



UNIVERSITÀ DI PISA

CORSO DI LAUREA IN FISICA

LABORATORIO DI FISICA 3

LEZIONE 1

Prof. Francesco Forti

Scopi del corso di Laboratorio 3

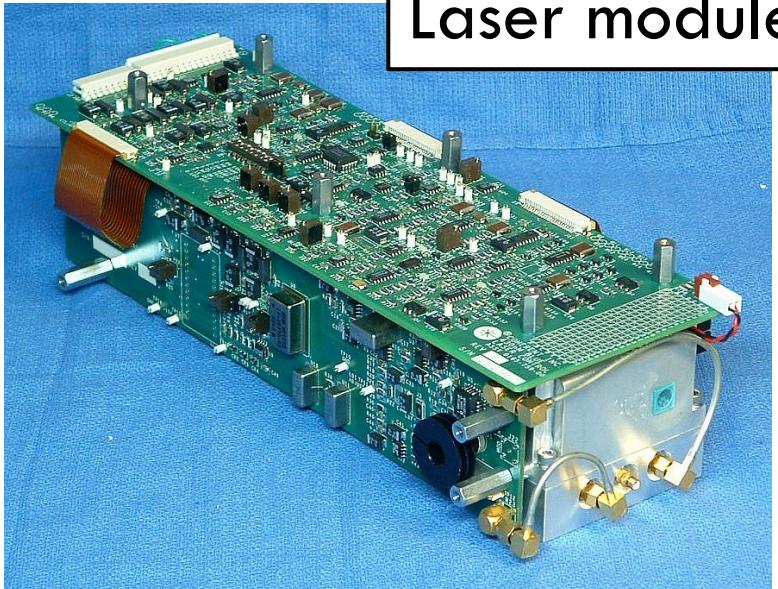
2

- Acquisire le conoscenze di base sulle basi fisiche dei dispositivi elettronici a semiconduttore e le capacità pratiche di base per progettare, montare ed analizzare semplici circuiti elettronici analogici e digitali.
- Acquisire il senso critico e la capacità di fare il debug di un apparato sperimentale.
- Approfondire le difficoltà sperimentali legati alla misura in circuiti elettronici e in esperienze di fisica fondamentale.
- Imparare a scrivere una relazione scientifica sintetica e comprensibile.

Perchè elettronica

3

- Essenziale in qualunque sistema moderno di misura
- Importante conoscerne abbastanza per sapere cosa si può e non si può fare.



