



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

## Segnali e Sistemi

(canale 2)

Laurea in Ing. Biomedica

Anno II, secondo semestre, A.A. 22/23

# Informazioni generali



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Docente

## Tomaso Erseghe

[tomaso.erseghe@unipd.it](mailto:tomaso.erseghe@unipd.it)



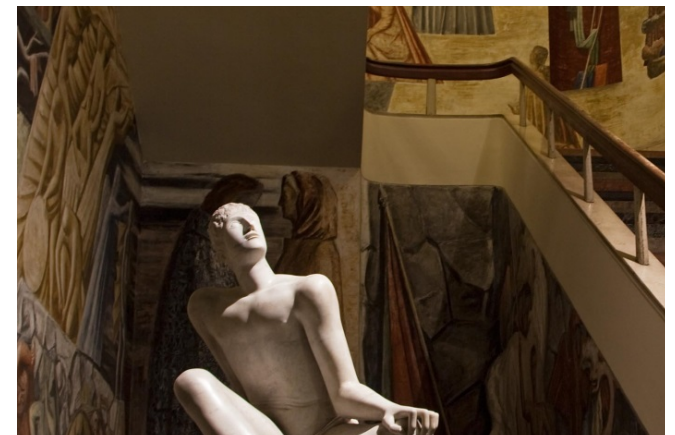
### Orario di ricevimento

#### ***in classe***

durante la pausa, all'inizio e alla fine della lezione

#### ***in ufficio/su zoom***

DEI/A, Il piano, corridoio di destra, interno 7656  
su appuntamento





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Orario lezioni

Lun 10:30-12:00

Mer 10:30-12:00

Gio 8:30-10:00

30 Lezioni

+ 6 Esperienze in Lab (MatLab) 

+ 1 prova di autovalutazione

Dal 27 febbraio 2023

al 31 maggio 2023

No registrazione delle lezioni!







## Marzo 2023

Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
		1 <b>Le2</b>	2 <b>segnali nel tempo</b>	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15 <b>Le8</b>	16 <b>sistemi nel tempo</b>	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30 <b>Le13 trasformata di Fourier</b>	31		

## Aprile 2023

Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
					1	2
3	4	5	6	7	8	9 <b>Pasqua</b>
10	11	12	13	14	15	16
17	18	19	20	21	22	23
24	25	26	27 <b>autovalutazione</b>	28	29	30

## serie di Fourier

## Maggio 2023

Lunedì	Martedì	Mercoledì	Giovedì	Venerdì	Sabato	Domenica
1	2	3	4	5	6	7
8 <b>Le23</b>	9	10	11 <b>teorema del campionamento</b>	12	13	14
15	16	17 <b>Le26</b>	18 <b>trasformata di Laplace</b>	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29 <b>Le30</b>	30	31 <b>trasformata Zeta</b>				



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Libro di testo

***Segnali e Sistemi***  
di Lorenzo Finesso  
Libreria Progetto

Ultima edizione



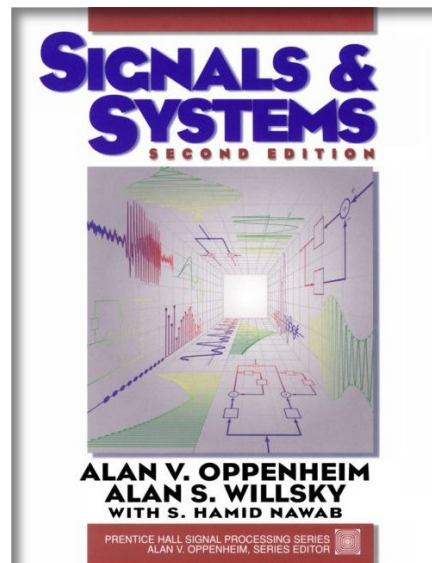
... e appunti dalle lezioni



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Libro di testo (bis)

Signals and Systems, 2<sup>nd</sup> Edition  
by Oppenheim, Willsky, Nawab  
published by Pearson





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

Sito web

stem.elearning.unipd.it

SEGNALI E SISTEMI (Canale 2) 22/23

iscrivetevi subito!

▼ Iscrizione spontanea (Studente)

Non è necessaria una chiave di iscrizione

**Iscrivimi**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO  
DI INGEGNERIA  
DELL'INFORMAZIONE

Bacheche DEI e siti degli i  
SEGNALI E SISTEMI Canale 2 (5-9)

VIPD ORIENTAMENTO ▾

NAVIGAZIONE

HOME / CORSI /

Home  
Dashboard

E-LEARNING

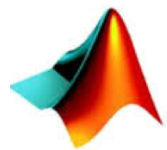




UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# MATLAB

MATrix LABoratory by MathWorks



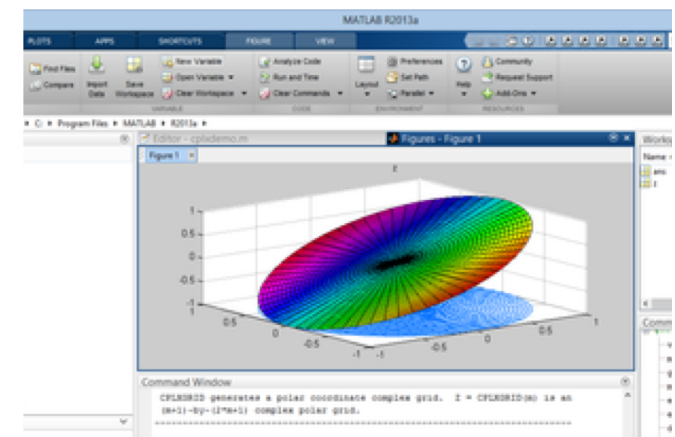
MATLAB *“is a numerical computer environment which allows matrix manipulations, plotting of functions and data, implementation of algorithms”* [wiki]

## Total Academic Headcount

licenza di tipo Campus e Student

Consente agli studenti di accedere a MATLAB attraverso computer dell'università, in tutta la struttura. Gli studenti possono inoltre installare MATLAB sui propri **computer personali**.

<https://www.csia.unipd.it/servizi/servizi-utenti-istituzionali/contratti-software-e-licenze/matlab>





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Aula Taliercio

Ritiro Credenziali

Stesse credenziali del primo semestre !!!







UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Modalità esame

No compiti

1 test di autovalutazione in classe

prova MATLAB (per +2 o lode)

✧ Gio 8 o 22 giugno 2023???, 10:00

4+1 appelli

✧ Lun 19 giugno 2023, 10:00

✧ Gio 13 luglio 2023, 15:00

✧ Bressanone

✧ Mar 5 settembre 2023, 14:00

✧ Ven 9 febbraio 2024, 10:30





Compito scritto  
2h 30min

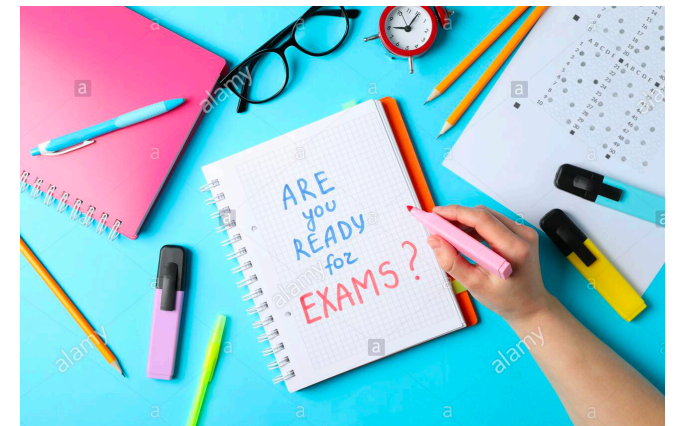
### 3 **esercizi**

- ✧ strutturati come gli anni passati
- ✧ 7 punti ciascuno

### 3 **domande**

- ✧ due sulla teoria, una sul MatLab
- ✧ 3 punti ciascuna

Bonus +2 con la prova MatLab



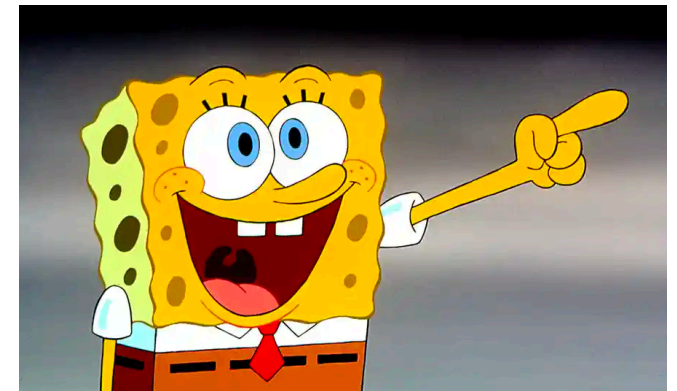


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Commenti degli studenti del 3° anno

*... Vengono date per scontate molte conoscenze di base di Segnali e Sistemi, sebbene sia passato un anno dallo svolgimento di quest'ultimo. ...*

*... quando si utilizzano formule di Segnali e Sistemi bisognerebbe fare un rapido richiamo su quelle cose, senza darle assolutamente per scontate...*



# Contenuti del corso

Una breve rassegna



## signal

[...]

4

a : an object used to ***transmit or convey information*** beyond the range of human voice

b : the sound or image conveyed in telegraphy, ***telephony***, radio, radar, or ***television***

c : ***a detectable physical quantity*** or impulse (as a voltage, current, or magnetic field strength) by which messages or information can be transmitted





## transformation

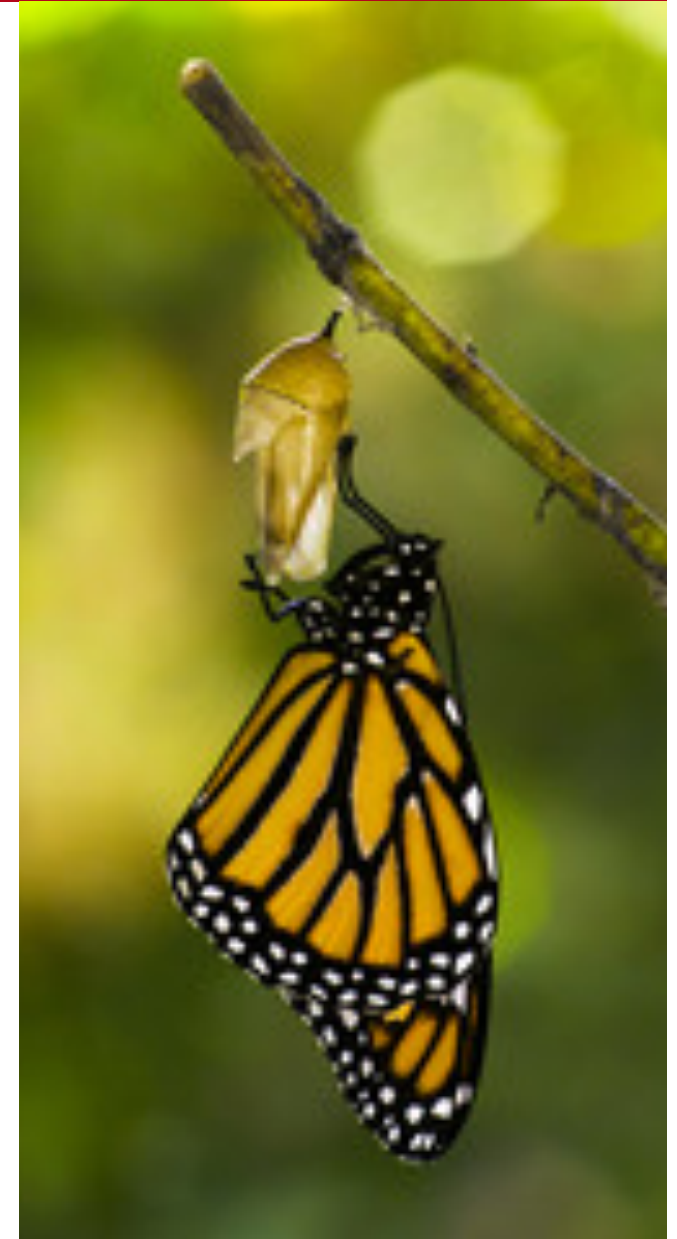
[...]

3

a (1) : the operation of **changing** (as by rotation or mapping) one configuration or expression into another **in accordance with a mathematical rule**; [...]

a (2) : the formula that effects a transformation

b : a **mathematical correspondence** that assigns exactly one element of one set to each element of the same or another set







UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Esempi di segnali

Fisici ed artificiali

Voce umana (fluttuazioni di pressione acustica)



Livello di marea a Venezia





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

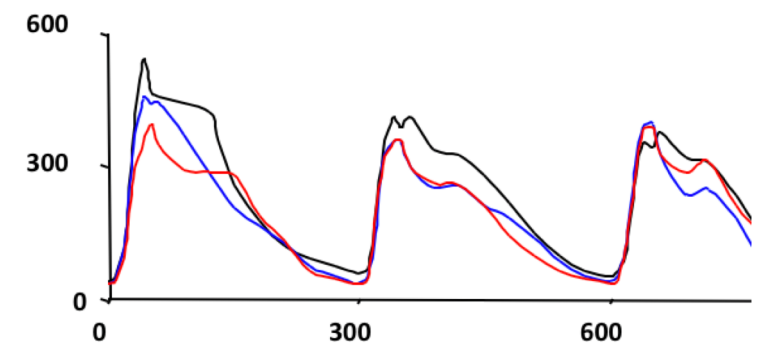
# Esempi di segnali

Fisici ed artificiali

## Elettrocardiogramma



## Concentrazione di insulina nel sangue





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Esempi di segnali

Fisici ed artificiali

Inflazione mensile (artificiale)



