Arduino

e l'acquisizione dati nel laboratorio didattico

Carmelo Sgrò (carmelo.sgro@pi.infn.it)

Dipartimento di Fisica E. Fermi, Università di Pisa
Piano Nazionale Lauree Scientifiche

Febbraio 2017

Outline

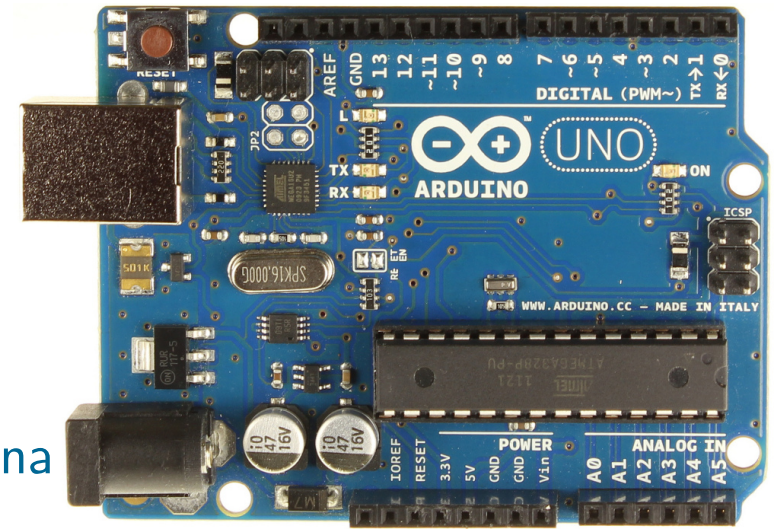
- Arduino: cos'è e come funziona
- Ambiente di sviluppo di Arduino e le sue librerie
- Alcuni semplici esempi
  - Accendere un LED
  - Scrivere sulla seriale

- Il concetto di Acquisizione Dati (DAQ)
- La porta seriale: salvare dati su disco
- Il convertitore analogico digitale
- Un sensore di temperatura

- La misura di tempo: funzione micros e millis
- L'interrupt
- Un esempio: il pendolo

Introduzione ad Arduino

http://www.arduino.cc/



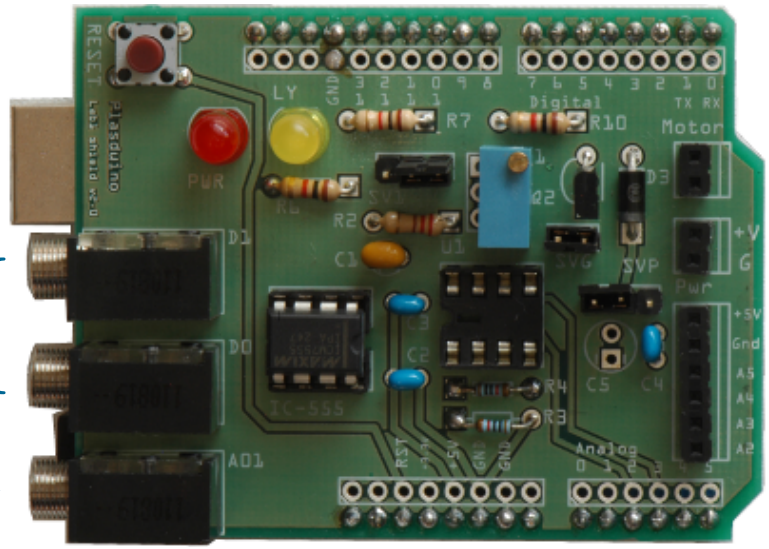
- Arduino: una piattaforma *open* di prototipizzazione elettronica:
  - Una scheda elettronica basata su un microcontrollore
  - Un ambiente software ad alto livello, con un ampia libreria di funzioni;
- Una tipica scheda di Arduino offre:
  - Un microcontrollore
  - I pin per le varie periferiche
  - Un'interfaccia seriale via USB
  - Alimentazione tramite USB o indipendente

Gli "shield"

Connettori per i sensori

Misure di tempi

Misure di temperature →

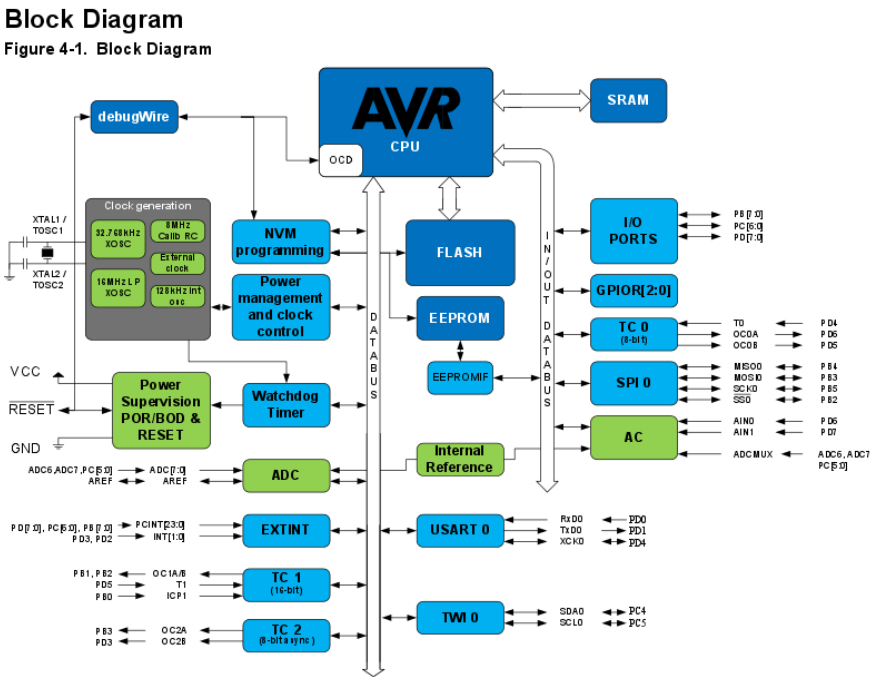


Controllo motore

Input analogici

- Uno *shield* è un circuito stampato da connettere *sopra* la scheda di Arduino
  - Viene utilizzata dagli utenti per implementare le proprie idee.
  - Si possono comprare per scopi specifici o farselo da solo
  - Esempio preso dal Laboratorio di Fisica I:
    - connettori per i sensori
    - condizionamento dei segnali (temperatura)
    - LED
    - calibrazione interna

Cos'e' un microcontrollore

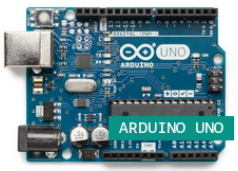


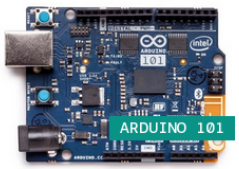
- Un dispositivo che mette insieme una piccola CPU ed alcune periferiche:
  - Pin di input/output (ad esempio per accendere/spegnere un LED)
  - Contatori e timer
  - Convertitori Analogico/Digitali (ADC)
  - Pulse Width Modulation (PWM)
  - Interfacce seriali (per la comunicazione con dispositivi esterni)
  - Memoria interna
  - ...
- Per i nostri scopi utilizzeremo un Arduino UNO
- Basato su Atmel ATmega328
  - I coraggiosi possono andare a curiosare nel manuale: `http://www.atmel.com/Images/doc8161.pdf`

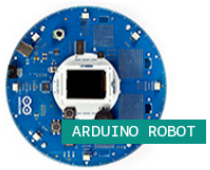
Quanti tipi di Arduino ci sono?

https://www.arduino.cc/en/Main/Products

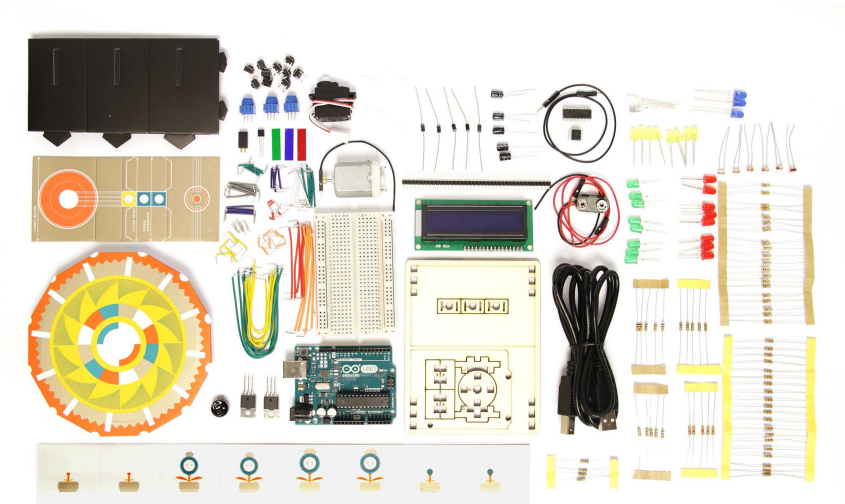
- Tanti e con caratteristiche diverse
- Entry level: per iniziare, ma non solo...
- Enhanced Features: per progetti complessi e prestazioni elevate