Laser module

Belle II @ KEK, Japan

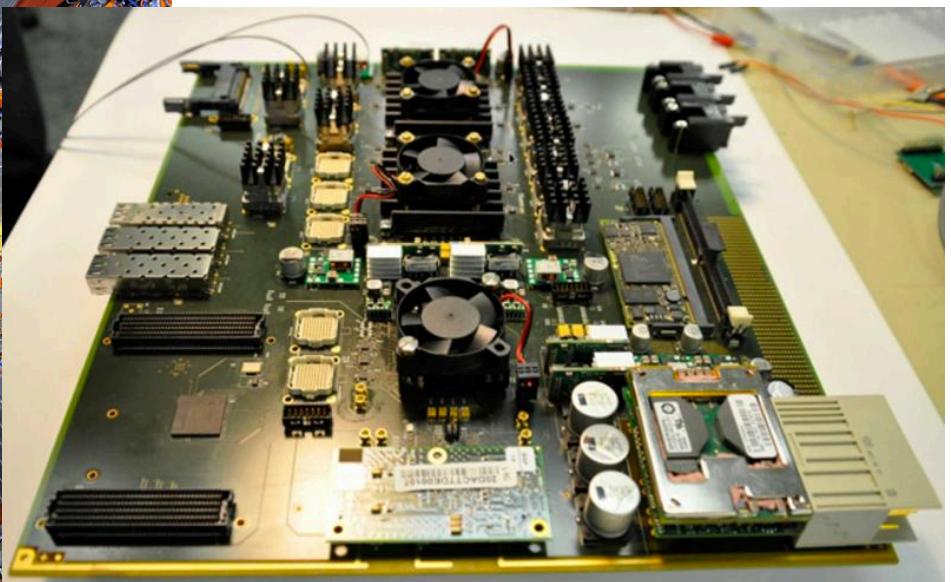
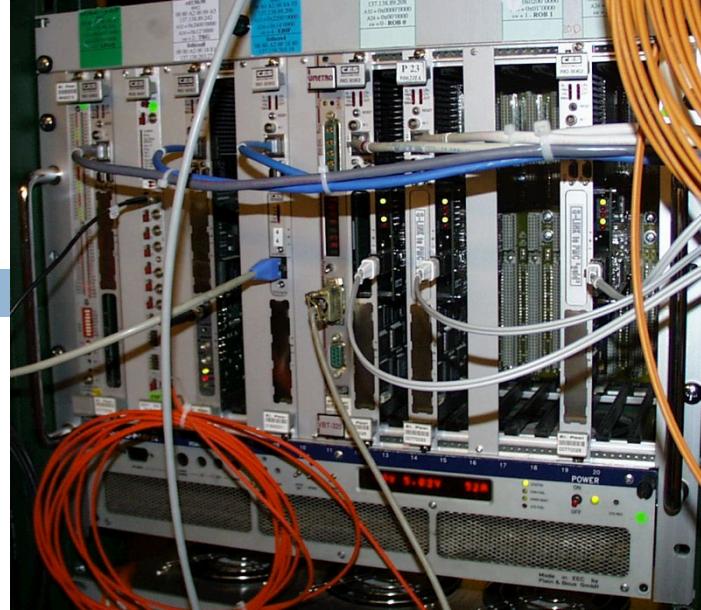
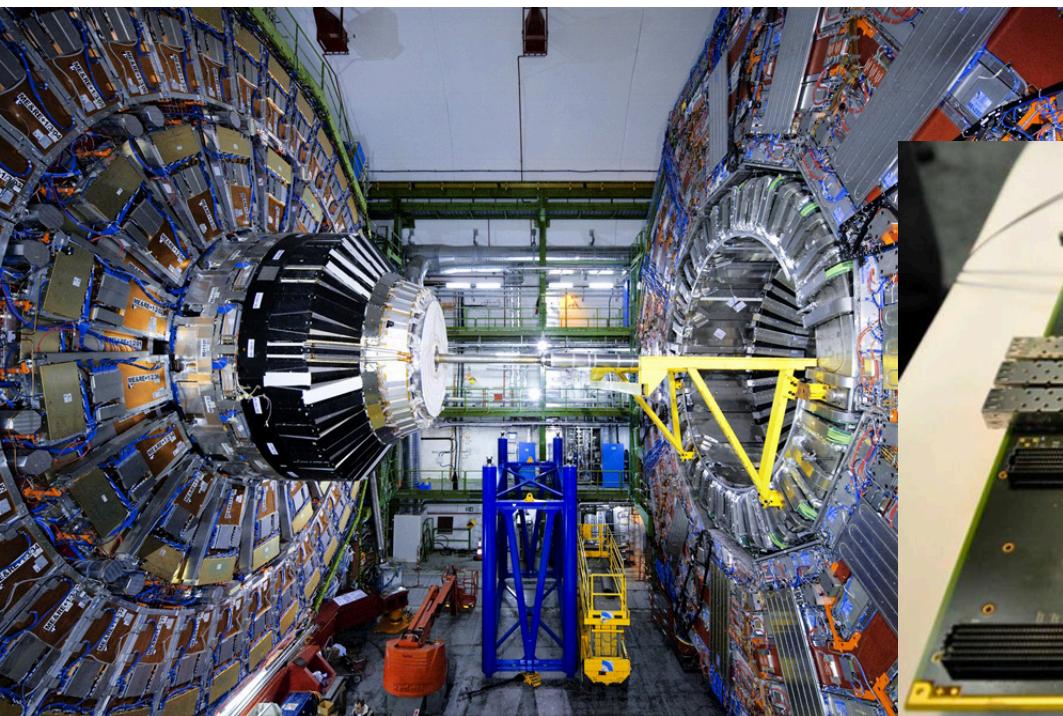