Cambio Euro/\$ giornaliero (artificiale)





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

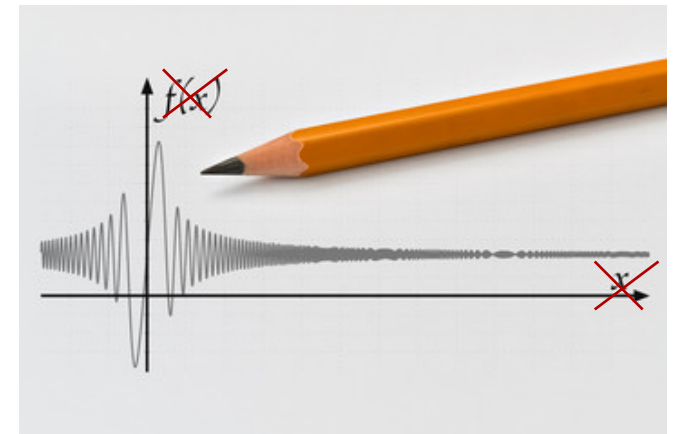
# Modello di riferimento

Il segnale come funzione (che contiene informazione)

La convenzione è definire il segnale come  $s(t)$

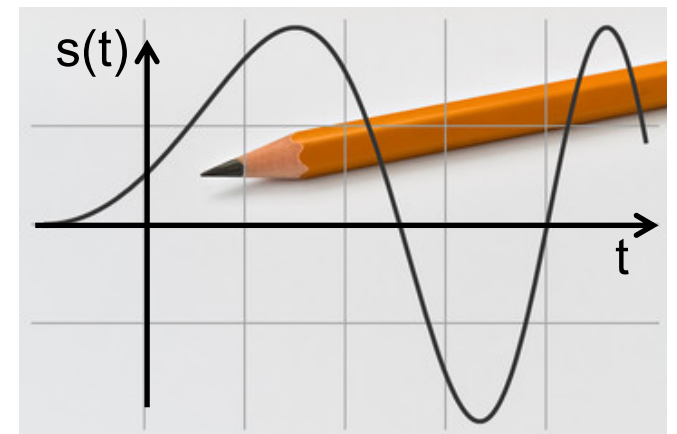
$s$  = segnale

$t$  = tempo (tipicamente, ma non solo... anche spazio)



**dominio** ( $t \in D$ ) e **codominio** ( $s \in C$ ) definiscono la tipologia di segnale

es., segnale **continuo** se  $D = C = \mathcal{R}$  (numeri reali)





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Segnali periodici

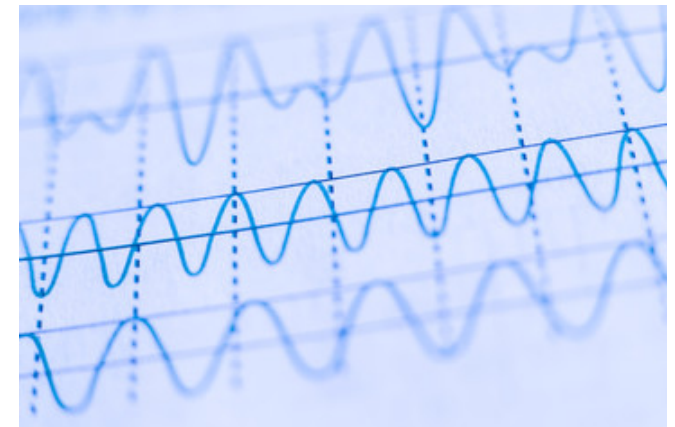
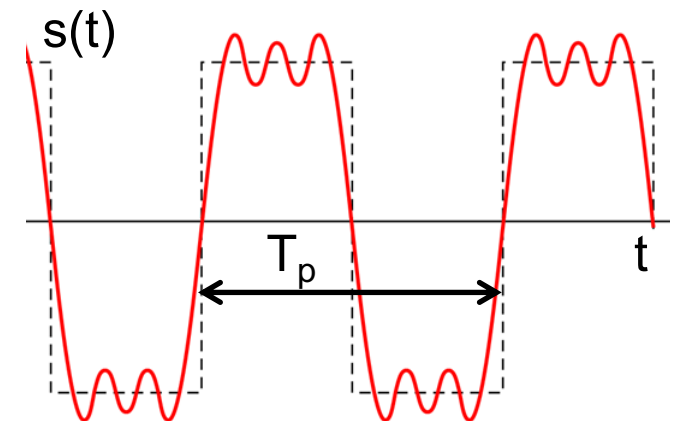
Segnali la cui forma si ripete

Soddisfano la proprietà fondamentale

$$s(t+T_p) = s(t)$$

con  $T_p$  il **periodo del segnale**

... e sono univocamente definiti nell'**intervallo fondamentale**  $[0, T_p)$  o in qualunque altro periodo



