



Guido Pegna

Dipartimento di Fisica,
Università di Cagliari
pegna@unica.it

Alcuni strumenti utili per esperimenti interessanti

ABSTRACT

Some simple, low cost and useful apparatuses are described which are easy to made, even as homework by students. Their usefulness will be found in a number of experiments which normally require expensive and not commonly available instruments in the school laboratory.

Introduzione

Descriviamo alcuni apparecchi che possono essere costruiti anche in casa, anche da studenti, di costo molto modesto e utili in molti esperimenti che richiederebbero normalmente la disponibilità di ben più costosi strumenti.

1. Il generatore elettrostatico

È la più semplice macchina elettrostatica [1]. Al terminale ad alta tensione di un accendisigari piezoelettrico si fissa una sfera di plastica per albero di Natale. Queste sfere sono metallizzate, quindi conduttrici. La tensione generata è intorno a 15.000 V.

Figura 1. L'utilissima macchina elettrostatica elementare. Come si vede nella figura, il tubetto metallico è stato accorciato. Un sottile filo di rame collega la punta del terminale interno ad alta tensione alla parte esterna della sfera.



In tutti gli accendisigari che abbiamo trasformato in questo modo, premendo il tasto la sfera si carica positivamente. Se invece si preme il tasto, e tenendolo premuto si tocca per un istante la sfera (per non accusare la fastidiosa piccola scarica ad alta tensione si può toccare la sfera con la nocca di un dito), e quindi si rilascia il tasto, la sfera si carica negativamente.

2. Un buon elettroscopio

2.1. La costruzione

Gli elettroscopi sono fra gli apparecchi noti da più tempo. Gli elettroscopi con i quali Alessandro Volta realizzò i suoi fantastici esperimenti avevano come “equipaggio mobile” due pagliuzze. La loro utilità continua ancora ai nostri giorni. Un buon elettroscopio che sia molto sensibile e che non si scarichi in pochi secondi è tuttora insostituibile in moltissime esperienze dimostrative di elettrostatica, oltre che in alcuni esperimenti di fisica moderna di grande eleganza. La descrizione di come costruire un buon elettroscopio è lo scopo del presente paragrafo. Uno di questi apparecchi è illustrato nella Figura 2.

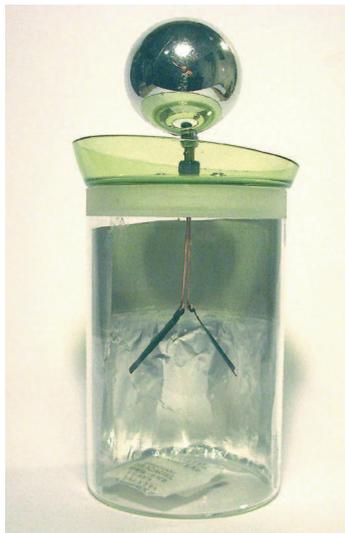


Figura 2. L'elettroscopio a foglie perfezionato.

- Scelta del vaso. Il vaso deve essere di vetro, non di plastica perché questa si elettrizza internamente e attira le foglioline. Deve essere abbastanza grande per poter usare foglioline non troppo corte senza che queste, quando si divaricano, tocchino le pareti del vaso. Il coperchio deve essere a buona chiusura per preservare l'ambiente interno dall'umidità dell'aria esterna. Vasi particolarmente adatti sono quelli a sezione ellittica in cui viene venduta la "Nutella" in confezioni da $\frac{1}{2}$ kg. All'interno del vaso occorre fissare con un adesivo un foglio di alluminio da cucina che lasci ancora visibile il settore frontale perché anche il vetro si elettrizza, anche se non mantiene a lungo le cariche.
- Quando la costruzione dell'elettroscopio sarà finita, prima di chiuderlo definitivamente occorrerà mettere sul fondo del vaso una bustina di gel di silice per mantenere l'aria interna ben secca.
- La cosa più importante è l'isolamento del supporto delle foglioline. L'isolamento deve essere di *teflon* [2]. Occorre una rondella di *teflon* del diametro di circa 4 cm da fissare con due viti all'interno del tappo di plastica del vaso nel quale si sarà fatto un foro di diametro adatto, come in Figura 3. Prima di montarla è importante pulirla con alcool isopropilico, o in sua assenza, con acqua e sapone, poi asciugarla e non toccarla più con le mani. La rondella può essere tagliata dalla lastra di *teflon* per mezzo di una sega a tazza del diametro giusto [3].
- In un foro da 8 mm al centro della rondella si monta una boccola per banane che costituisce il terminale di ingresso dello strumento. Questa boccola servirà per inserire gli accessori dai quali trasferire la carica (sfera conduttrice, pozzo di Faraday, collegamenti ad altri dispositivi come condensatori ecc.) muniti di spinotti tipo "banana".
- I supporti per le foglioline sono fatti con un filo di rame nudo da 0,5 mm di diametro e piegato in due al centro in modo tale che i due estremi, piegati come si vede nella Figura 4, arrivino con la loro parte inferiore circa a metà dell'altezza del vaso. L'estremità superiore di questo filo va saldata alla boccola di cui al punto precedente. In alternativa, se si vogliono evitare saldature,

