

La legge del raffreddamento di Newton

(exp. id 20210329-I-v1)

Un esperimento proposto da
Beatriz Padín – Santiago de Compostela (Spain)
tradotto¹ dall'inglese a cura di Alessandro Bogdan - Liceo Scientifico "Tullio Levi-Civita" (Roma)

Introduzione

“La morte è avvenuta tra le 23:00 e le 2:00”. Abbiamo sentito quest'affermazione in molti film e serie TV come *Crime Scene Investigation* (C.S.I.). Quale scienza si nasconde dietro una simile affermazione? Uno dei metodi forensi per ottenere una stima approssimata del tempo trascorso tra la morte della vittima e il ritrovamento dei suoi resti.

In quest'attività studiamo sperimentalmente il processo di raffreddamento dei corpi (non cadaveri...).

Una semplice teoria, la cosiddetta “legge di Newton del raffreddamento”, spiega come questo avviene. Tale legge stabilisce che la velocità con cui un oggetto a temperatura T cede calore è direttamente proporzionale alla differenza tra la sua temperatura e quella dell'ambiente circostante secondo l'equazione:

$$\frac{dT}{dt} = -k(T(t) - T_{env}) , \quad (1)$$

dove t è il tempo, $T(t)$ la temperatura dell'oggetto nell'istante di tempo t , T_{env} la temperatura dell'ambiente esterno, costante per ipotesi, e k_x la “costante di raffreddamento” che dipende dalla capacità termica del corpo, dall'area, dalla rugosità e da altre caratteristiche della superficie, ecc. Il valore del parametro k varia in relazione alle condizioni in cui è condotto l'esperimento, in particolare se in regime di convezione naturale o forzata.

Integrando l'equazione differenziale (1) si perviene a una legge esponenziale del tipo

$$T(t) = T_{env} + (T_0 - T_{env}) \exp(-kt) . \quad (2)$$

dove T_0 rappresenta la temperatura dell'oggetto all'istante di tempo $t = 0$ s. In accordo con la (2), la velocità del processo di raffreddamento diminuisce al diminuire della temperatura del corpo e al suo tendere esponenzialmente alla temperatura dell'ambiente esterno.

Con un simile esperimento si può::

- indagare come varia la velocità di trasferimento di calore nel tempo.
- Determinare il valore della costante di raffreddamento di un oggetto.
- Ricercare i fattori che influenzano il valore della misura della costante di raffreddamento.

¹Lavoro eseguito nell'ambito di un progetto PCTO con la collaborazione di Graziano Surace, Sapienza Università di Roma.

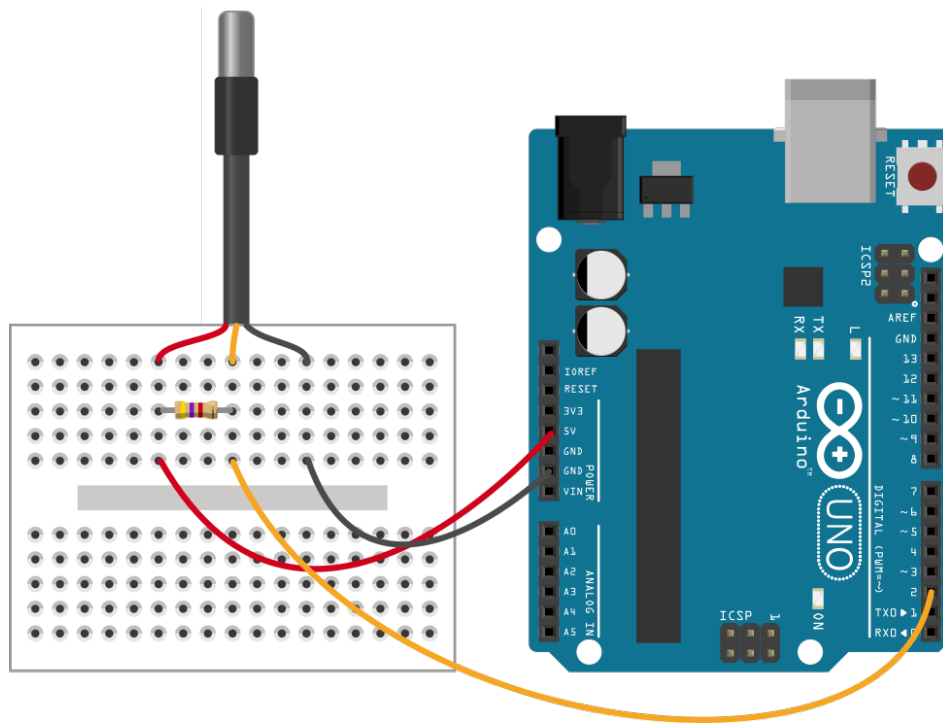


Figura 1: How to connect the sensor to Arduino.