Babar @ SLAC, US

Elettronica ovunque

4

□ CMS, ATLAS @ CERN



Differenze e similarità con TecDig

5

- In entrambi i corsi si studiano i dispositivi elettronici di base, i circuiti logici, e si eseguono esperimenti di fisica moderna confrontando analizzando le misure effettuate e confrontandole con la teoria.
- Nel corso di Tecnologie Digitali si utilizza estensivamente il computer per l'acquisizione dati, utilizzando il software labview, ed il software matlab per l'analisi dati. Inoltre in TecDig l'accento è messo sui sensori di grandezze fisiche e sulle richieste di circuiti elettronici utili per condizionare il segnale e trasferirlo ai sistemi di acquisizione.
- Nel corso di Laboratorio 3 maggior tempo e' invece dedicato all'approfondimento delle basi fisiche di funzionamento dei dispositivi a semiconduttore e al montaggio e debug di circuiti relativamente complessi che possono trovare applicazione in esperimenti di fisica.

Struttura del corso

6

- 12 CFU Corso annuale
- Lezioni teoriche su elettronica analogica e digitale
 - Perché l'elettronica è ormai necessaria per qualunque apparato sperimentale.
- Esercitazioni di elettronica
 - Montaggio di circuiti inizialmente semplici e progressivamente più complessi.
 - Debug, misura, analisi dei dati, relazione
- Esperienze di fisica moderna
 - Alcuni esperimenti sui fondamenti della meccanica quantistica, di ottica fisica, sulle proprietà dei materiali

Prerequisiti e propedeuticità

7

- Prerequisiti
 - Conoscenze di base di meccanica ed elettromagnetismo. Circuiti elettrici. Uso della strumentazione elettronica di base (multimetro ed oscilloscopio). Competenze di calcolo differenziale e algebra lineare.
- Propedeuticità
 - Laboratorio 2. Anche se non richiesto dal regolamento, è fortemente consigliato aver superato gli esami di Fisica 1 e Fisica 2 e di aver almeno seguito il corso di Metodi matematici 1

Programma – Lezioni di elettronica

8

- Introduzione metodologica
- Circuiti lineari - Richiami di teoria dei circuiti.
- Dispositivi a semiconduttore – Diodo
- Dispositivi per amplificazione - Transistor
- Reazione (feedback).
- Amplificatori operazionali (OpAmp)
- Circuiti digitali
- Logica combinatoria
- Logica sequenziale
- Macchina a stati finiti (FSM).
- Circuiti integrati logici complessi
- Circuiti per la conversione analogica/digitale (ADC)

Programma – Esercitazioni

9

- Circa 30 esercitazioni di laboratorio distribuite su 18 settimane.
 - Lavoro in gruppi di 2/3 persone su quattro stanze
 - Applicazioni pratiche di quanto discusso a lezione
 - Circuiti elettronici più o meno complessi da progettare, montare, misurare.
 - Alla fine di ogni esercitazione si deve consegnare una relazione (settimanale)
 - Le relazioni vengono corrette e riconsegnate
 - La valutazione sulle relazioni è parte integrante della valutazione di esame.
- Le esercitazioni sono uguali per tutti

Il programma – Esperienze

10

- Si realizzeranno alcune esperienze che ripercorrono esperimenti di fisica fondamentale.
 - Non come dimostrazioni. Sviluppo del senso critico.
- Esperienze
 - Misura del rapporto e/m – SI
 - Esperienza di Franck-Hertz - SI
 - Misura dell'effetto photoelettrico – SI
 - Righe di Balmer - costante di Rydberg – SI
 - Misure di lunghezza d'onda, interferometro di Michelson – SI
 - Energy gap nei semiconduttori – FORSE
- Ogni gruppo ne farà solo alcune (3-4 al massimo)
 - Dipende dal numero di studenti
- Periodo: febbraio-marzo all'inizio del secondo periodo