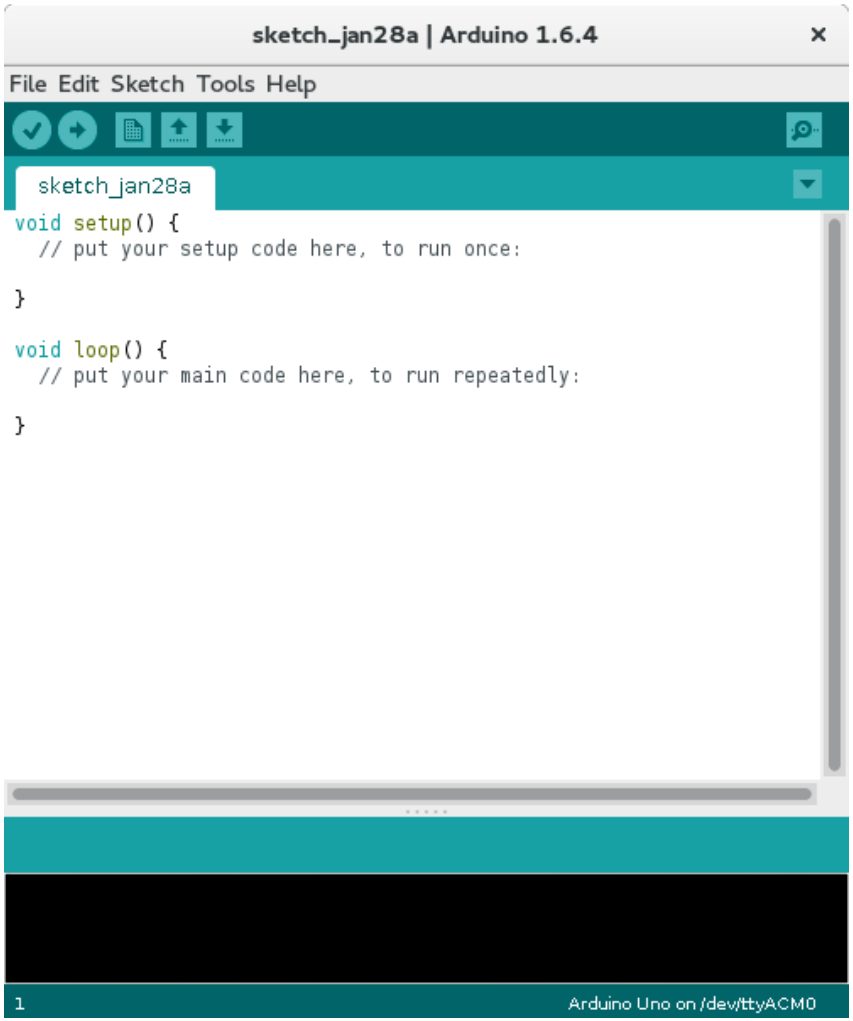


- Kit con tutorials e componenti: per imparare e "smanettare"



Il software di sviluppo: Arduino IDE

https://www.arduino.cc/en/Main/Software



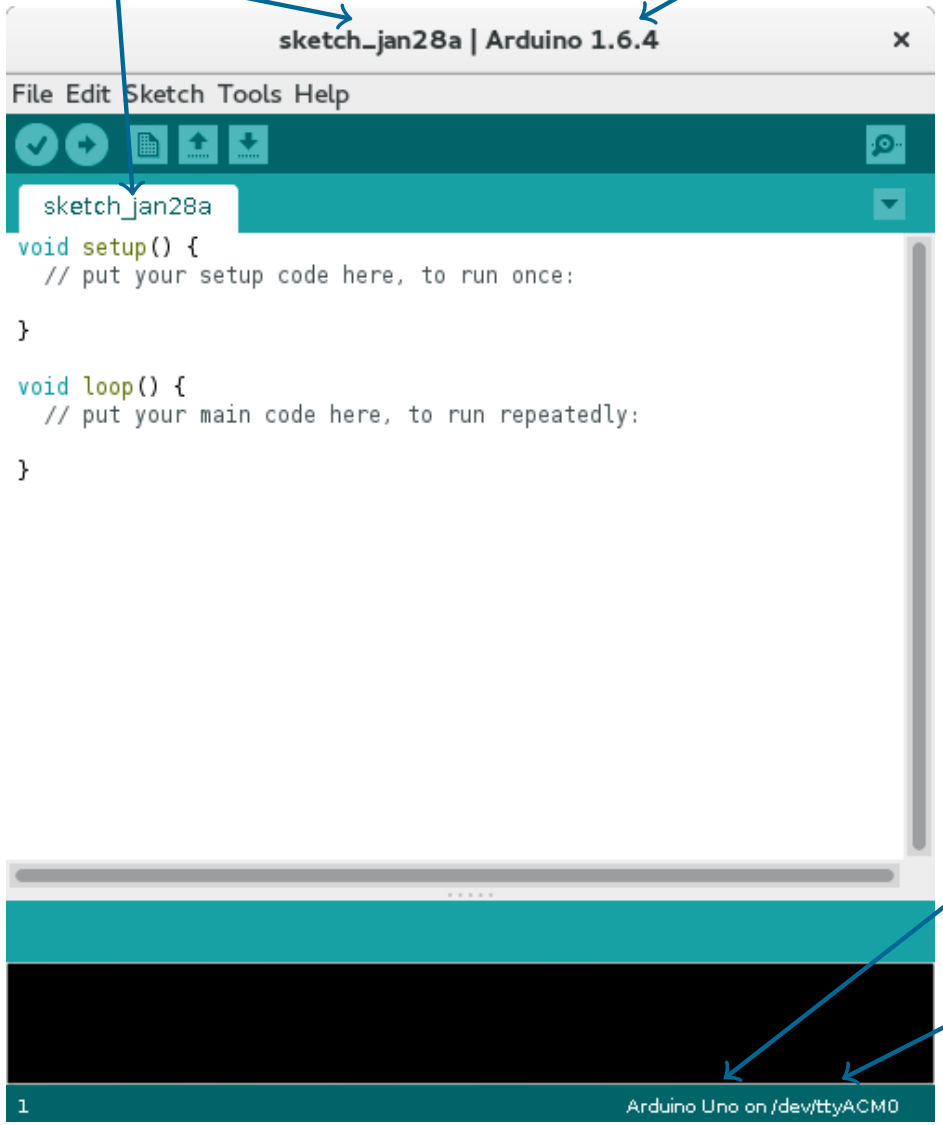
Potete scaricarlo ed installarlo seguendo le istruzioni nel link in alto

- Parte fondamentale del successo di Arduino
- Consente di programmare il microcontrollore facilmente
- Esempi per quasi tutto
- Librerie per quasi tutto
- Vasta comunità di sviluppatori e forum di discussione
- Liberamente disponibile per vari OS (ed anche il codice sorgente)
- Attenzione però:
  la generalità e facilità di utilizzo può andare a discapito delle prestazioni

Arduino IDE

Nome del programma (Sketch)