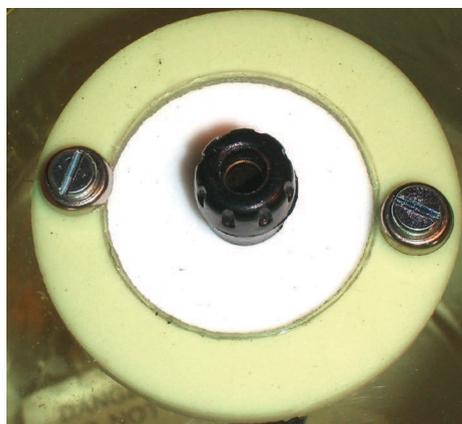


Figura 3. La rondella di *teflon* sul coperchio in plastica dell'elettroscopio con al centro la boccola a cui sono fissati i fili di sostegno delle foglioline.



Figura 4. I fili di sostegno delle foglioline.



Figura 5. Dettaglio della sospensione delle foglioline. La parte superiore è ripiegata ad anello attorno ad un grosso ago e il lembo incollato. Ogni fogliolina ruota con minimo attrito attorno al supporto di filo di rame ripiegato verso l'alto in modo che esse non sfuggano.

l'estremità superiore, piegata ad anello come in Figura 4, viene inserita attorno al gambo filettato della boccola e serrata con il dado di cui le boccole sono munite, eventualmente con l'inserzione di una rondella metallica.

- Le foglioline sono fatte con la carta delle cartine per sigarette del tipo ultrasottile. Da due delle cartine si taglia una striscia larga 10 mm. Queste strisce, appoggiate su un foglio di carta, devono essere "verniciate" con inchiostro di china [4] con un pennellino morbido. Si lasciano asciugare un po', poi si coprono con un altro foglio e si sovrappone ad esse un peso di qualche chilo, per esempio una pila di libri, per spianarle bene.
- Ora bisogna far prendere la forma "ad anello" ad uno degli estremi di ambedue le foglioline avvolgendole attorno ad un grosso ago o ad un cacciavite sottile.
- Si montano le foglioline sui fili di rame ai quali devono venire incernierate per ottenere ciò che si vede nella Figura 5. Il lembo ripiegato deve essere fissato con una microscopica goccia di colla applicata, per esempio, con la punta di un ago. La distanza fra i fili deve essere regolata in modo che le parti ripiegate ad anello delle foglioline non sfreghino l'una sull'altra nel loro movimento rotatorio. Questo modo di incernierare le foglioline assicura che la forza di repulsione elettrostatica che le fa divaricare non debba vincere la loro resistenza alla flessione, come accadrebbe se esse fossero semplicemente incollate ad un supporto.
- Dopo averle montate sui supporti di filo di rame, le foglioline devono essere tagliate ad una lunghezza tale che quando si divaricano al massimo non vadano a toccare le pareti del vaso. La costruzione è così terminata.

2.2 Applicazioni

Un elettroscopio ideale dovrebbe mantenere la carica indefinitamente. Le cause della scarica sono: conducibilità dell'isolante, conducibilità dell'aria, raggi cosmici.

Il nostro elettroscopio è vicino all'elettroscopio ideale. Esso mantiene la carica per delle mezze ore. Data la leggerezza delle foglioline di carta ultrasottile ed al modo in cui esse sono sospese esso è anche molto sensibile. Mentre negli elettroscopi a foglie d'oro queste tendono a staccarsi e a rompersi, quello descritto è robusto, può sopportare urti e spedizioni anche se probabilmente è leggermente meno sensibile di quelli a foglie d'oro.