Testi e materiale didattico

11

- Appunti delle lezioni – verranno messi sul sito
 - Slides (non sempre), oppure appunti scritti a mano
 - Pericolo: spegnere il cervello pensando che tanto c'è il materiale delle lezioni
→ non funziona
- Testi consigliati: <https://sites.google.com/site/lab3fisicaforti/corso/testi>
- Elettronica:
 - J. Millman, "Sistemi e circuiti microelettronici", Bollati-Boringhieri
 - P.Horowitz, W.Hill: "The art of electronics", II ed. (Cambridge University Press)
 - V. Flaminio et al., "Introduzione all'elettronica: parte I e parte II ", Edizioni ETS (pdf Vol1, pdf Vol2)
 - R. Katz, G. Borriello, "Contemporary Logic Design", 2nd edition, Pearson Prentice Hall
- Statistica e probabilità:
 - Bevington, "Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences", McGraw-Hill,
 - Frodesen-Kjeggestad, "Probability and statistics in particle physics", out of print
 - Papoulis, "Probability, Random Variables, and Stochastic Processes", McGraw-Hill
 - Lyons, "A Practical Guide to Data Analysis for Physical Science Students", Cambridge university press
 - Bohm-Zech. "Introduction to Statistics and Data Analysis for Physicists",

Orari

12

	Lu	Ma	Me	Gi	Ve
Lezione	12- 13 F1	12-13 F1			12-13 B1
Esercitazione	15-19	15-19 recup.		15-19	

- Di norma il lunedì' e martedì' presento argomenti nuovi
- Il venerdì' e' utilizzato per: discutere esercitazione settimana precedente e preparare esercitazione successiva.
- Le ore del pomeriggio potranno essere utilizzate anche per le lezioni in certe settimane.
- Frequenza alle esercitazioni obbligatorio. In caso di assenza si può recuperare il martedì.
 - Vengono prese le presenze individuali a ciascuna esercitazione.
- Frequenza alle lezioni: obbligatoria, anche se non prendo le presenze

Docenti

13

- Francesco Forti (Titolare)
- Giorgio Carelli
- Simeone Dussoni
- Andrea Fioretti
- Donato Nicolò
- Eugenio Paoloni
- Matteo Rama
- Così tanti per garantire la presenza durante le esercitazioni che si svolgono su 4 aule

Studenti

14

- Ad oggi mi risultano 74 iscrizioni
- Controllate nel foglio che faccio circolare
- Abbiamo 26 tavoli:
 - Gruppi: $22 * 3 + 4 * 2$
- Attenzione: la frequenza al corso di laboratorio impegna risorse (umane e strumentali). Non lo fate tanto per fare, tanto per seguire un corso.

Interazione

15

- Per me è molto importante poter comunicare efficacemente con voi.
- Sito: <https://sites.google.com/site/lab3fisicaforti/>
 - NB: quest'anno transiamo a elearning.df.unipi.it, ma vi manderò un messaggio in proposito
- Dal sito df: <http://www.df.unipi.it/cms/users/francesco-forti>
- Email: Francesco.Forti@pi.infn.it
 - Assistente di lab: Fabrizio Tellini, tellini@df.unipi.it
- Telefono: 050-2214341
- Ricevimento: **a richiesta e su appuntamento**

Esame

16

- Valutazione relazioni
 - Parte integrante dell'esame
- Prova pratica
 - Un circuito simile a quelli studiati durante l'anno
 - Probabilmente sarà possibile fare delle prove in itinere che la sostituiscano. Da valutare organizzativamente
- Colloquio
 - Su tutto.
- Appelli: 3 tra maggio e luglio, 1 settembre, 1 gennaio
- Da fare il prima possibile.