Versione del software



Tasti per compilare e caricare lo sketch

← Serial Monitor

Funzioni fondamentali

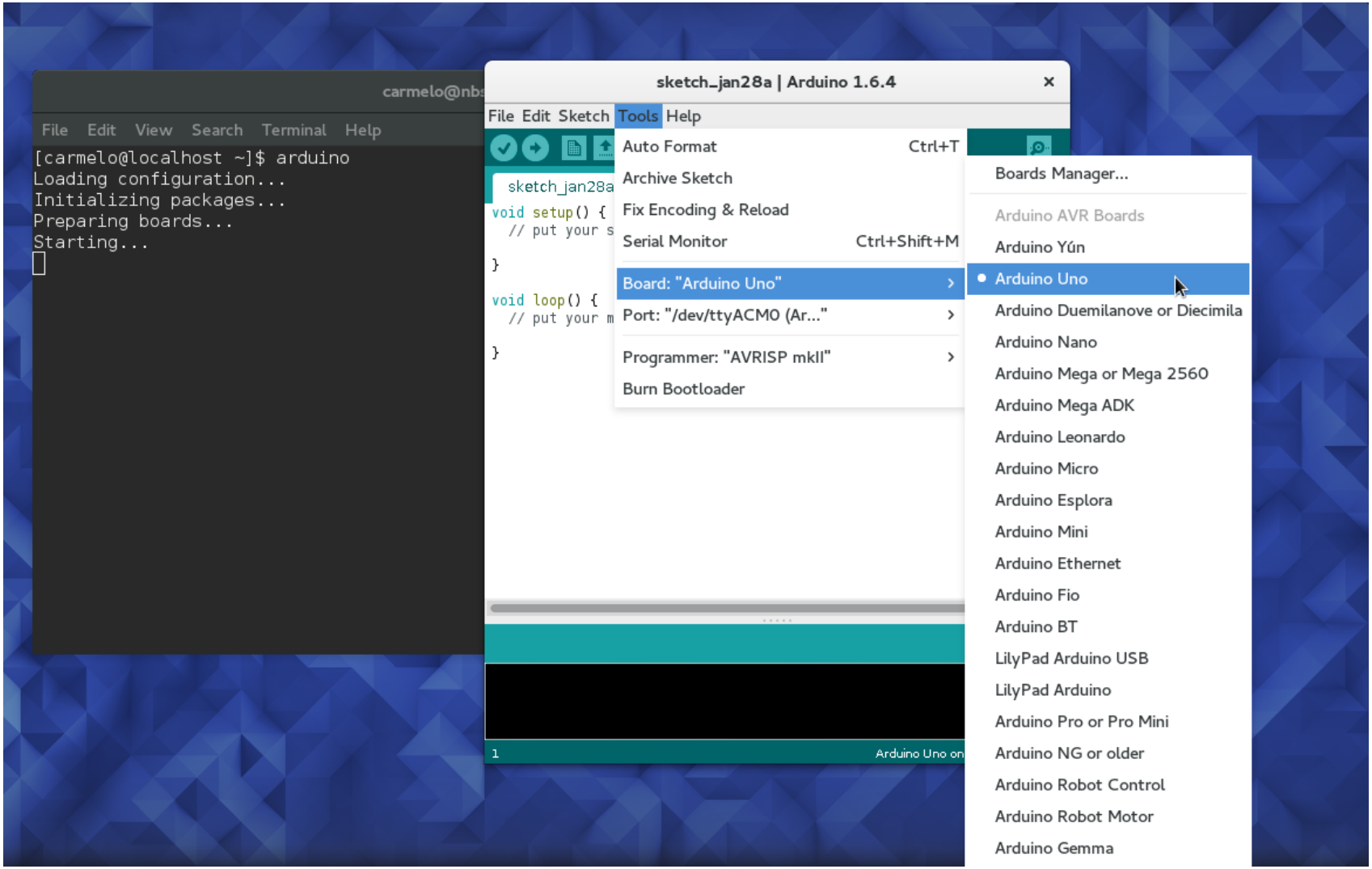
setup:
eseguita solo all'inizio.

loop:
eseguita in continuazione.

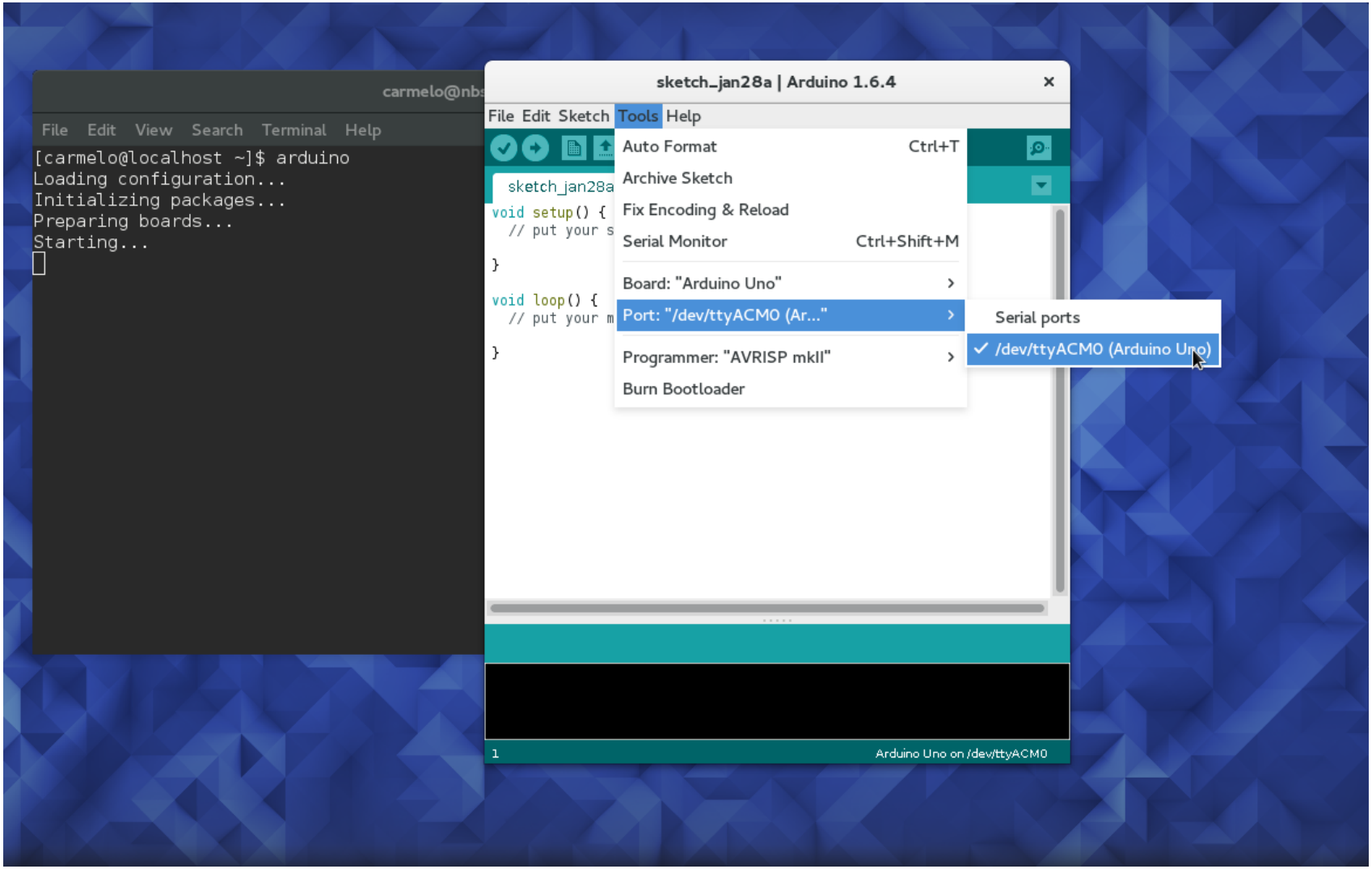
Modello di Arduino

Porta USB (seriale)

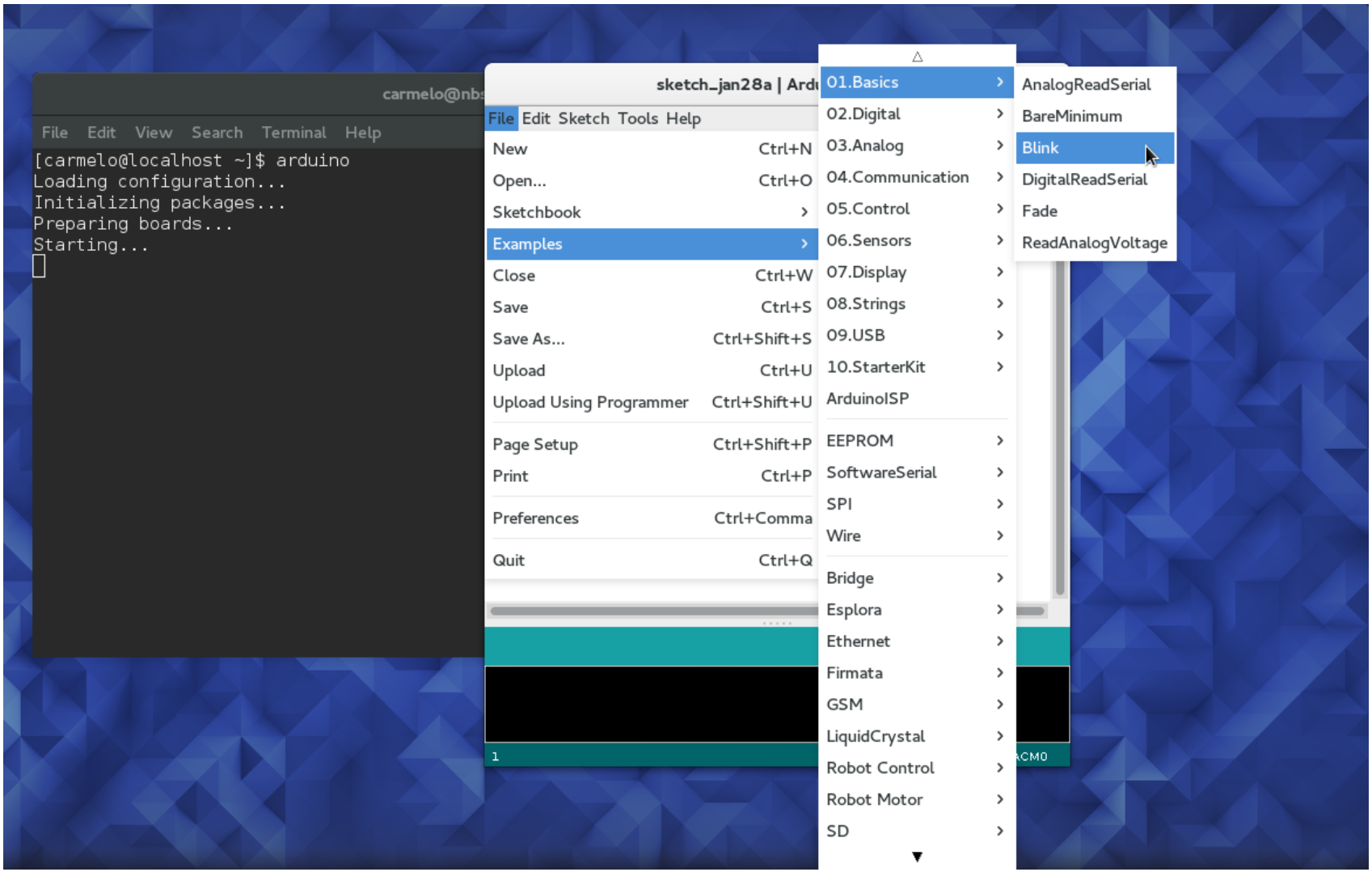
Arduino IDE: selezionare il tipo di Arduino