Materiali

Per studiare il processo di raffreddamento, si devono effettuare misure di temperatura e di tempo. Come strumenti di misura si potrebbero utilizzare un termometro e un cronometro. In questo esperimento, invece, preferiamo utilizzare un sensore digitale di temperatura.

1. Una scheda Arduino UNO.
2. Un computer con l'ambiente IDE Arduino installato.
3. Un sensore digitale di temperatura (resistente all'acqua) del tipo DS18B20.
4. Un resistore da 4.7 k Ω .
5. Una *breadboard*.
6. Cavi elettrici.

Per leggere le temperature misurate dal sensore dobbiamo programmare il microprocessore Arduino. Presumiamo che tu abbia già familiarità con Arduino [1].

In quanto segue assumiamo, quindi, che tu abbia installato la IDE Arduino sul tuo computer e che tu sappia già come scrivere uno *sketch*, aggiungere una libreria alla IDE Arduino, caricare uno *sketch* sulla scheda elettronica e aprire il monitor seriale.

Connettere e programmare il sensore

Connetti il sensore DS18B20 ad Arduino. Secondo le specifiche, devi alimentare il sensore in corrente continua connettendo il cavo rosso a una tensione di 5 V e il cavo nero a GND. Il terzo cavo, usato per comunicare con Arduino, va collegato a un pin digitale (per esempio, il pin 2). Interponi il resistore da 4.7 k Ω tra il pin segnale e il pin da 5 V. (vedi Fig. 1) [2].

Il seguente *sketch* legge le temperature ogni 30 secondi e scrive i valori sul monitor seriale di Arduino. Richiede l'inclusione della libreria DallasTemperature.

```
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>

// The sensor is connected to Arduino's digital pin 2
const int ONE_WIRE_BUS = 2;

OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensor(&oneWire);

// The measurements are taken every 30 s
long previousTime = 0;
long interval = 30000;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("t [s],T [degrees]");

  sensor.begin();

  // Initial measurement (t=0 s)
  float temperature = sensor.getTempCByIndex(0);
  Serial.print(millis()/1000);
  Serial.print(", ");
  Serial.println(temperature);
}

void loop() {
  unsigned long currentTime = millis();

  if (currentTime - previousTime > interval) {
    previousTime = currentTime;

    sensor.requestTemperatures();
    float temperature = sensor.getTempCByIndex(0);

    Serial.print(currentTime/1000);
    Serial.print(", ");
    Serial.println(temperature);
  }
}
```

Procedura sperimentale

Per prima cosa misura la temperatura dell'ambiente esterno che utilizzerai nel seguito per l'analisi dei dati. Sebbene questa possa cambiare leggermente durante l'esperimento, puoi assumere che essa rimanga costante.

Per effettuare le misurazioni, metti un po' d'acqua calda dentro un *beaker* e immergi il sensore impermeabile. Fai partire il programma di Arduino per misurare la temperatura dell'acqua ogni trenta secondi. Quando hai finito di prendere le misure, salva i dati raccolti in un file csv o in un file di testo (puoi, per esempio, copiare e incollare i dati dal monitor seriale) secondo il tuo metodo di analisi preferito.

Per studiare i fattori che influiscono sul valore della costante di raffreddamento k , puoi ripetere l'esperimento in diverse condizioni:

- fai variare l'area della superficie dell'acqua da raffreddare;
- prova con contenitori di materiali o colorazione differente;
- fai avvenire il raffreddamento in condizioni di convezione forzata.

Analisi dei dati

Traccia il grafico temperatura vs tempo del raffreddamento dell'acqua e da esso cerca di dedurre conclusioni almeno qualitative.

- Osserva la pendenza del grafico temperatura-tempo e controlla la validità della legge di raffreddamento: inizialmente il calore è trasferito ad una velocità elevata – il grafico ha una pendenza elevata –, mentre, avvicinandosi all'equilibrio termico, la velocità del trasferimento del calore diminuisce e la pendenza del grafico approssima quella di una retta orizzontale.
- Cosa accade a k se l'area della superficie S aumenta? In che modo k dipende da S ?
- Come ti suggerisce l'esperienza quotidiana, il raffreddamento avviene più velocemente in regime di convezione forzata. Come si riflette questo aspetto sul valore di k ?