Gruppi e relazioni

17

- Dobbiamo formare gruppi di 2-3 persone, lavorando su 4 stanze
- I gruppi cambieranno all'inizio del secondo periodo, per permettervi di imparare ad interagire con più persone.
- Relazioni (settimanali):
 - Sono di gruppo, ma devono indicare comunque i nomi delle persone effettivamente presenti
 - Ricordate che all'esame siete da soli, quindi nel lavoro di gruppo turnatevi i ruoli.
- Se mancate ad una esercitazione, potete recuperare il martedì e consegnare una relazione individuale
- Le relazioni si consegnano a Tellini che le registra e le archivia.
- Vengono corrette e valutate e vi vengono riportate, spiegate e discusse.
- Dopo la correzione e la discussione, rimangono in laboratorio
- Il Venerdì discutiamo in aula di quali sono stati i punti critici

Tempi e consegna

18

- La stesura delle relazioni può portarvi via molto tempo, se glielo permettete.
 - Uno dei problemi individuati negli anni passati
- Necessario un buon compromesso tra accuratezza/lunghezza/tempo impiegato
 - Necessario nella vita reale, in cui bisogna riuscire a fare quello che serve nel (poco) tempo a disposizione
- La stesura delle relazioni, a mano od elettronica, deve avvenire durante le ore di laboratorio
- Regola: le relazioni devono essere consegnate **entro il lunedì mattina**.
 - Di preferenza il giovedì pomeriggio della esercitazione
 - Verranno riconsegnate il lunedì successivo (o prima se ce la facciamo)
- Violazioni: scariche elettriche sulle dita !

Relazioni

19

□ Che cosa sono

- Le esercitazioni si concludono con la consegna di un elaborato scritto.
- Alle relazioni viene assegnato un giudizio/voto che vi permette di valutare i vostri progressi (si richiede la firma dei presenti) e concorre a formare il giudizio finale.

□ Come scrivere delle buone relazioni

- La relazione e' il rapporto di una attivita' sperimentale: il requisito fondamentale e' la chiarezza. Quasi un articolo scientifico su piccola scala: importante imparare.
- Principio di riproducibilita': ci deve essere abbastanza informazione perche' un altro possa riprodurre in dettaglio la stessa esperienza. Seguite lo schema indicato nella scheda dell'esercitazione
- Non aspettate a scrivere fino a quando "il lavoro e' finito". La relazione e' utile se scritta mentre si lavora. Aiuta anche a lavorare con la necessaria sistematicita'.
- A mano o computer ? Scegliete voi, ma non cercate la raffinatezza grafica.
- Vi verrà fornito uno schema-esempio per facilitare la stesura all'inizio

Onestà scientifica

20

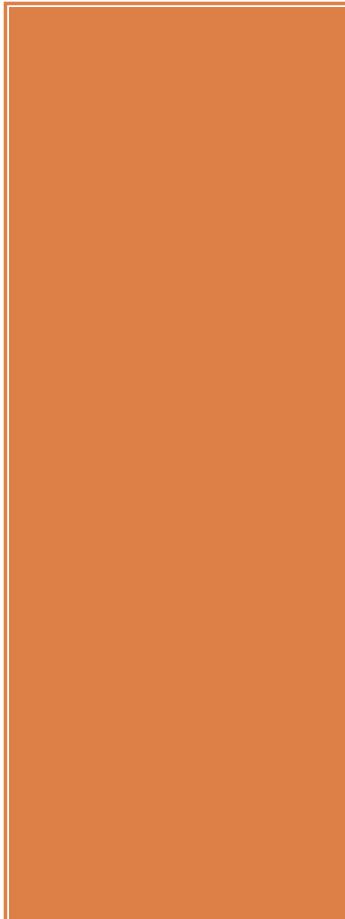
- Nel loro piccolo le esercitazioni sono dei piccoli esperimenti scientifici
- Essenziale l'onestà scientifica (e morale) nel preparare la relazione. Non si possono taroccare i dati, né prenderli dal vicino
- Qualche volta i risultati possono non essere come ci si aspetta. E' importante documentare con precisione quello che e' stato fatto e quello che si è osservato, piuttosto che cercare di "far tornare".
 - Pero' bisogna imparare ad accorgersi quando si è fatto qualche errore
- Spesso si richiede di interpretare le discrepanze da quanto aspettato
 - Sviluppo del senso critico che la realtà è sempre più complicata del modello
 - Tentare un'interpretazione è utile, ma senza perderci il sonno
 - Se ne cerchera' di discutere il venerdi'