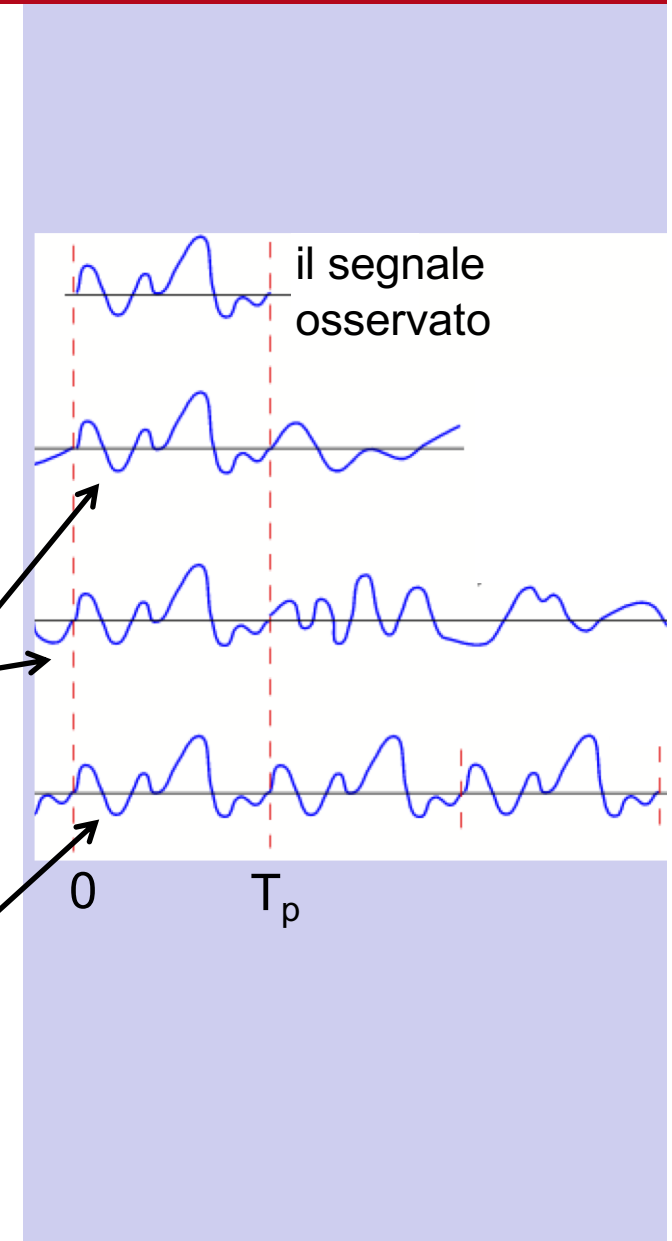


## Modello per segnali *ad estensione limitata*

... ovvero definiti in una finestra temporale limitata e duplicati per *ripetizione periodica* (o periodizzazione)

possibili forme al di fuori del periodo di osservazione

risultato della *ripetizione periodica* del segnale







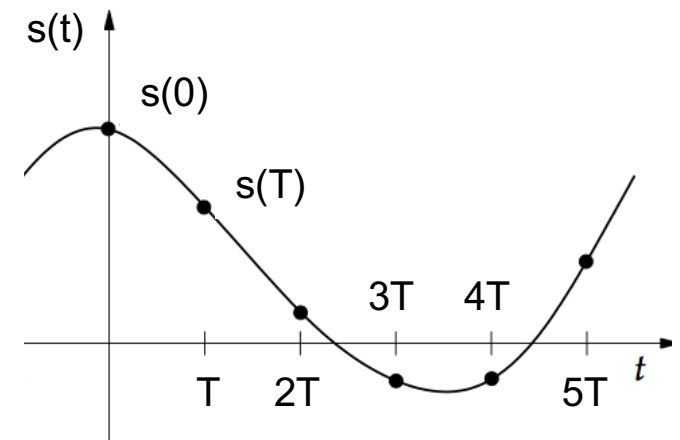
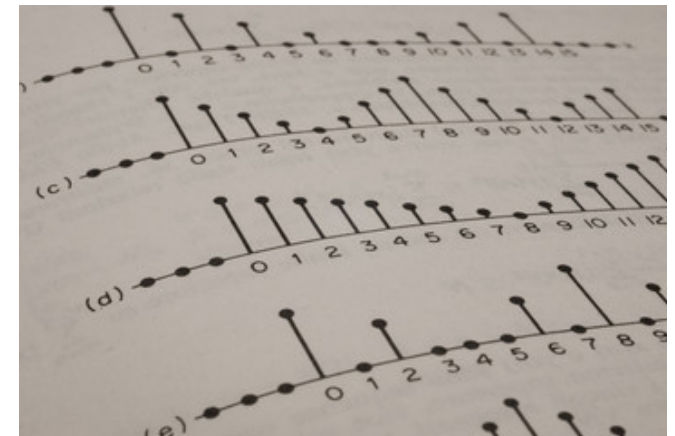
## Segnali a dominio discreto

$$D = Z(T) = \{ nT, n \in Z \}$$

con  $T$  *periodo di campionamento*

... la nostra convenzione per il segnale a tempo discreto è  $s(n)$  ma ne esistono altre:  $s_n$ ,  $s(nT)$ ,  $s[n]$ , etc.

Possono derivare da segnali a tempo continuo attraverso una operazione di **campionamento** che registra il valore del segnale originario a intervalli di tempo regolari





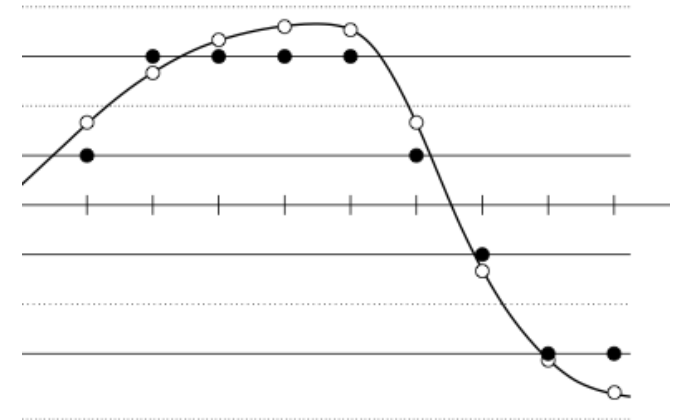
## Segnali ad ampiezze discrete

$$C = \{ c_0, c_1, c_2, c_3, \dots \}$$

in cui il codominio tipicamente ha cardinalità finita  
(numero finito di possibili livelli del segnale)

Sono chiamati segnali **digitali** in quanto esprimibili  
tramite flussi di **bit**

Possono essere derivati da un segnale continuo tramite  
**campionamento** e **quantizzazione**, ovvero tramite una  
analog-to-digital-conversion (**ADC**)





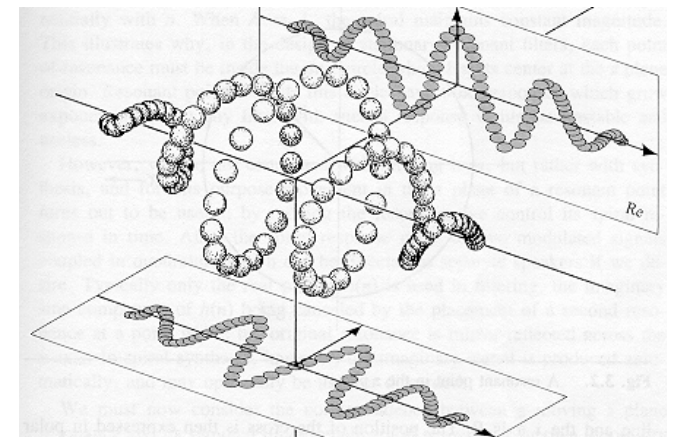
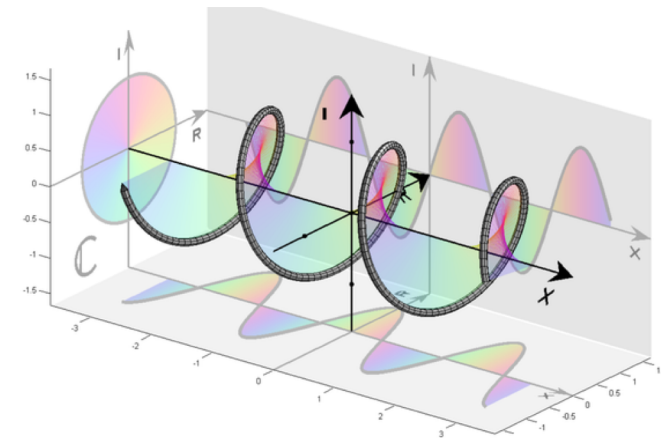
Segnali le cui ampiezze sono valori **complessi**