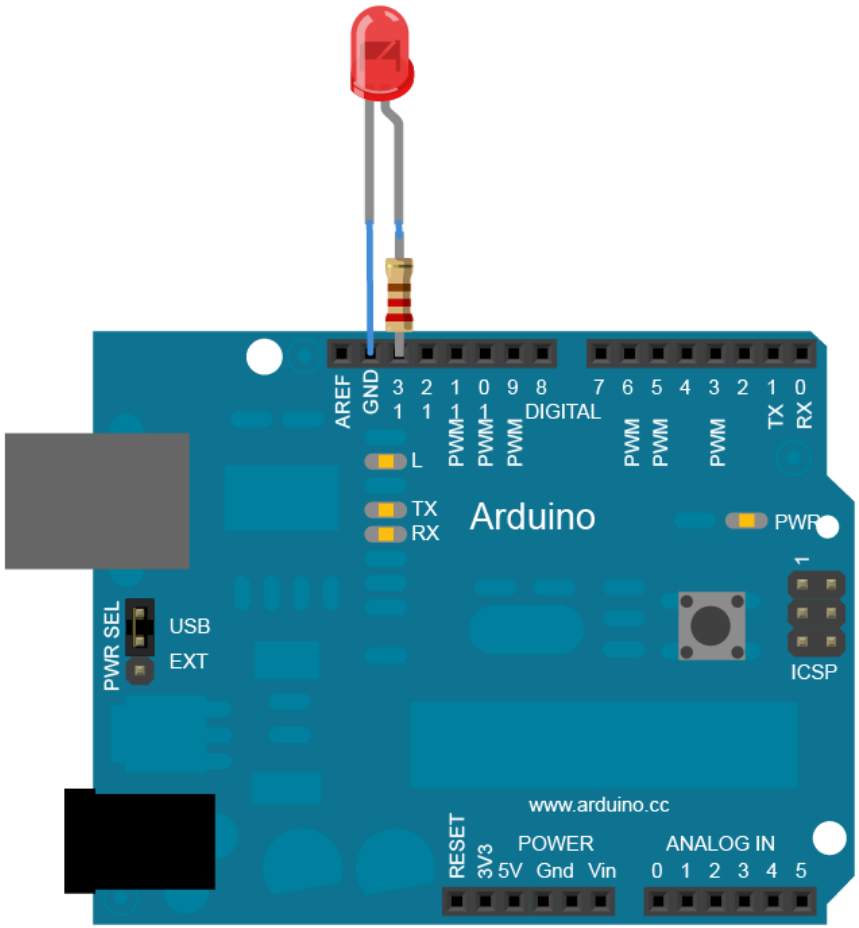
Arduino IDE: selezionare la porta USB



Cominciamo con un esempio semplice: accendere un LED



Blink a LED: nota sul circuito



- Esempio base su come si accendono e spengono i pin
- Arduino è alimentato a 5 Volt tramite la porta USB
  - Un pin "alto" è quindi a 5 V
  - Un pin "basso" è quindi a 0 V (GND)
  - Queste tensioni di riferimento sono disponibili sui pin esterni
- Un LED è già connesso sulla board al pin 13
- In generale potete connettere un LED and un Pin con lo schema qui a sinistra
  - Usare sempre una resistenza di limitazione della corrente!

Blink a LED

https://www.arduino.cc/en/Tutorial/Blink

```
// the setup function runs once when you press reset or power the board
void setup() {
  // initialize digital pin 13 as an output.
  pinMode(13, OUTPUT);
}

// the loop function runs over and over again forever
void loop() {
  digitalWrite(13, HIGH);   // turn the LED on (HIGH is the voltage level)
  delay(1000);              // wait for a second
  digitalWrite(13, LOW);    // turn the LED off by making the voltage LOW
  delay(1000);              // wait for a second
}
```

- Nel *setup* selezioniamo il pin 13 come pin di output
- Nel *loop* accendiamo (HIGH) e spegnamo (LOW) il pin 13, con un ritardo di 1000 ms (delay)
- La sintassi è praticamente C
- Cliccare su "Verify" per compilare e "Upload" per caricare su Arduino

Blink a LED: esercizi vari

1. Cambiare i ridardi nella funzione *delay*
2. Definire una variabile per il pin 13:

```
const int ledPin = 13;
// The const keyword make the variable "read-only"
```

3. Definire una stringa per il pin 13:

```
#define ledPin 13
// The compiler will replace any mention of ledPin
// with the value 13 at compile time.
// No semicolon after #define
```

4. ...

- Un altro esempio che potete studiare è "BlinkWithoutDelay"
  - Utilizza la funzione *millis* per il tracciare il tempo
- Guida completa alle istruzioni fondamentali in: `https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage`

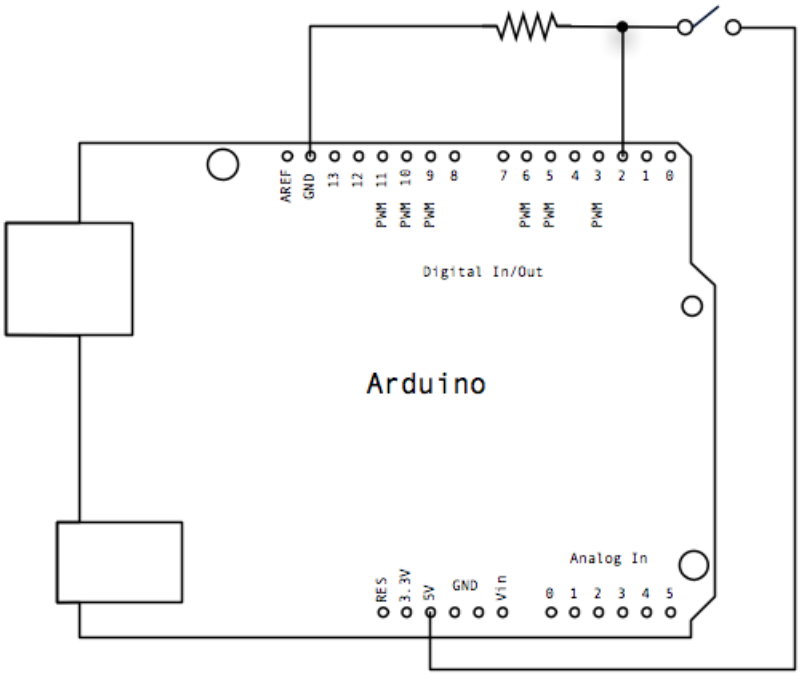
Un altro esempio: comunicazione seriale

- In Arduino alcuni pin sono riservati a funzioni specifiche
  - Visibili sulla serigrafia della scheda
- In UNO i pin 0 (RX) e 1 (TX) sono utilizzati per la comunicazione seriale (TTL), verso il chip che gestisce l'USB (ATmega8U2 USB-to-TTL Serial chip)
- La comunicazione è gestita ad alto livello tramite la funzione *Serial*
  - `https://www.arduino.cc/en/Reference/Serial`
  - Si può emulare una porta seriale su altri pin tramite la libreria SoftwareSerial, ma non ne parleremo qui...
- Studiamo il funzionamento della porta seriale tramite l'esempio DigitalSerialRead

Esempio DigitalSerialRead

https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DigitalReadSerial

- Lo scopo è scrivere sulla seriale lo stato di un pin (il 2)
- Schema elettrico: connettere il pin 2 a GND (tramite una resistenza) o a 5V tramite un interruttore