Esempi di relazioni

21

Tavolo di lavoro

22



Strumentazione

23

- Alimentatore
- Multimetro digitale
- Oscilloscopio digitale
- Generatore di funzioni
- Basetta per il montaggio
- PC

- USATE LA DOCUMENTAZIONE
 - Presente sul PC

Limiti della strumentazione

24

- Una strumentazione ideale:
 - Non altera il funzionamento del circuito che misura
 - Ha una risposta che non dipende dalla frequenza
 - Eroga tensioni/correnti che non dipendono dal carico
- Strumentazione reale:
 - Impedenza di ingresso: altera il funzionamento del circuito quando inserita
 - Impedenza di uscita: la tensione/corrente erogata dipende dal carico
 - Risposta in frequenza con banda passante finita

Software analisi

25

- I PC (Windows) sono dotati di vari sw installati
 - Tutti freeware, installabili sui propri computer a casa
- Visualizzazione ed analisi dati
 - Elemento fondamentale per estrarre informazioni dalle misure effettuate
- Python 3 – distribuzione
<http://pyzo.org>
 - molto usato in molti campi, linguaggio di scripting completo e sofisticato
 - Contiene librerie numpy, scipy, matplotlib
- Dovreste ormai conoscerlo da Lab1 e Lab2



PYZO: PYTHON TO THE PEOPLE

Software simulazione

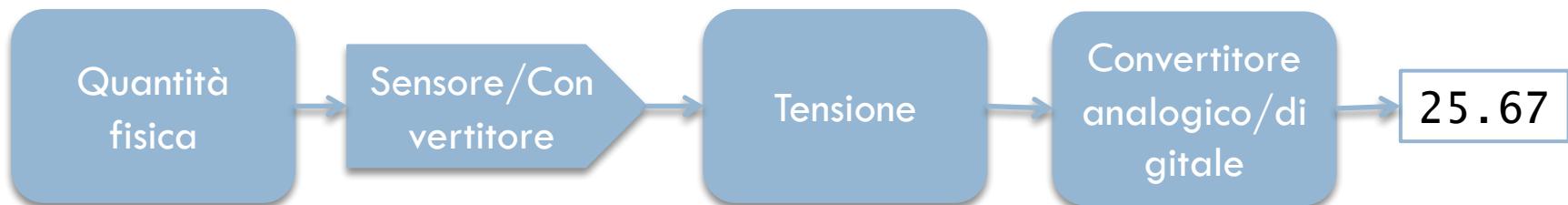
26

- Simulazione circuiti elettronici
 - Fondamentale per la realizzazione di circuiti reali.
 - Molto utile per capire i circuiti e verificare i propri conti
 - Da NON esagerare nell'uso: e' un corso di laboratorio !
- Falstad, Java-based (<http://www.falstad.com/circuit/>)
 - Molto semplice, simula componenti ideali, ma visivamente molto efficace per capire cosa succede. Lo useremo anche a lezione.
 - Non permette simulazioni dettagliate
- LTSpice (Linear Technologies: <http://www.linear.com/design-tools/software/>)
 - Basato sul simulatore analogico standard “SPICE” che permette la modellizzazione dei componenti anche molto sofisticata
 - Analisi nel dominio del tempo o della frequenza
- System vision (Mentor Graphics: <http://systemvision.com/>)
- Ci sarà un tutorial, ma è lasciato alla vostra iniziativa utilizzare molto o poco questi strumenti. Non sono necessari per l'esame.

Misure

27

- Effettuerete molte misure di quantità fisiche
- Il principio di base è sempre più o meno lo stesso



- Ciascun passaggio introduce possibili errori di misura
- L'errore NON è semplicemente l'ultima cifra mostrata, ma dipende dallo strumento e dai passaggi intermedi

Errori

28

- Non errore di sbaglio, ma incertezza di misura.
- Desiderabile che sia la minima possibile
 - Se potete fare una misura più precisa di un'altra, dovete cercare di farla.
- Errore massimo: identifica l'intervallo entro cui sicuramente cade il valore “vero” della quantità misurata.
- Se dico $V_1 = 2.35 \pm 0.02$ V significa che $2.33 \text{ V} < V_1 < 2.37 \text{ V}$.
- In altri contesti l'errore può indicare la deviazione standard della distribuzione oppure un intervallo con un certo confidence level (ad esempio CL>90%)
- Bisogna sempre riflettere sul significato dell'errore quando si utilizza una misura.