Per effettuare una misurazione quantitativa della costante di raffreddamento k , linearizza l'equazione (2), considerando il logaritmo di ambo i membri dell'equazione:

$$\ln(T - T_{env}) = \ln(T_0 - T_{env}) - kt. \quad (3)$$

I punti sperimentali del grafico $\ln(T - T_{env})$ vs t si disporranno lungo una retta di pendenza k :

Per determinare la retta di regressione (la retta che meglio interpola i dati sperimentali) puoi utilizzare le funzioni dedicate dei fogli di calcolo o appositi software per l'analisi dei dati, come R o PYTHON.

Approfondimento

In generale, il processo di raffreddamento coinvolge vari fenomeni di trasferimento di calore: conduzione, convezione e irraggiamento. Nel 1701 Newton trovò, per la prima volta in un processo di raffreddamento, la relazione tra temperatura e tempo sopra indicata. In seguito, altri scienziati evidenziarono discrepanze dalla legge di Newton del raffreddamento ma le deviazioni dalla legge esponenziale furono attribuite a errori sperimentali. Secondo U. Besson [3], “il discreto fascino della proporzionalità e la fiducia nella semplicità delle leggi naturali sembrano aver fortemente influenzato Newton e molti scienziati successivi”. Tenendo conto di questo approccio, rifletti sui seguenti aspetti:

- la relazione tra dati sperimentali e modelli matematici e l'analisi delle possibili discrepanze tra di loro.

- L'intervallo di valori sperimentali all'interno del quale è valida una legge empirica e la necessità di cambiare modello quando l'intervallo di valori si amplia.
- Una riflessione critica sulla storia della scienza attraverso lo studio di casi storici particolarmente significativi.

Riferimenti bibliografici

- [1] Se questa è la tua prima esperienza con Arduino, puoi trovare tutte le informazioni necessarie su come iniziare ad usarlo nella guida “Beginner’s Guide to Arduino” (<https://www.instructables.com/A-Beginners-Guide-to-Arduino>).
- [2] Per le istruzioni su come connettere e programmare il sensore DS18B20, puoi consultare “Low-cost Sensors in the Physics Classroom (by bpadin). Step 4: DS18B20 Digital Temperature Sensor” (<https://www.instructables.com/Low-cost-Sensors-in-the-Physics-Classroom/#step4>).
- [3] U. Besson, The History of the Cooling Law: When the Search for Simplicity can be an Obstacle: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.468.4908&rep=rep1&type=pdf>

Per l'insegnante

(exp. id 20210329-I-v1)

-
1. La legge del raffreddamento di Newton è una legge approssimata. Affinché i dati si adattino alla legge esponenziale, la temperatura dell'acqua deve essere di circa 30°C al di sopra della temperatura dell'ambiente esterno, e il *beaker* con acqua calda dovrebbe essere posto su un materiale isolante per massimizzare il raffreddamento per convezione rispetto ad altre modalità.
 2. Sebbene la legge di raffreddamento si possa studiare facilmente anche con un termometro e un cronometro in un "ambiente privo di tecnologia", l'uso di Arduino ha grandi benefici. Gli studenti esercitano abilità aggiuntive essenziali nel lavoro scientifico, come il collegamento e la programmazione di sensori. Inoltre, rende le lezioni di fisica più coinvolgenti e motivanti e incoraggia gli studenti a essere creatori, e non solo consumatori di tecnologia.
 3. Se gli studenti hanno già familiarità con Arduino, si possono incoraggiare a elaborare programmi più complessi, aggiungere componenti esterni, come uno schermo LCD, per leggere i valori misurati, o un *power bank* esterno per rendere la strumentazione portatile. Si può anche creare un *data logger* salvando i valori misurati su una scheda SD.

Studenti tra i 13-15 anni hanno testato con successo il sensore digitale di temperatura DS18B20, usandolo in diversi esperimenti, senza aver avuto alcuna esperienza con Arduino.

Obiettivi, livello e durata

1. Obiettivo primario: coinvolgere gli studenti nell'apprendimento dei metodi di ricerca della fisica come scienza sperimentale.
2. Obiettivo primario: acquisire informazioni empiriche sulle modalità di trasferimento del calore.
3. Obiettivo secondario: apprendere le basi di funzionamento e di utilizzo dei sensori digitali con Arduino.
4. Consigliato per: scuole secondarie di secondo grado e università.
5. Durata: tre ore.

Ulteriori informazioni online

Lasciate opinioni, suggerimenti, commenti e notizie sull'utilizzo di questa risorsa sul canale corrispondente a questo esperimento all'interno dello spazio di lavoro di Slack "smartphysicslab.slack.com". Gli insegnanti possono chiedere di essere registrati sulla piattaforma attraverso il modulo presente sulla *home page* di smartphysicslab.org e ottenere così l'invito alla registrazione su Slack ed essere inseriti nella *mailing list* di [smartphysicslab](https://smartphysicslab.org).