Esempio DigitalSerialRead

https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DigitalReadSerial

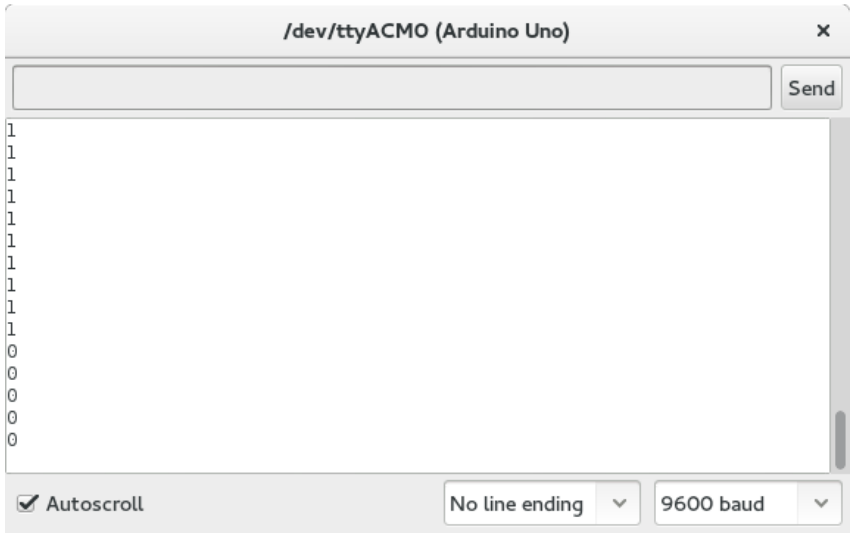
```
// digital pin 2 has a pushbutton attached to it. Give it a name:
int pushButton = 2;

// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
  // make the pushbutton's pin an input:
  pinMode(pushButton, INPUT);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  // read the input pin:
  int buttonState = digitalRead(pushButton);
  // print out the state of the button:
  Serial.println(buttonState);
  delay(1);        // delay in between reads for stability
}
```

- Porta seriale inizializzata nel setup con velocità di 9600 baud
- Il pin 2 settato com "input" e letto periodicamente
- Lo stato del pin 2 (0 o 1) ritrasmesso sulla seriale

Esempio DigitalSerialRead

https://www.arduino.cc/en/Tutorial/DigitalReadSerial

- Aprite il Serial Monitor di Arduino e ossevate l'output mentre cambiate lo stato del pin 2



- Tip & Tricks:
  - La velocità della porta seriale in Arduino deve essere la stessa del vostro monitor sul pc
  - La programmazione di Arduino avviene sulla stessa porta seriale: chiudetela prima di caricare un nuovo sketch

Esercizio

- Scrivete un programma che accende e spegna il LED in base ad un carattere che trasmettete sulla seriale
- Suggerimento:

```
if (Serial.available() > 0) {
    inByte = Serial.read();
    ...
```

Acquisizione Dati (DAQ)

Arduino

Control & Storage
Online Monitoring

Lo scopo è leggere i sensori e scrivere i dati su disco in maniera più efficiente possibile. In un tipico esperimento troviamo:

1. I sensori dedicati
2. Un apparato hardware per gestire e leggere i vari sensori
   - Arduino nel nostro caso
   - Con eventualmente circuiteria per il condizionamento dei segnali
3. Un sistema di controllo (su PC) per gestire l'acquisizione e salvare i dati su disco
   - Questo sistema dipende dall'infrastruttura (hardware e software) che avete a disposizione "in casa"
   - Qui ci limiteremo alla parte di salvataggio dei dati

Attenzione! Altre funzioni ausiliarie (analisi online, visualizzazione, etc.) possono ridurre l'efficienza. Valutate sempre cosa è meglio fare off-line

I tools del modulo serial di python

- Modo "quick and dirty" per redirigere l'output della seriale su file
- Il linguaggio python contiene una libreria pyserial
  - Con dei tool pronti per le operazioni più comuni
  - `http://pyserial.readthedocs.io/en/latest/tools.html`
- Per vedere i dispositivi connessi:

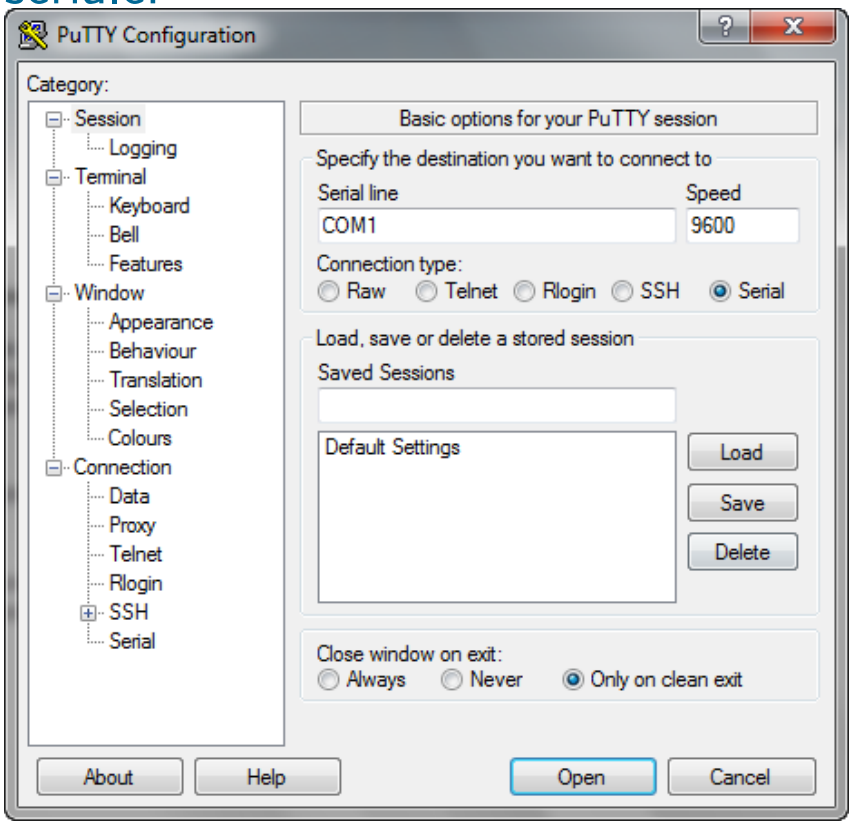
```
$ python -m serial.tools.list_ports -v/dev/ttyACM0
    desc: ttyACM0
    hwid: USB VID:PID=2341:0043 SER=A4139363831351013102 LOCATION=2-1.3
1 ports found
```

- Aprire una console e ridirigere l'output su un file "logfile.txt" (Linux only)

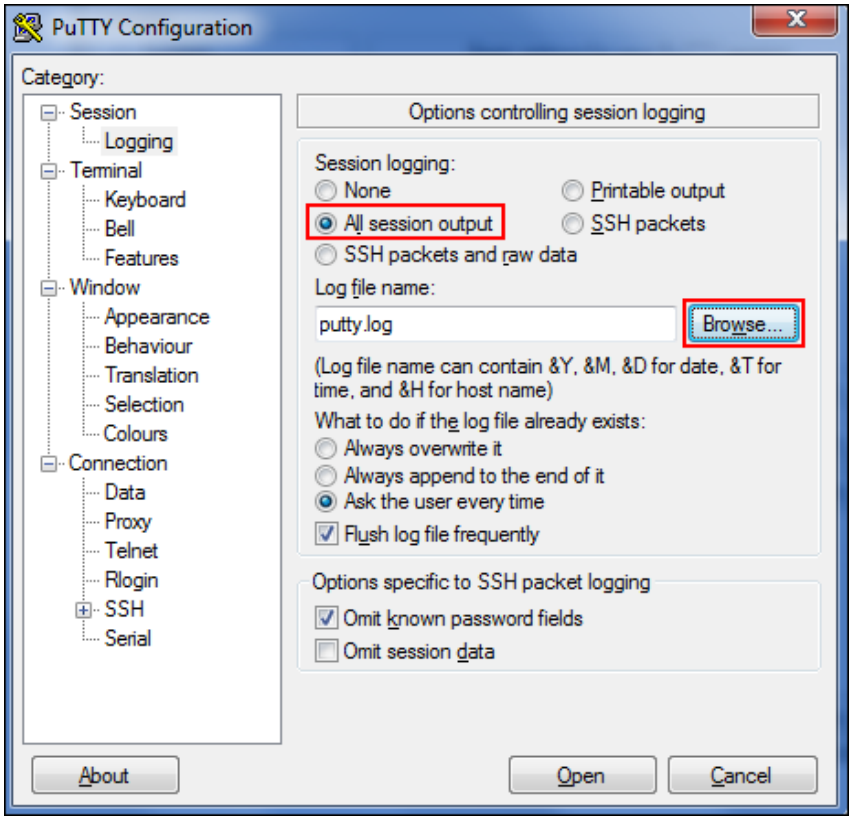
```
$ python -m serial.tools.miniterm /dev/ttyACM0 9600 | tee logfile.txt
--- Miniterm on /dev/ttyACM0  9600,8,N,1 ---
--- Quit: Ctrl+] | Menu: Ctrl+T | Help: Ctrl+T followed by Ctrl+H ---
```

Terminale seriale con Putty (Windows)

Per far partire una connessione seriale:



Per salvare tutta la comunicazione su log file:



Il convertitore Analogico/Digitale (ADC)