Sorgenti di incertezza nelle misure

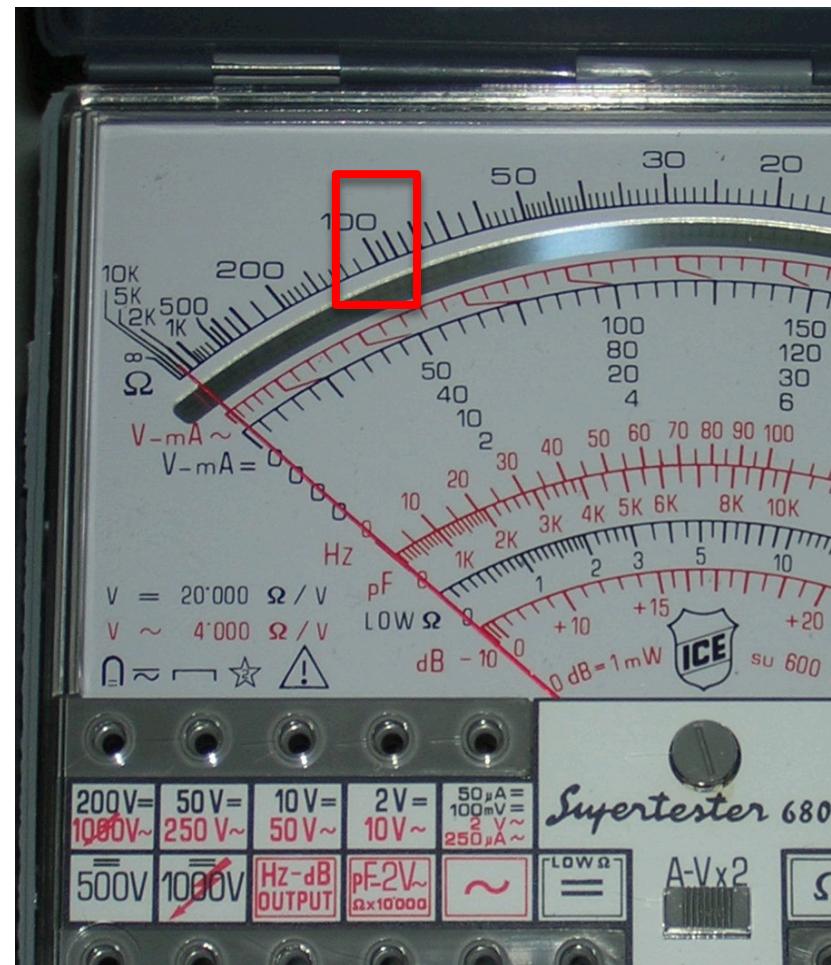
29

□ Risoluzione

- Nella conversione analogica/digitale oppure nella lettura analogica di una scala
- Ad esempio se faccio una conversione a 10 bit ($2^{10}=1024$) con una scala di 10V, la risoluzione è $10V/1024 = 10 \text{ mV}$. Non posso fare meglio di così.
- Corrisponde circa alla cifra meno significativa di una lettura digitale oppure alla mezza tacca in uno strumento analogico

Risoluzione della lettura

30



Lezione 1

Incertezza nelle misure

31

- Oltre alla risoluzione ci sono molte altre sorgenti di incertezza
- Calibrazione assoluta
 - La trasformazione della lettura in unità fisiche richiede una calibrazione verso uno strumento campione
 - Questa calibrazione ha una sua incertezza
- Ripetibilità
 - Lo strumento può non dare la stessa lettura se si ripete la misura più volte
- Rumore
 - Il rumore, i difetti di connessione etc. introducono ulteriori incertezze

Quale incertezza usare ?