$$D = \mathcal{C} \text{ (numeri complessi)}$$

Possono essere interpretati come segnali **vettoriali** a valori reali

$$\underline{\mathbf{s}}(t) = [ \mathcal{R}[s(t)], \mathcal{I}[s(t)] ]$$

con  $\mathcal{R}$  la parte reale, e  $\mathcal{I}$  la parte immaginaria





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Segnali multidimensionali

**Immagine in b/n** -  $s(x,y)$

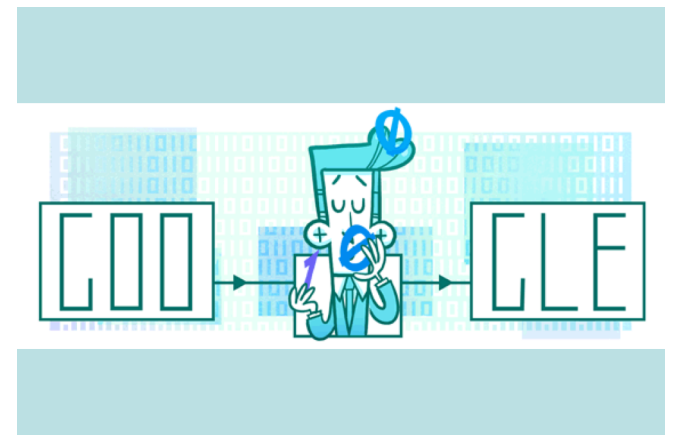
segnale bidimensionale (2D) con coordinate spaziali

**Immagine a colori** -  $\underline{s}(x,y) = [ r(x,y), g(x,y), b(x,y) ]$

Segnale 2D vettoriale con coordinate spaziali

**Video a colori** -  $\underline{s}(x,y,t) = [ r(x,y,t), g(x,y,t), b(x,y,t) ]$

Segnale 3D vettoriale con coordinate spaziali e temporali



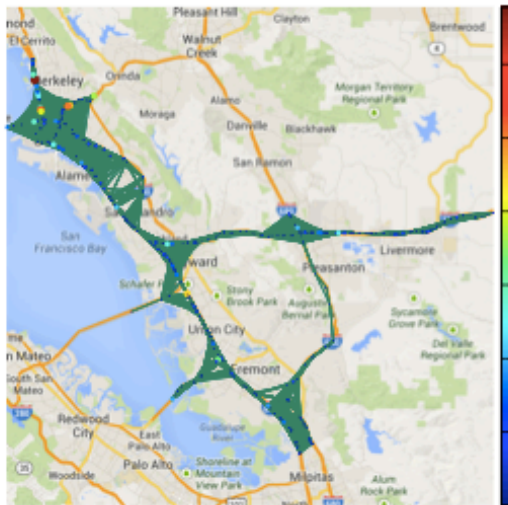




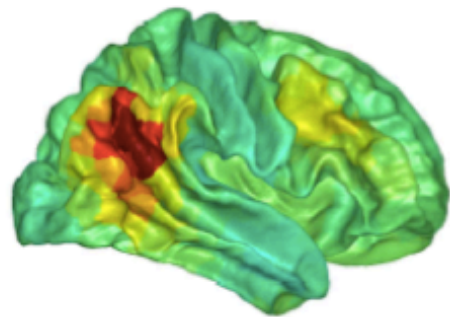
UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Segnali su grafi complessi

I segnali complessi del mondo della rete

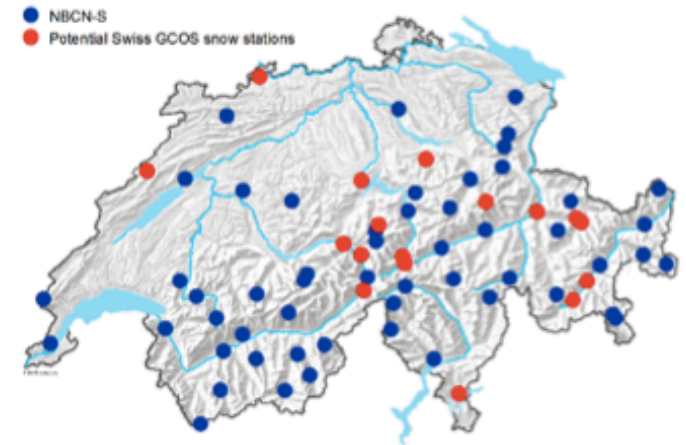
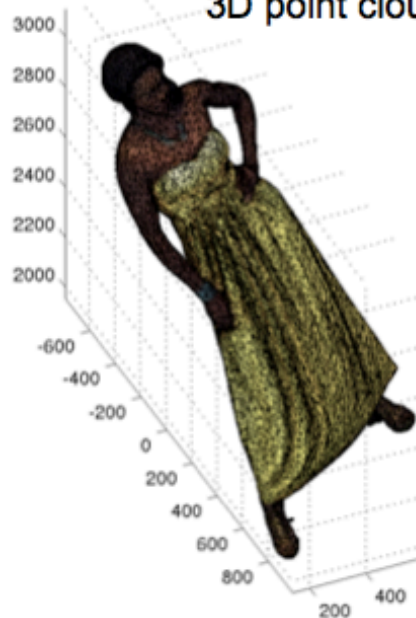