- Arduino utilizza un convertitore Analogico Digitale a 10 bit ad approssimazioni successive:
  - 10 bit: 2^{10} passi da 0 a 5 V (0–1023 adc counts)
  - approssimazioni successive: una tensione di riferimento viene confrontata con il segnale da digitalizzare, un bit alla volta a partire dal più significativo
- Ci sono 6 canali analogici, ma in realta' c'e' solo un ADC
  - Si legge un canale alla volta
- L'ADC si legge con la funzione analogRead(): `https://www.arduino.cc/en/Reference/AnalogRead`
- Il codice di sequito é adattato dall'esempio AnalogSerialRead

```
void setup() {
  Serial.begin(9600); // initialize serial communication
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  int sensorValue = analogRead(A0); // read the input on analog pin 0
  Serial.println(sensorValue);      // print out the value you read
  delay(1000);                      // wait 1 second till next acquisition
}
```

Misure di temperatura: il termistore NTC

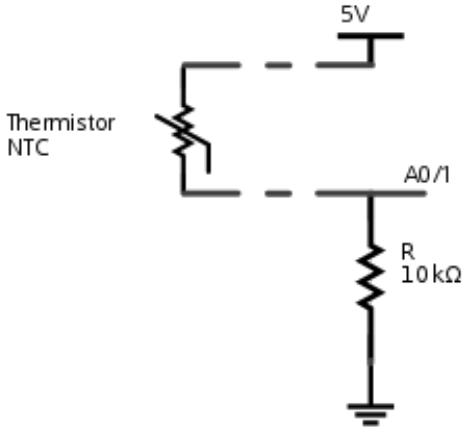
- I termistori possono essere visti come resistenze il cui valore cambia con la temperatura:
  `https://it.wikipedia.org/wiki/Termistore`
- NTC: Negative Temperature Coefficient, resistenza che decresce con l'aumentare della temperatura
- La relazione che lega temperatura e resistenza è parametrizzata dall'equazione di "Steinhart-Hart":

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot ln(R_T) + C \cdot (ln(R_T))^3 \qquad (1)$$

- I parametri A, B e C sono le costanti di calibrazione e dipendono dal modello di sensore che avete a disposizione
  - Il produttore vi da i parametri nominali
  - Ma ve li potete ricalibrare da soli: quanti punti vi servono?

Misure di temperatura: lo schema elettrico

- Per ricavare la resistenza utilizziamo lo schema elettrico di un partitore resistivo
  - Dobbiamo leggere la tensione V e ricavare R_T



$$R_T = R(Vcc/V - 1) \qquad (2)$$

- Esercizio: convertire la lettura dell'ADC in temperatura in Arduino
- Con $R = 10000\ \Omega$, $A = 8.65 \cdot 10^{-4}$ e $B = 2.55 \cdot 10^{-4}$ (trascurando C
- Suggerimenti:

```
#define SHUNT_RESISTOR 10000.
#define A 8.65082e-04
#define B 2.55459e-04

int sensorValue;
float logR;
float Temp;

[...]

  logR = log(SHUNT_RESISTOR*(1023./adcValue - 1)) ;
  Temp = 1./(A + B*logR) - 273.15 ;
```

Misure di temperatura: performance

- Calibrazione dello "zero" (0 °C), con acqua distillata in equilibrio tra fase liquida e solida
  - e.g. `https://www.youtube.com/watch?v=KYOJayWqB3g`
  - c'è un "offset" sistematico nelle misure?
- Quali altri riferimenti "sicuri" si possono prendere per la calibrazione?
- Tempo di rilassamento: il sensore deve andare all'equilibrio termico con il mezzo, $T(t) \sim T_0 e^{t/\tau} + T_{fin}$ dove τ dipende dalla sua capacità termica
  - Siete in grado di misurare τ dai dati delle vostre eperienze?
- Contributi alla risoluzione:
  - Precisione dei componenti – effetti sistematici
  - Granularità dell'ADC – risoluzione strumentale
    - Se fate i conti bene dovreste trovare una risoluzione $\Delta T \sim 0.1 - 0.2$ °C.

Esercizio (per i volenterosi)
Ricavare il contributo alla risoluzione in T legato all'ADC

Sappiamo che:

- L'ADC legge una tensione da 0 a Vcc (5V) in 1024 passi
- La resistenza del termistore si ricava quindi come:

$$R_T = R(1023/x - 1) \tag{3}$$

  con $R = 10000\ \Omega$ e $\Delta x = 1$
- La temperatura (in gradi kelvin) si ottiene con:

$$T = \frac{1}{A + B \cdot ln(R_T)} \tag{4}$$

  con $A = 8.65 \cdot 10^{-4}$ e $B = 3.55 \cdot 10^{-4}$ (trascurando C in eq. 1)

Siamo in grado di propagare l'incertezza ΔT al variare di T?

- Usando le formule sacre
- Studiando $T(x+1) - T(x)$ in maniera numerica

Misure di tempo: timer

- Tutte le operazioni interne del micro sono sincronizzate da un oscillatore interno: il *clock*
  - Con un periodo nominale di 16 MHz
  - Ovvero un "segnale" ogni 0.0625 μs (=1/16)
- Un *timer* è un contatore che viene incrementato dal clock e può essere utilizzato per misurare i tempi
- La libreria di Arduino fornisce le funzione per ottenere il tempo relativo dall'accenzione (reset) del dispositivo:
  - "millis()": `https://www.arduino.cc/en/Reference/Millis`
    - restituisce un *unsigned long*
    - overflow dopo circa 50 giorni
  - "micros()": `https://www.arduino.cc/en/Reference/Micros`
    - restituisce un *unsigned long*
    - granularità nominale di 4 μs
    - overflow dopo circa 70 minuti

- Esercizio: insieme alla misura di temperatura, fatevi restituire anche il tempo di acquisizione
  - Notare che il tempo di acquisizione ed il momento in cui il dato arriva al PC possono essere diversi

Misure di tempo: interrupt

- Un "interrupt" è un meccanismo dei processori per reagire ad un input esterno asincrono (ed interrompere la normale attività)
  - Si può attivare, ad esempio, quando un pin cambia stato
    - 2 pins disponibili in Arduino UNO per questa funzione
  - Si può programmare con la funzione "attachInterrupt()": `https://www.arduino.cc/en/Reference/AttachInterrupt`
- Esercizio: accendere un LED con un interrupt sul pin 2:

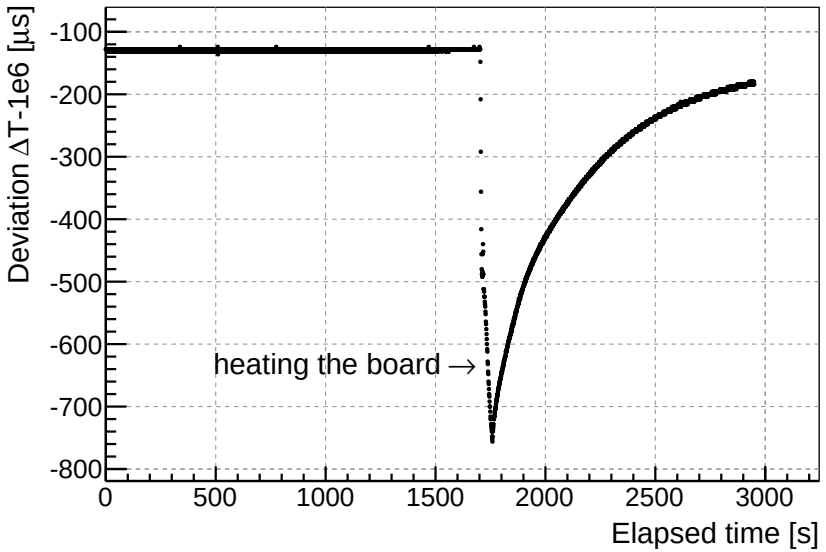
```
const byte LED = 13;
const byte BUTTON = 2;

void switchPressed () // Interrupt Service Routine (ISR)
{
  if (digitalRead (BUTTON) == HIGH)
    digitalWrite (LED, HIGH);
  else
    digitalWrite (LED, LOW);
}  // end of switchPressed

void setup ()
{
  pinMode (LED, OUTPUT);  // so we can update the LED
  pinMode(BUTTON, INPUT_PULLUP); // internal pull-up resistor
  attachInterrupt (digitalPinToInterrupt (BUTTON), switchPressed, CHANGE);  // attach inter
}  // end of setup

void loop () {} // loop doing nothing
```