Oltre alla sua insostituibile presenza in tutti gli esperimenti dimostrativi di elettrostatica, con questo elettroscopio sono facilmente riproducibili alcuni degli esperimenti più belli che si possono realizzare con mezzi così semplici: in particolare la rivelazione dell'effetto fotoelettrico, la rivelazione di radiazioni e di raggi cosmici in connessione con una camera di ionizzazione, l'elettroscopio condensatore di Volta per la rivelazione di tensioni piuttosto piccole.

3. Elettroscopio elettronico ultrasensibile con due soli componenti

I due componenti sono: un transistor a effetto di campo [5] e un diodo LED [6]. L'alimentazione è con una pila da 9 V. L'elemento sensibile al campo elettrico è il terminale di *gate* del transistor, l'"antenna" di Figura 6.

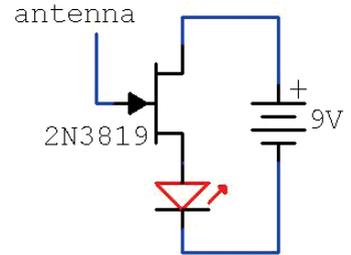
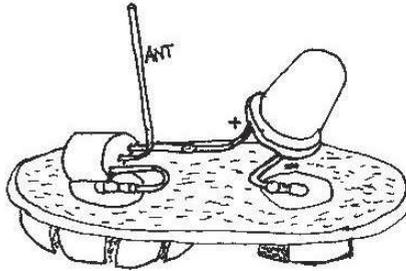
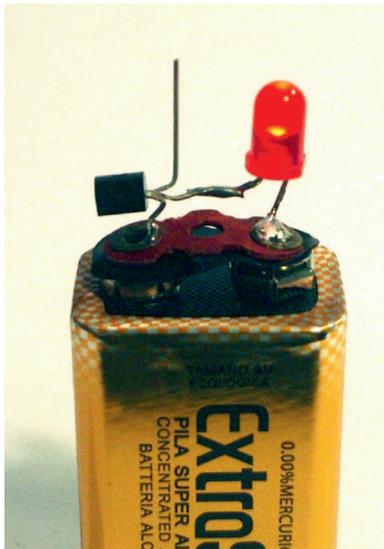


Figura 6. A sinistra attacco per pila da 9V sul quale sono saldati un transistor FET e un diodo LED. A destra lo schema del circuito.

Figura 7. Il più semplice e più sensibile elettroscopio. Il diodo LED è acceso perché l'antennina è stata caricata con qualche μC e conserva la carica quasi indefinitamente.



La capacità di ingresso di questo terminale è di 8 pF, mentre la tensione massima di interdizione fra *gate* e *source* del transistor 2N3819 usato nel prototipo è di 8V. Ciò significa che la carica depositata sul *gate* a cui il transistor reagisce accendendo e spegnendo il LED è al massimo di 64 pC. Se sull'antenna si deposita, per esempio per induzione, una carica di qualche diecina di pC, il circuito reagirà a variazioni della carica di pochi pC.

Con questo semplice dispositivo si possono mostrare gli effetti a notevole distanza (alcuni metri) del campo elettrico generato dall'accendigas piezoelettrico o di un tubo di PVC strofinato, avvicinandoli anche di poco o allontanandoli.

In Figura 7 si vede il "nanoelettroscopio" elettronico dal vero.

4. Elettrometro ad ago oscillante [7]

È un elettroscopio a campo ausiliario con una sola fogliolina. Ad un elettrodo fisso posto ad una piccola distanza dalla fogliolina viene applicata una tensione (campo ausiliario) di 200 o 300 V di un certo segno. Se alla fogliolina arrivano cariche di segno opposto, essa viene attratta dall'elettrodo ausiliario fino a toccarlo, le cariche accumulate sulla fogliolina si trasferiscono al generatore del campo ausiliario, la fogliolina si scarica e si allontana di nuovo dall'elettrodo. Se nuove cariche arrivano alla fogliolina, il processo si ripete, e il numero di oscillazioni al secondo è una misura delle cariche trasportate dalla fogliolina (e da ciò che ad essa è connesso) all'elettrodo ausiliario e in definitiva perdute dentro il (o fornite dal) generatore del campo ausiliario. Una fotografia di questo elettrometro è riportata nella Figura 8.

Figura 8. Elettrometro ad ago oscillante, costruito in un barattolo per marmellata.