32

- Dovete leggere il manuale !
- Dipende dalla scala
- Ad esempio per il multmetro l'incertezza è (eccetto che per la scala più sensibile)
 - $0.8 \% \pm 1$ cifra. Quindi
 - $1,673 \text{ V} \rightarrow 0.8\% * 1.673 = 0.0128 \pm 0.001 \rightarrow 0.01$
 - $0.167 \text{ V} \rightarrow 0.8\% * 0.167 = 0.001 \pm 0.001 \rightarrow 0.001$
- Oscilloscopio
 - Mezza tacca = 0.1 divisione. Ci sono 8 divisioni verticali e 10 orizzontali.
 - Errore va dall' 1% (0.1 div / 10 div) al 5% (0.1 div/ 2div). Dovete cercare di scegliere la scala migliore
 - Per la misura di tempo il manuale è un po' oscuro, ne parleremo

Componenti

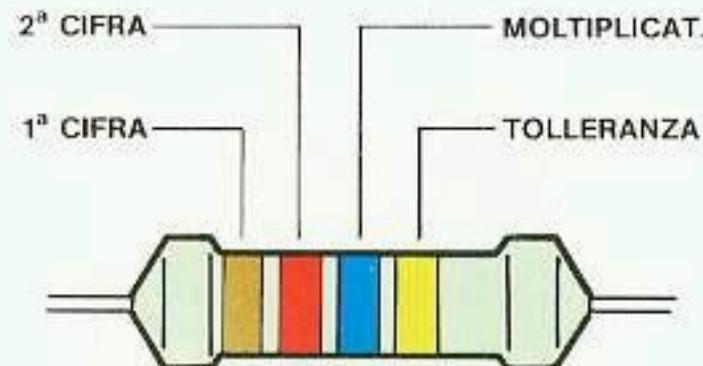
33

- Utilizzerete molti componenti discreti
 - Resistenze, condensatori → li trovate in cassetti appositi
 - Transistor, circuiti integrati → consegnati sul tavolo sulla base della esercitazione
- Le tolleranze sui valori sono tipicamente 10% - 20%
 - Meglio misurare il componente se serve sapere il valore con precisione migliore

RESISTENZE a CARBONE

34

	1 ^a CIFRA	2 ^a CIFRA	MOLTIPLICAT.	TOLLERANZA
NERO	[Black]	-	[Black] 0	[Black] x 1
MARRONE	[Brown]	1	[Brown] 1	[Brown] x 10
ROSSO	[Red]	2	[Red] 2	[Red] x 100
ARANCIONE	[Orange]	3	[Orange] 3	[Orange] x 1.000
GIALLO	[Yellow]	4	[Yellow] 4	[Yellow] x 10.000
VERDE	[Green]	5	[Green] 5	[Green] x 100.000
AZZURRO	[Blue]	6	[Blue] 6	[Blue] x 1.000.000
VIOLA	[Purple]	7	[Purple] 7	[Yellow] ORO: 10
GRIGIO	[Grey]	8	[Grey] 8	
BIANCO	[White]	9	[White] 9	



- Valori standard: 10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82

Propagazione degli errori

35

□ Ripassatela

- somme in quadratura
 $z = f(x, y)$

$$\delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta y\right)^2}$$

Esempio : somme / sottrazioni $z = x \pm y$

$$\delta z = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$$

divisione / moltiplicazione

$$z = xy \quad \delta z = \sqrt{y^2 \delta x^2 + x^2 \delta y^2}$$

$$\frac{\delta z}{z} = \sqrt{\frac{\delta x^2}{x^2} + \frac{\delta y^2}{y^2}}$$

Prossime lezioni e esercitazioni

36

- Lunedì' 26 settembre (aula dovrebbe essere B1)
 - Richiami di teoria dei circuiti
- LAB: Lunedì' 3 ottobre ore 15:00 – 17:00 in aula e poi in laboratorio
 - Strumentazione
 - Sicurezze e comportamento in laboratorio
 - Poi ci si sposta in laboratorio e si iniziano le misure elettriche