Traffic bottlenecks



Brain signals

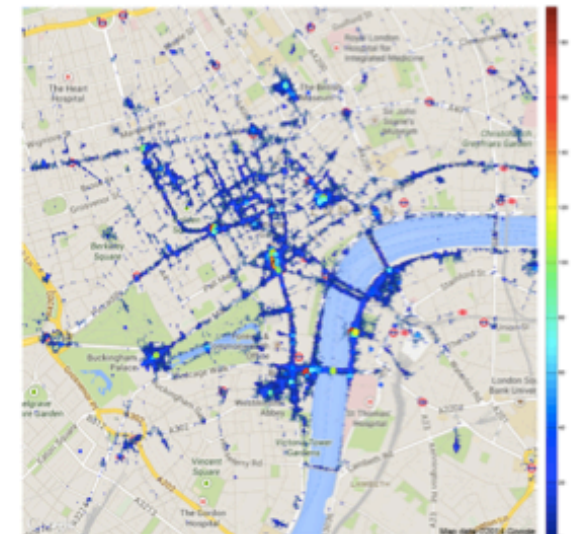
3D point clouds



Sensor networks



Social networks



Mobility patterns



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

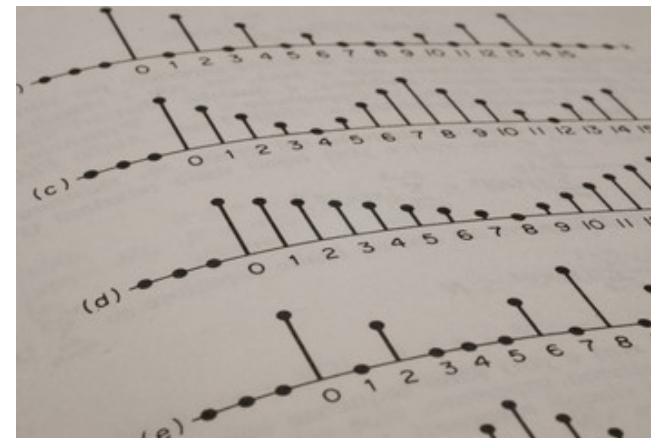
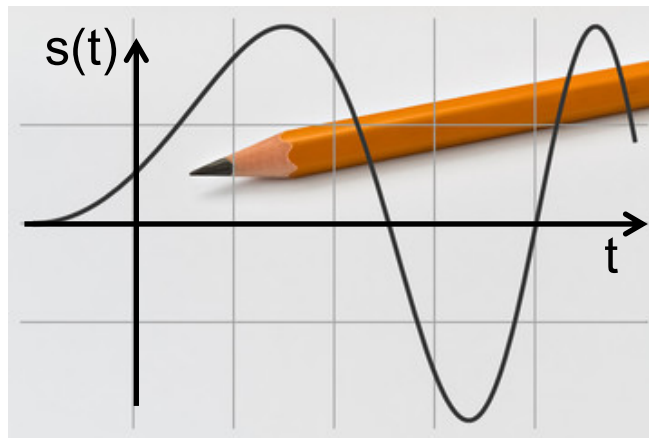
# Le 4 classi fondamentali

Sempre monodimensionali (1D) e a valori complessi

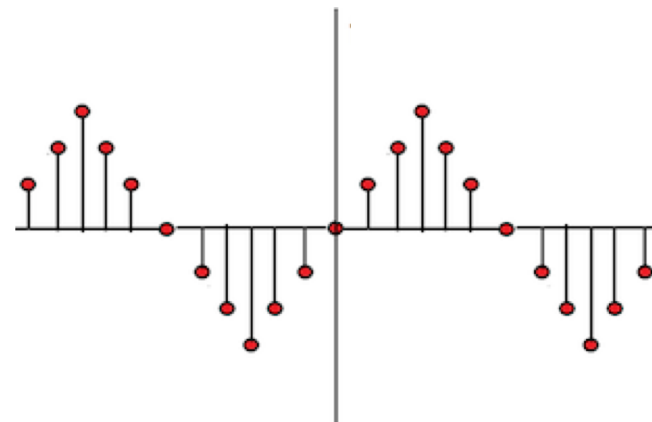
**continui**

**discreti**

campionamento



periodizzazione



**aperiodici**

**periodici**





La classe più interessante di sistemi sono le trasformazioni LTI, con proprietà di

## Linearità

Principio di sovrapposizione degli effetti

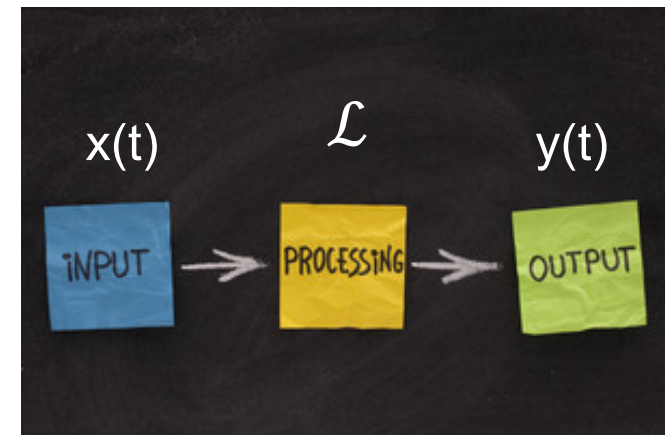
$$a x(t) \rightarrow a y(t)$$

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

## Tempo-invarianza

Principio di ripetibilità dell'esperimento

$$x(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0)$$





# La convoluzione


Una rappresentazione efficiente per sistemi LTI


Le trasformazioni LTI sono esprimibili tramite una operazione di **convoluzione**

... in forma **integrale** nel caso continuo

... in forma di **sommatoria** nel caso discreto

la **risposta impulsiva**  $h$  identifica univocamente la trasformazione

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(u)h(t-u)du$$


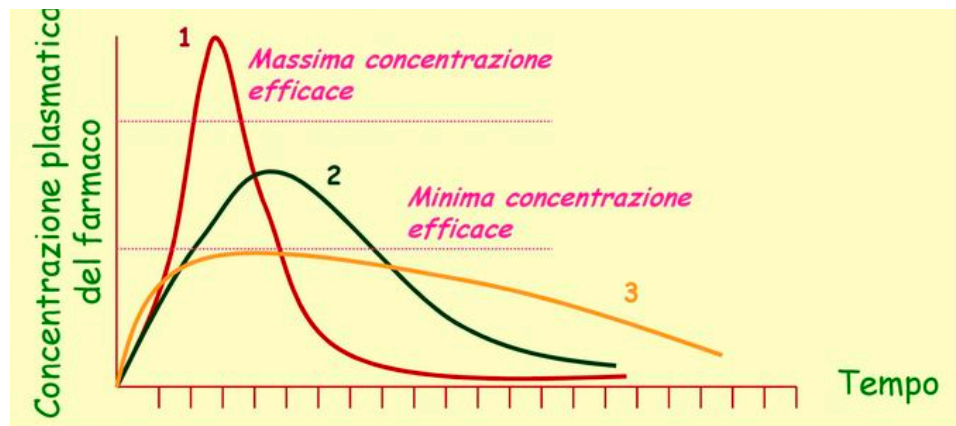
$$y_n = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} x_k h_{n-k}$$




## concentrazione di un farmaco nel sangue, data la modalità di somministrazione

Ingresso  $x(t)$  = quantità somministrata (nel tempo)

Risposta impulsiva  $h(t)$  = come il farmaco si trasferisce nel sangue (nel tempo)