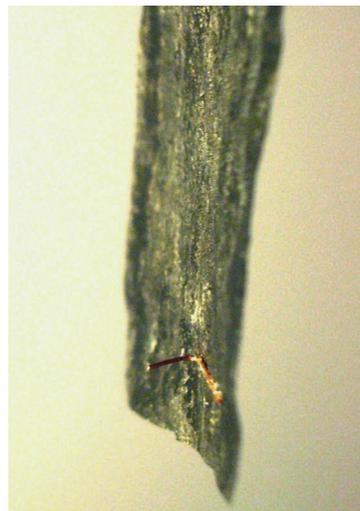


Figura 9. Molto ingrandita, la parte inferiore della fogliolina con la punta.

La fogliolina è uguale a quelle già descritte per l'elettroscopio a foglie, e sospesa nello stesso modo. Per installare l'elettrodo ausiliario una delle possibilità è forare lateralmente il barattolo di vetro. Per questa operazione vedi nota [8]. Il campo ausiliario viene applicato con l'alimentatore descritto successivamente nel paragrafo 6.

Poiché alle volte la fogliolina tende a restare aderente all'elettrodo ausiliario, la soluzione consiste nell'incollare nella parte bassa della fogliolina un sottilissimo filo di rame ricavato da un conduttore per impianti elettrici e nel farne sporgere una puntina di meno di 1 mm verso l'elettrodo ausiliario come si vede in basso nella Figura 9, in modo che quando la fogliolina si avvicina ad esso la prima cosa che vada a contatto sia quella puntina di filo di rame.

Questo fantastico semplicissimo strumento può misurare correnti di frazioni di nanoampere, come alcuni sofisticati strumenti elettronici attuali. Infatti: la capacità della fogliolina e del suo sostegno metallico può essere intorno ad 1 pF. Da misure effettuate, è risultato che la fogliolina viene attratta dall'elettrodo ausiliario se fra i due si applica una d.d.p. di 200 V. Poniamo che la fogliolina faccia una oscillazione al secondo. La carica trasportata ad ogni oscillazione è quindi:

$$Q = C V = 10^{-12} \text{ F} \cdot 0,2 \cdot 10^3 \text{ V} = 0,2 \cdot 10^{-9} \text{ C},$$

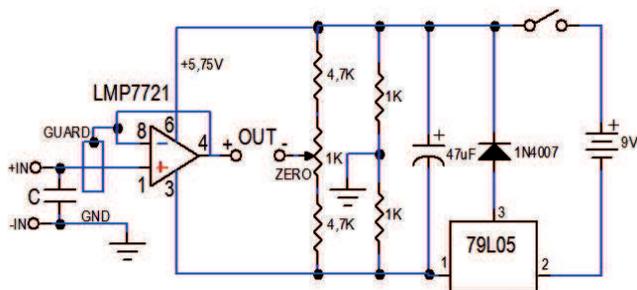
e quindi una corrente di 200 pA.

5. Costruzione di un elettrometro avanzato

Per alcuni esperimenti di precisione occorre un buon elettrometro, cioè uno strumento con resistenza di ingresso che tende all'infinito e capace di misure quantitative. Trent'anni fa un elettrometro era uno strumento costoso e delicato. Oggi con precauzioni e attenzioni accettabili, grazie alla disponibilità di nuovi materiali e di circuiti integrati molto sofisticati, uno strumento dalle caratteristiche uguali o superiori può essere costruito da chiunque. Questo ne è un esempio. Lo schema elettrico è in Figura 10.

Lo strumento si basa su due elementi costruttivi fondamentali: il primo è il circuito integrato LMP7721, facilmente reperibile, che a detta della *National* ha la minima corrente di polarizzazione dell'ingresso di tutta l'industria dei semiconduttori (anno 2015): valori tipici 3 fA a 25°C. Questo dato significa, in altri

Figura 10. I valori dei resistori sono in ohm. Per il condensatore C vedi il testo.



termini, una resistenza di ingresso superiore a 10^{14} ohm. Il secondo elemento è l'uso del *teflon* [2] come isolatore del terminale di ingresso e del condensatore C. Questo è costruito interponendo a pressione fra due lamine metalliche di 1×2 cm un foglio di *teflon* da $37 \mu\text{m}$ di spessore. La capacità risultante è esattamente 100 pF. Tutto è stretto fra due blocchetti di *teflon* di $1,5 \times 2$ cm per mezzo di un avvolgimento stretto di nastro di *teflon* da idraulici. Naturalmente per il montaggio del circuito integrato, per motivi di isolamento sono da escludere i circuiti stampati. Esso è sospeso in aria attraverso sottili singoli fili di rame ricavati da una trecciola come si vede nelle fotografie della Figura 11. La boccia a morsetto dell'ingresso è quindi isolata dalla massa della scatola metallica con un pezzo quadrato di lastra *teflon* dello spessore di 4 mm. Per la pulizia delle parti in *teflon*, che è molto importante, vedi il paragrafo 2.1.

