lifšits 1982).