Uscita  $y(t)$  = concentrazione del farmaco nel sangue



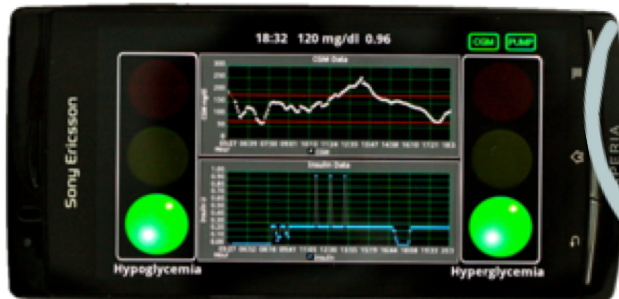


UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Il pancreas artificiale

Un esempio bioingegneristico

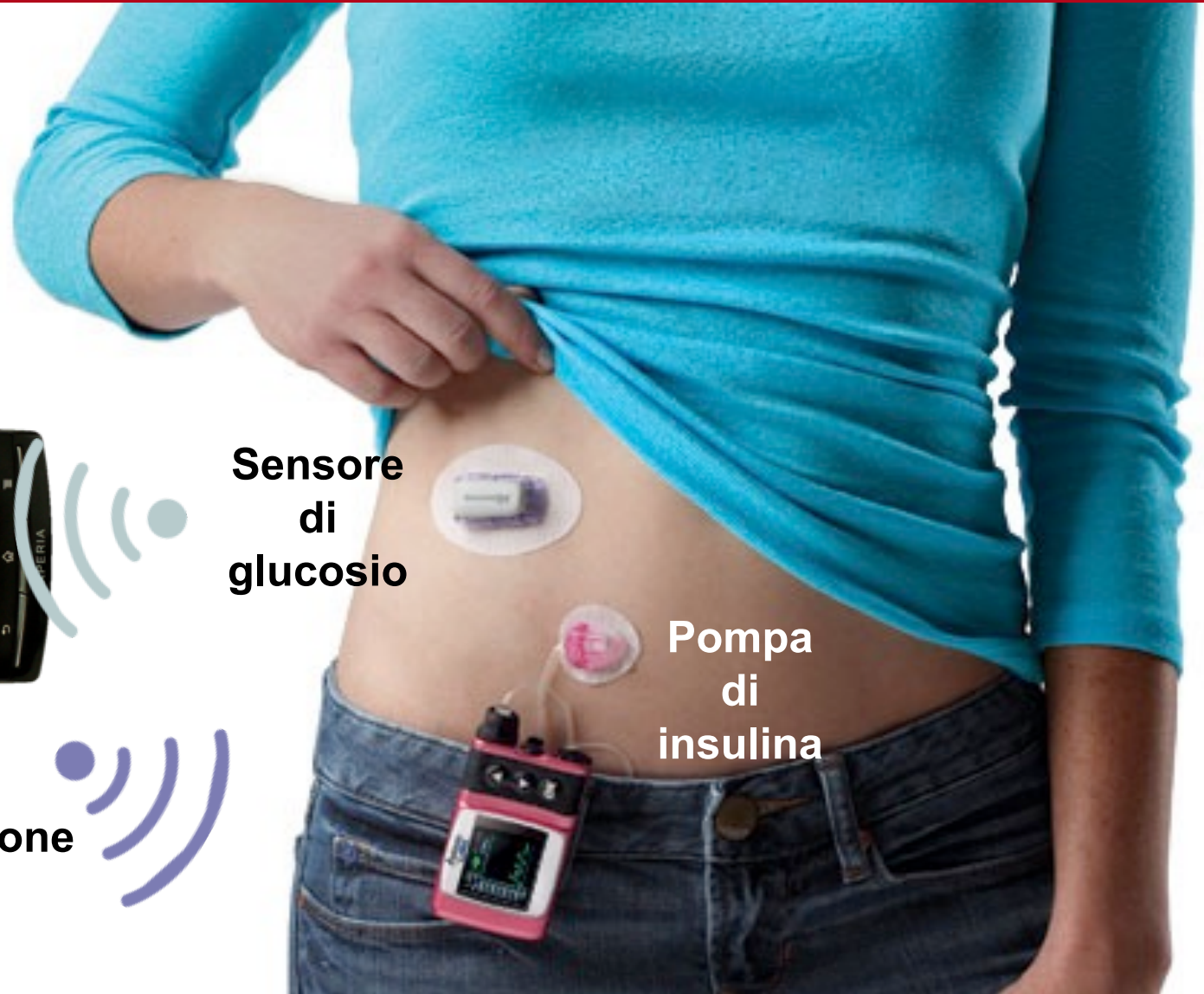
Algoritmi di  
controllo ed  
elaborazione dati



Sensore  
di  
glucosio

Pompa  
di  
insulina

Comunicazione  
wireless

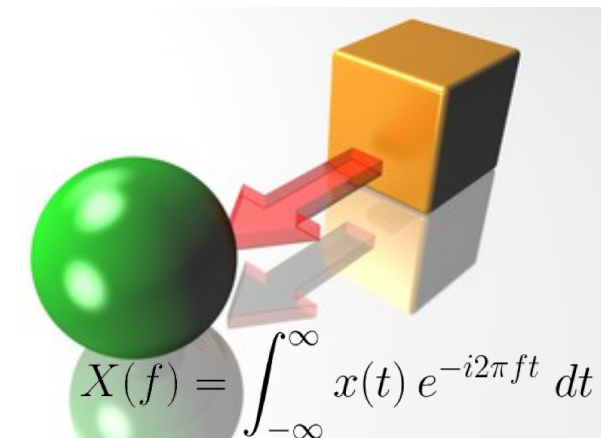




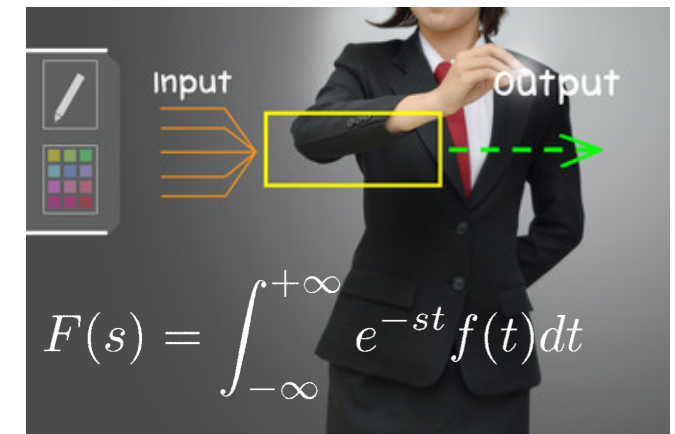
A volte è meglio dare una rappresentazione alternativa al segnale

tf. di **Fourier** → esprime il segnale come composizione di **esponenziali a esponenti immaginari**  $e^{i 2\pi f t}$

tf. di **Laplace** → esprime il segnale come composizione di **esponenziali a esponenti complessi**  $e^{(r + i \omega) t}$