All'uscita dello strumento si collega un normale tester. La tensione indicata è esattamente la tensione applicata all'ingresso e a cui si è caricato il condensatore C. Il suo valore non deve superare $\pm 2,85$ V. Per la misura di tensioni superiori si deve ricorrere alle tecniche standard delle misure elettrometriche. Scollegando la sorgente dall'ingresso, l'uscita si mantiene per un tempo praticamente infinito al valore indicato. Da una prova effettuata, collegando all'ingresso una pila da 1,5 V con una resistenza da 10.000 Mohm in serie (delicattissima, da non toccare mai con le dita), la tensione indicata all'uscita, letta su un tester digitale con la risoluzione di 1 mV, non differiva dal valore letto senza la resistenza in serie. Il costo totale dello strumento è di circa 25 euro.

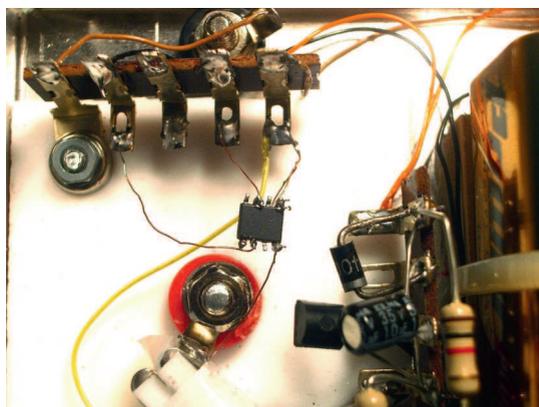


Figura 11. A sinistra tutto l'interno della scatoletta di alluminio, dove si vede il quadrato di *teflon* con al centro il dado di fissaggio della boccia di ingresso, la pila da 9 V e sulla sinistra il condensatore C saldato al terminale della boccia di ingresso. A destra una immagine un po' ingrandita dove si vede meglio il microscopico circuito integrato sostenuto in aria dai sottili fili di rame.

6. Alimentatore per le tensioni ausiliarie

È particolarmente importante che questo alimentatore per piccolissime correnti sia isolato galvanicamente dalla rete poiché in alcuni esperimenti occorre collegare alla terra (non alla massa!) uno dei suoi poli. Poiché è difficile reperire piccoli trasformatori di isolamento, o

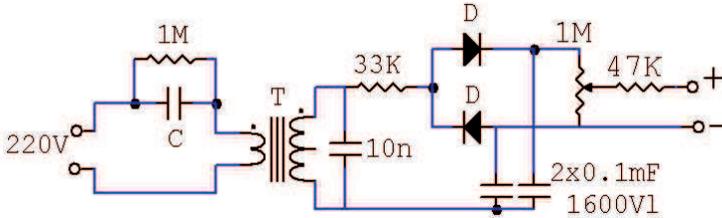


Figura 12. Alimentatore variabile da 0 a 700 V isolato galvanicamente dalla rete per le tensioni ausiliarie statiche necessarie per gli esperimenti. D: 1N4007.

Figura 13. L'alimentatore isolato galvanicamente con uscita variabile.



trasformatori con secondario ad alta tensione, questo circuito usa un comune trasformatore da pochi watt con una tensione secondaria di qualche volt usato al contrario. Lo si può estrarre aprendo uno dei piccoli alimentatori a spina non più in uso che ormai abbiamo tutti nelle nostre case. Il valore del condensatore C, che è isolato per 400V in c.a. dipende dal valore della bassa tensione del trasformatore e dalla sua potenza, e può andare da 3 a 6 μF , da cercare per tentativi fino ad avere una tensione secondaria di 220 V o maggiore, per sicurezza non superiore a 300 V. Si tratta di condensatori molto economici ma affidabili usati per i motori degli apparecchi elettrodomestici.