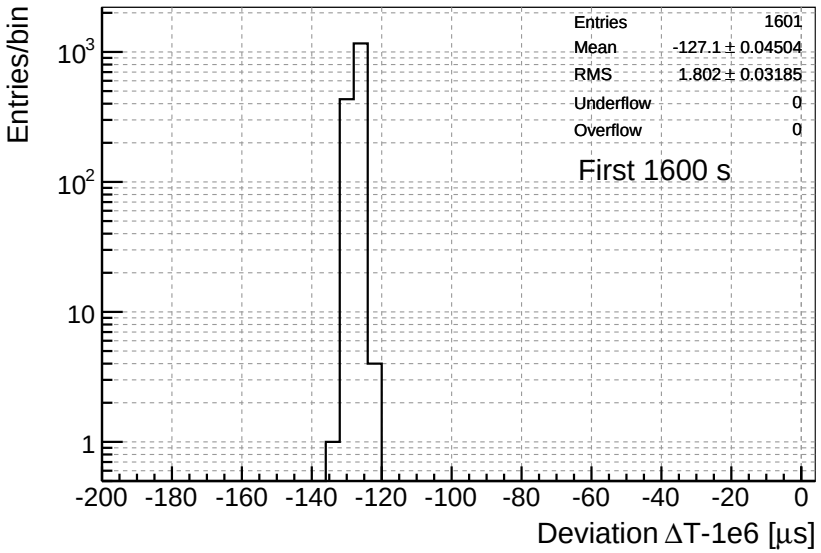
Misure di tempo: interrupt

- Gli iterrupt sono facili da usate, ma possono essere complicati da gestire
  - *delay()* non funziona all'interno sdi un interrupt
  - *millis()* non si incrementa
  - Le variabili utilizzate nell'interrupt devono essere dichiarate *volatile*
- Esercizio: leggere un tempo quando il pin 2 cambia stato.

```
volatile unsigned long t;
volatile int state;
const byte BUTTON = 2;

void switchPressed () // Interrupt Service Routine (ISR)
{
  t = micros();
  state = digitalRead(BUTTON);
  Serial.print(t); //prints time since program started
  Serial.print(" "); // separator
  Serial.println(state); // Pin state just after the trigger
}  // end of switchPressed

void setup ()
{
  Serial.begin(9600); // initialize serial communication
  pinMode(BUTTON, INPUT_PULLUP);
  attachInterrupt (digitalPinToInterrupt (BUTTON), switchPressed, CHANGE);  // attach inter
}  // end of setup
void loop () {} // loop doing nothing
```

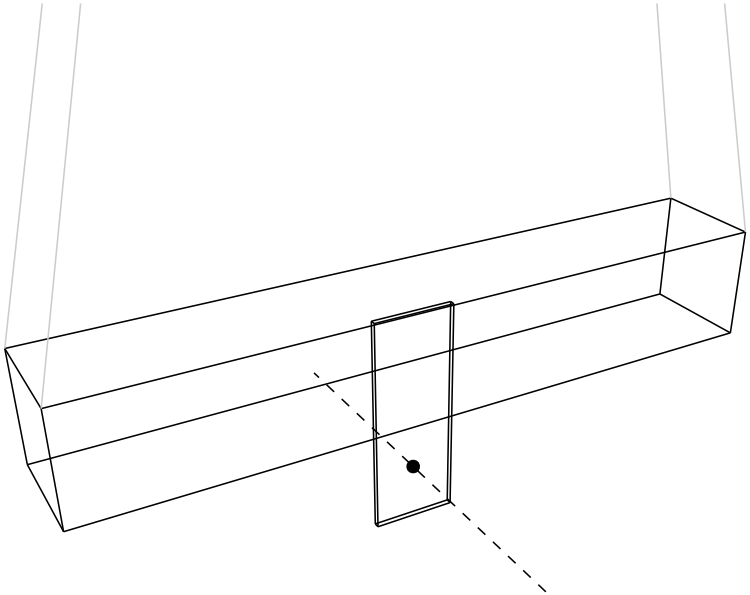
Misure di tempo: performance



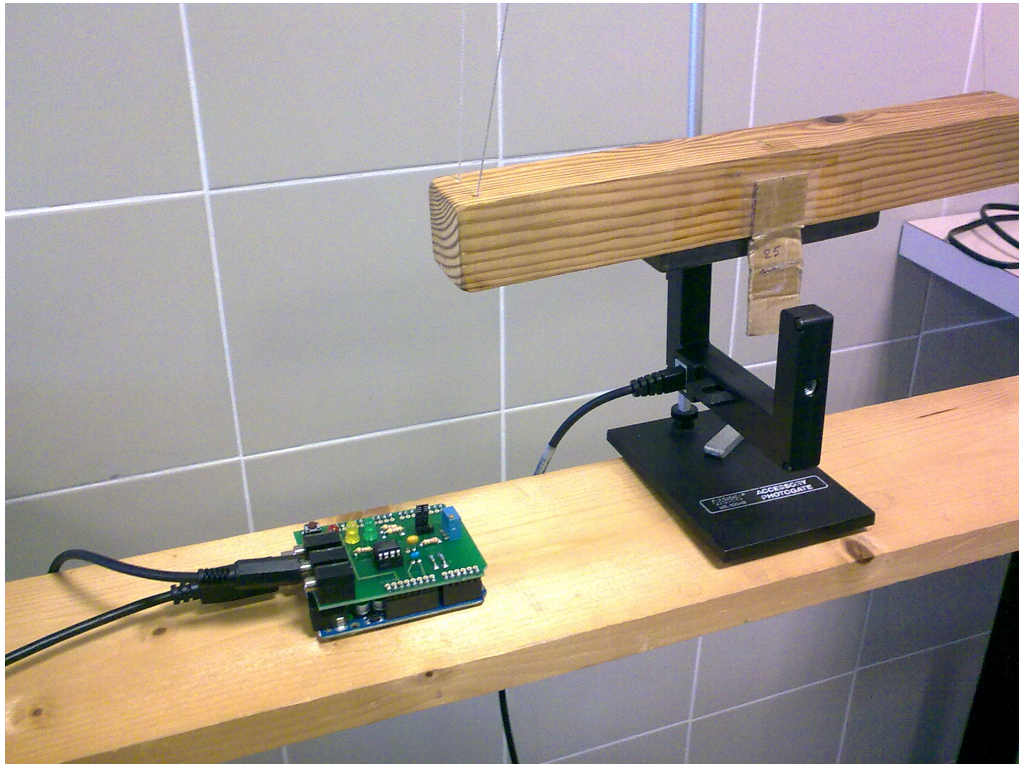


- Testato in laboratorio il 1PPS (1 pulse-per-second) di un GPS:
  - RMS dell'intervallo misurato tra due 1PPS successivi di 1.8 μs, non lontano da $4/\sqrt{12}$ μs.
  - Deviazione media dal valore nominale di $\sim$ 100 μs (su 1 s) a temperatura ambiente.
- La granularità di 4 μs è *vera*
- Qual'e' l'incertezza sulla singola misure di tempo?
  - Incertezza strumentale più piccola delle fluttuazioni statistiche tipiche
  - Fate tante misure; studiate media e RMS...

Un esempio: il pendolo "digitale"