... ma non sono trasformazioni LTI (sono solo lineari)







UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# La trasformata di Fourier

Ovvero la rappresentazione in frequenza

La trasformata di Fourier è una rappresentazione del segnale che ne evidenzia il contenuto alle varie **frequenze** (segnale come somma di sinusoidi)





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Sistemi LTI e trasformate

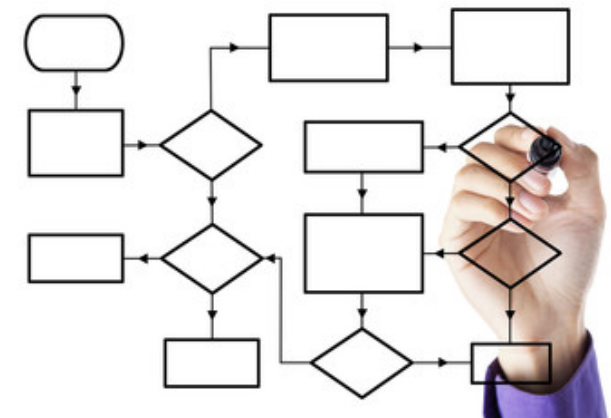
Ovvero a cosa servono le trasformate

Nel dominio delle trasformate la **convoluzione** diventa un **prodotto**

$$y(t) = x * h(t) \text{ (convoluzione)}$$

$$Y(f) = X(f) H(f) \text{ (prodotto)}$$

... ovvero sistemi LTI anche complessi si studiano meglio usando una trasformata





## Segnali nel tempo (5 lez)

---

Durata, Area, Valor medio, Energia Potenza  
Traslazione, Scala, Periodizzazione  
Esponenziali, Impulsi, e Altri segnali notevoli

## Sistemi nel tempo (6 lez)

---

Invertibilità, Memoria, **Stabilità**, Linearità  
I sistemi LTI, La **convoluzione** e sue proprietà  
Autofunzioni, Filtraggio, Connessione di sistemi  
Risposta a sinusoidi e esponenziali complessi

## La trasformata di Fourier (13 lez)

---

Serie di Fourier e sue proprietà  
Trasformata di Fourier e sue proprietà  
Relazione periodico-aperiodico  
Trasformata per segnali discreti e sue proprietà  
Il teorema del **campionamento**

## La trasformata di Laplace (4 lez)

---

Trasformata di Laplace e sue proprietà  
Equazioni differenziali, Risposta libera e forzata  
Soluzione di equazioni differenziali tramite  
la trasformata di Laplace  
Esempi di applicazione

## La trasformata Zeta (2 lez)

---

Trasformata Zeta e sue proprietà  
Soluzione tramite trasformata Zeta di sistemi  
descritti da equazioni alle differenze

# Note storiche

sui tre maggiori protagonisti del nostro corso



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Pierre-Simon Laplace

1749-1827

## Pierre-Simon Laplace

Beaumont-en-Auge (Normandia) 23/3/1749

Parigi 5/3/1827

Matematico, fisico, astronomo e nobile francese

*Sebbene la trasformazione oggi nota come trasformata di Laplace sia originariamente stata introdotta nel 1744 da Eulero, nel 1785 Laplace comprese per primo come usare questa trasformazione per risolvere le **equazioni differenziali**. La forma usata da Laplace corrisponde a quella oggi nota come **trasformata z**.*

*La versione moderna della trasformata di Laplace è dovuta a G. Doetsch (1937)*







UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Jean Baptiste Joseph Fourier

1768-1830

## Jean Baptiste Joseph Fourier

Auxerre (Borgogna) 21/3/1768

Parigi 16/5/1830

Allievo di Laplace e Lagrange  
Matematico e fisico francese

*A Fourier si deve l'idea di **serie di Fourier**, sviluppata per la soluzione di equazioni legate alla diffusione del calore a partire dal 1807 (l'opera più ampia, "Théorie analytique de la chaleur," è del 1822)*

*I risultati di Fourier sono successivamente stati riformulati con maggiore rigore da Dirichlet e Riemann nella seconda metà dell'ottocento*





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

# Claude Elwood Shannon

1916-2001

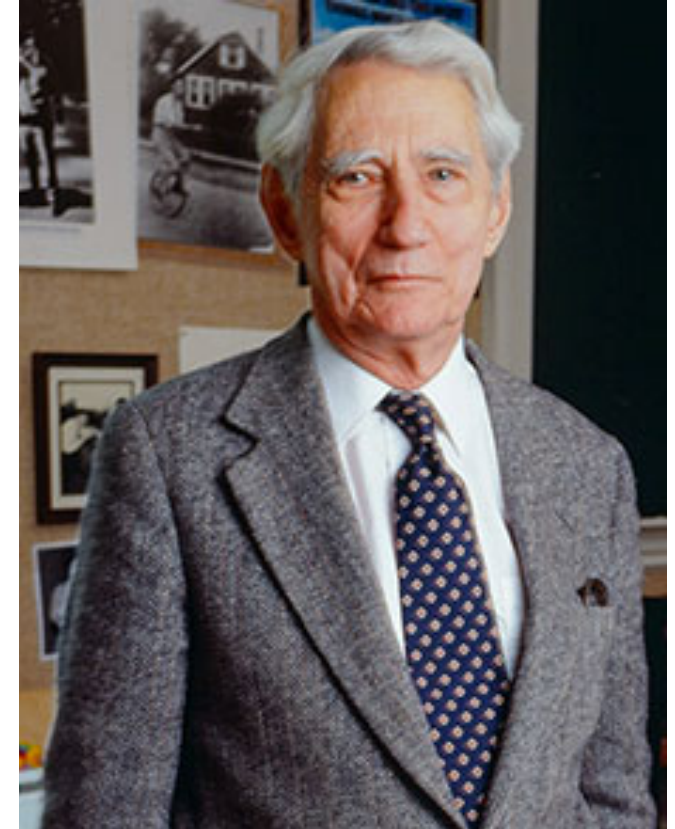
## Claude Elwood Shannon

Petoskey (Michigan) 30/4/1916

Medford (Massachusetts) 24/2/2001

Ingegnere e matematico statunitense  
Padre della teoria dell'informazione

*Shannon è riconosciuto come il padre del **Teorema del campionamento** (1949), una applicazione della Serie di Fourier che rivela il legame tra segnali a tempo continuo (analogici) e segnali a tempo discreto (digitali)*





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
DI PADOVA

**Segnali e Sistemi**

(canale 2)