Conclusioni

Sono stati descritti alcuni strumenti che potrebbero costituire la dotazione di chi voglia occuparsi in concreto di fisica sperimentale, così come è utile possedere uno o più tester digitali – il loro costo è ora intorno ai 4 euro, e sono così utili che è assurdo non averne – un saldatore, normali attrezzi e utensili manuali. In particolare la costruzione del buon elettroscopio potrebbe essere assegnata agli studenti come compito per casa, i quali ne ricaverebbero soddisfazione personale, esercizio della loro abilità manuale, lo stimolo a porsi qualche problema e sperimentare su ciò che accade seguendo il filo dell'inventiva.

Riferimenti e note

- [1] G. PEGNA, "The simplest of electrostatic generators", *Am. J. Phys.* **45**, 218 (1977).
- [2] Il *Teflon* (PoliTetraFluoroEtilene) è una plastica di colore bianco, di elevato peso specifico, scivolosa al tatto, resistente a quasi tutti gli agenti chimici, che ha fra tutte le materie plastiche la più alta temperatura di rammollimento: 300°C. È anche, fra tutti i solidi, quello che ha le migliori proprietà isolanti: resistenza elettrica superficiale (con umidità relativa del 100% e a 23°C) = 10^{16} Ohm; resistenza specifica di volume (a 23°C) = 10^{18} ohm · cm. Il *teflon* è quindi uno dei migliori isolanti disponibili anche per il fatto che ha poca affinità con l'acqua e quindi è pochissimo "bagnabile" dall'umidità dell'aria. Il polistirolo e

il polietilene hanno resistività di volume confrontabili con quella del *teflon* ma peggiori proprietà di superficie. Il vetro: tra 10^{10} e 10^{14} ohm · cm.

Si può acquistare una lastra di *teflon* dello spessore di 3 mm e dimensioni 150×200 mm al prezzo di 21 euro comprese le spese di spedizione su: http://www.ebay.it/itm/Lastra-Teflon-PTFE-3-mm-Taglio-a-misura-politetrafluoretilene-/131415255004?var=&hash=item1e98f5a7dc:m:mjL_rGjqfOgyHwXagYkkCAA

- [3] Si trovano nei negozi di *bricolage* delle economiche serie di seghe circolari a tazza come accessori per i trapani elettrici a mano.
- [4] L'inchiostro di china nero quando è asciutto è un buon conduttore.
- [5] I dati del transistor 2N3819, che è il più facilmente reperibile: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15t075/PHILIPS/2N3819.html>
- [6] Il diodo LED ha due fili. L'anodo è il filo più lungo, ed è quello che nei circuiti deve essere collegato al terminale positivo del generatore affinché si accenda.
- [7] Questo strumento è stato inventato da John Zenely nel 1911. Vedi: John Zeleny, "A Lecture Electroscope for Radioactivity", *Physical Review*, **32**, 255-256 (1911).
- [8] Sono in vendita delle punte di tungsteno per forare il vetro, dette "punte a lancia", per fori di diametri massimi di 4 o 5 mm. Per fori più grandi si procede come segue. Si monta nel trapano un tubetto di rame corto e del diametro esterno uguale a quello del foro che si vuole fare. Si riempie il tubetto con una poltiglia non troppo densa di olio da motori e spuntiglio (polvere abrasiva di carborundum o di corindone). Poi con attenzione, e senza premere troppo, si fa funzionare il trapano, allontanandolo frequentemente dalla zona di foratura e controllando che il vetro non si scaldi troppo (sporcandosi così le mani tutte le volte!). Occorre particolare attenzione a non esercitare troppa pressione quando il vetro è quasi forato. L'operazione è lunga, occorre pazienza.

AIF – 5 PER MILLE

Dal 2016 l'Associazione per l'Insegnamento della Fisica è stata inclusa nell'elenco degli enti che possono beneficiare del riparto delle quote del 5 per mille dell'Irpef. È quindi possibile contribuire alle attività dell'Associazione indicando nella dichiarazione dei redditi relativi all'anno 2016 il Codice Fiscale **00383360369**, nella prima opzione del modulo (Sostegno del volontariato e delle altre Organizzazioni Non Lucrative di Utilità Sociale, delle Associazioni di Promozione Sociale e delle Associazioni e Fondazioni riconosciute che operano nei settori di cui all'art. 10, c. 1, lett. A) del D.LGS. N. 460 del 1997).