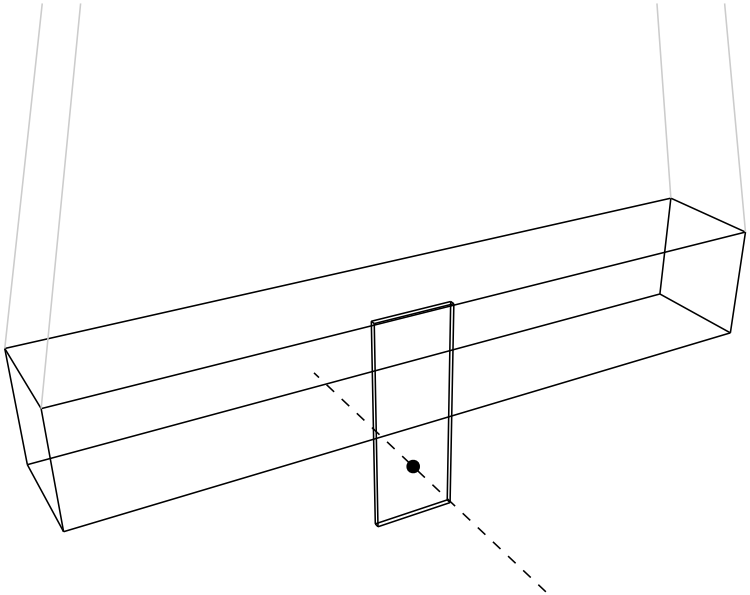


Traguardo ottico

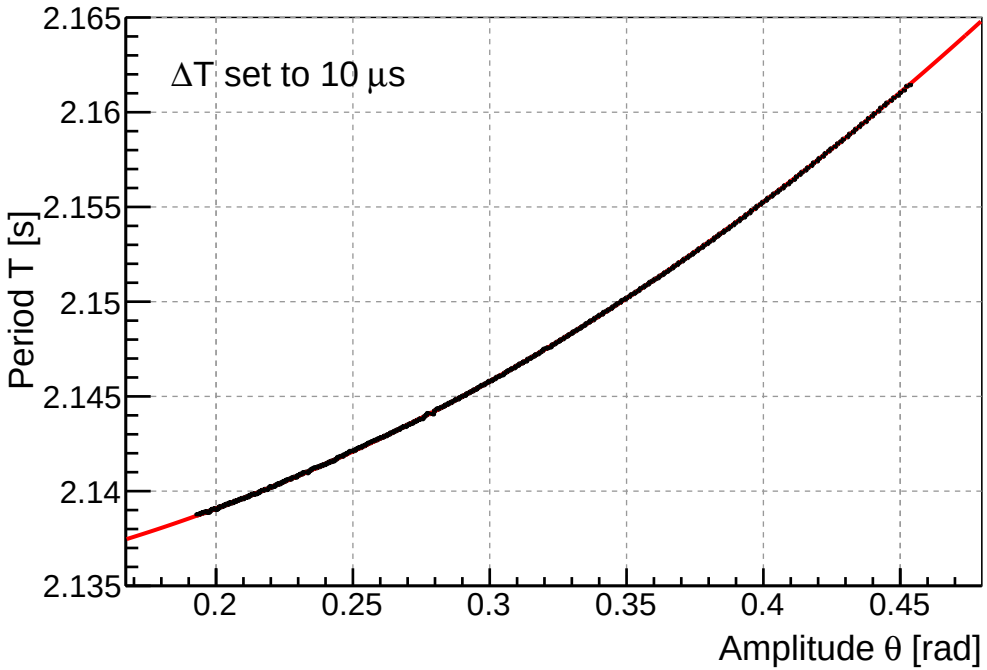


- Misura del periodo T e del tempo di transito t_{T} di una bandierina (di larghezza misurabile) nel punto più basso.
  - Misura dello smorzamento esponenziale (?)
- Trascurando le perdite di energia in una oscillazione possiamo stimare l'ampiezza θ_{max}.
  - Misura dell'anarmonicità del pendolo.
  - Si apprezza chiaramente il termine in θ^4!

Un esempio: il pendolo "digitale"

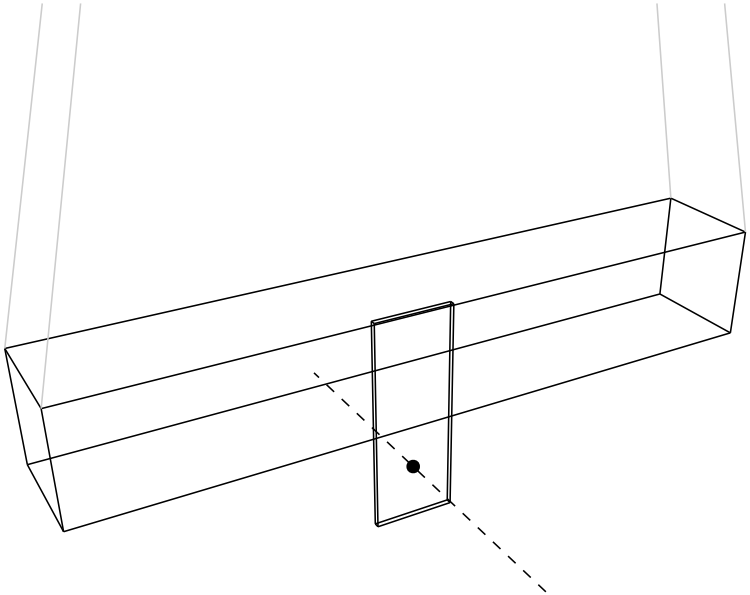


Traguardo ottico

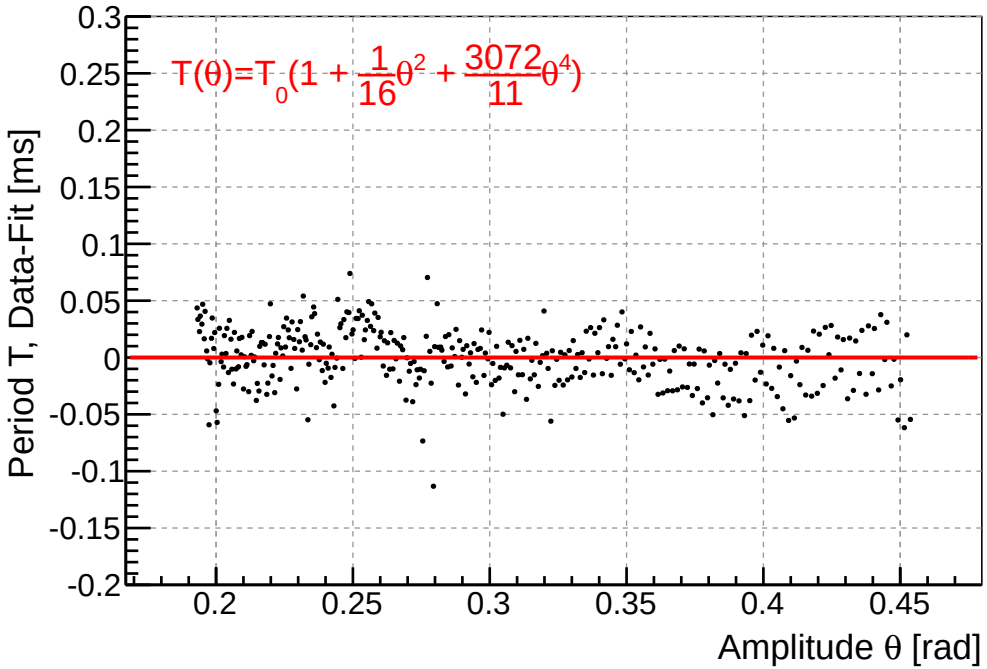


- Misura del periodo T e del tempo di transito t_{T} di una bandierina (di larghezza misurabile) nel punto più basso.
  - Misura dello smorzamento esponenziale (?)
- Trascurando le perdite di energia in una oscillazione possiamo stimare l'ampiezza θ_{max}.
  - Misura dell'anarmonicità del pendolo.
  - Si apprezza chiaramente il termine in θ^4!

Un esempio: il pendolo "digitale"

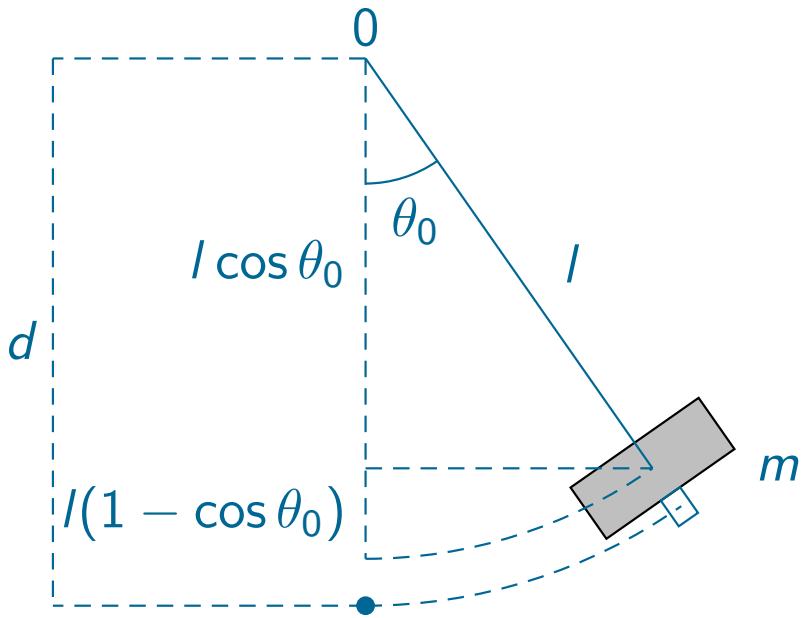


Traguardo ottico



- Misura del periodo T e del tempo di transito t_{T} di una bandierina (di larghezza misurabile) nel punto più basso.
  - Misura dello smorzamento esponenziale (?)
- Trascurando le perdite di energia in una oscillazione possiamo stimare l'ampiezza θ_{max}.
  - Misura dell'anarmonicità del pendolo.
  - Si apprezza chiaramente il termine in θ^4!

Il pendolo quadrifilare in Laboratorio 1



Formule utili:
$v = (w/t_{\mathrm{T}}) * (l/d)$
conservazione energia:
$mgl(1-\cos\theta_0) = \frac{1}{2}mv_0^2$
da cui:
$\theta_0 = \arccos\left(1 - \frac{v_0^2}{2gl}\right)$

- L'ambiente "plasduino": il nostro DAQ per gli studenti
  - Modulo "pendulum"
- Per questa esperienza salva su file di testo:
  1. indice progressivo della transizione
  2. flag del tipo di transizione: 0/1 se la bandierina entra/esce
  3. tempo assoluto della transizione t
- Da questi dati si possono ricavare il periodo di oscillazione T, ed il tempo di transito t_{T}.
  - Dopo aver misurato la larghezza w della bandierina
  - Per i da 3, in passi di 4:
    $t_{\mathrm{abs}} = (t_i + t_{i-1})/2$
    $t_{\mathrm{T}} = (t_i - t_{i-1})$
    $T = (t_{i+1} - t_{i-3})$ (ci sono altri modi?)