

# Analisi Matematica

Marco Pittarello

## Contents

<b>1</b>	<b>Principio di Induzione</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Coefficienti Binomiali</b>	<b>3</b>
2.1	Proprietà di $\binom{n}{k}$ . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Limiti di funzioni</b>	<b>4</b>
3.1	O-piccoli . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Successioni</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>Funzioni Continue</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Derivata</b>	<b>21</b>
6.1	Massimo e minimo assoluto di una funzione . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Studio di Funzione</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>Serie Numeriche</b>	<b>30</b>

# 1 Principio di Induzione

## Definizione 1

Il principio di induzione è un metodo per dimostrare predicati matematici.

come

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad \underbrace{1 + 2 + 3 + \dots + n}_{P(n)} = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad \underbrace{\forall x \in \mathbb{R} \quad x > 1 \quad (1+x)^n \geq nx + 1}_{P(n)}$$

## Teorema 1: 1° forma

Sia  $P(n)$  un predicato con parametro  $n \in \mathbb{N}$  e tale che:

1.  $P(0)$  è vero ( **caso base** )
2.  $\forall n \in \mathbb{N} \quad P(n) \rightarrow P(n+1)$  ( **passo induttivo** )

Allora  $P(n)$  è vera  $\forall n \in \mathbb{N}$

## Esempio 1

Dimostrare che  $\forall n \in \mathbb{N} \quad \underbrace{2^n \geq n + 1}_{P(n)}$ .

CASO BASE :  $P(0) : 2^0 \geq 1$  vero

PASSO INDUTTIVO :  $\forall n \in \mathbb{N} \quad P(n) \rightarrow P(n+1)$

Suppongo che  $2^n \geq n + 1$  e dimostro che  $2^{n+1} \geq n + 2$

$$2^n \geq n + 1 \rightarrow 2 \cdot 2^n \geq 2 \cdot (n + 1)$$

$$2^{n+1} \geq 2n + 2 \geq n + 2$$

Dunque abbiamo dimostrato che  $P(n) \rightarrow P(n+1)$

Dunque per il principio di induzione è vero che  $\forall n \in \mathbb{N}$  vale  $P(n)$

## Esempio 2

Dimostrare che  $\forall n \in \mathbb{N}$  :

$$\sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2}$$

CASO BASE :  $P(0) : "0 = 0"$  è vera

PASSO INDUTTIVO : Assumo che  $P(n)$  è vera e dimostro che è vera anche  $P(n+1)$

$$\text{ovvero} \quad \sum_{k=0}^{n+1} k = \frac{(n+1)(n+2)}{2}$$

$$\sum_{k=0}^{n+1} k = \sum_{k=0}^n k + (n+1) = \frac{n(n+1)}{2} + (n+1) = \frac{n(n+1) + 2(n+1)}{2} = \frac{(n+2)(n+1)}{2}$$

Ho dimostrato CASO BASE e PASSO INDUTTIVO, dunque per il principio di induzione segue che:

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad P(n)$$

#### Teorema 2: 2° forma

Sia  $P(n)$ ,  $n \in \mathbb{N}$  un predicato tale che:

1.  $P(0)$  è vera (caso base)
2.  $\forall n \in \mathbb{N}, \quad n \geq 1$  (passo induttivo)

Se  $\forall m \in \mathbb{N} \quad 0 \leq m \leq n \quad P(m)$  è vera allora lo è anche  $P(n)$  (ipotesi induttiva)

Allora  $\forall n \in \mathbb{N} \quad P(n)$  è vera

**OSSERVAZIONE** è una forma "più forte" della 1° forma, poichè per dimostrare  $P(n)$  si usa la condizione che  $P(m)$  vale per tutti gli  $m < n$

**OSSERVAZIONE** in entrambe le forme del principio di induzione possiamo sostituire 0 con qualunque  $n_0 \in \mathbb{N}$ .  
Ovvero, se per un predicato  $P(m)$  dimostriamo:

- il caso base per  $n_0$
- il passo induttivo  $\forall n \geq n_0$

Allora possiamo concludere che  $\forall n \geq n_0 P(n)$  è vera

#### Esempio 3

Dimostriamo che  $\forall n \in \mathbb{N} \quad n \geq 2 \quad \underbrace{n \text{ si può scrivere come prodotto di numeri primi}}_{P(n)}$

CASO BASE :  $P(2)$  è banalmente vera: 2 è un numero primo

PASSO INDUTTIVO : dimostriamo che  $\forall n \in \mathbb{N} \quad n \geq 3 \quad (\forall 1 \leq m < n \quad P(m)) \rightarrow P(n)$

Ovvero, assumendo che  $P(m)$  vale  $\forall 1 \leq m < n$ , ovvero si può scrivere come prodotto di primi, dimostriamo che anche  $n$  si scrive come prodotto di primi ci sono due casi.

Se  $n$  è primo allora è chiaramente prodotto di primi

Se  $n$  non è primo allora è divisibile per un numero  $m_1$  con  $m_1 \neq n$  e  $m_1 \neq 1$ ,

in particolare  $2 \leq m_1 < n$

Dunque  $\exists m_2 \in \mathbb{N}$  tale che

$n = m_1 m_2$  con  $m_1, m_2$  diversi da  $m$  e da 1

Inoltre  $2 \leq m_2 < n$

perchè  $m_1 < n \quad m_1 > 1$

Per l'ipotesi induttiva  $P(m_1)$  e  $P(m_2)$  sono vere.

## 2 Coefficienti Binomiali

#### Definizione 2

Definiamo  $C_{n,k}$  = numero totale di modi possibile, e si chiama:  
numero di combinazioni di  $n$  elementi di classe  $k$

Spesso  $C_{n,k}$  viene anche denotato con il simbolo  $\binom{n}{k}$ , chiamato  
coefficiente binomiale  $n$  su  $k$

Quanto vale  $\binom{n}{k}$ ?

$$\forall n \in \mathbb{N} \quad \forall k \in \mathbb{N} \quad k \leq n \quad \binom{n}{k} = C_{n,k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

## 2.1 Proprietà di $\binom{n}{k}$

### Teorema 3

$\forall n \in \mathbb{N} \quad \forall k \in \mathbb{N} \quad 1 \leq k \leq n$  si ha:

$$\binom{n+1}{k} = \binom{n}{k} + \binom{n}{k-1}$$

**OSSERVAZIONE:** Abbiamo un altro metodo per calcolare  $\binom{n}{k} \forall n \in \mathbb{N} \quad \forall k \leq n$

Utilizzando il teorema e  $\binom{n}{0} = 1$  possiamo calcolare ogni valore di  $\binom{n}{k} \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad \forall k \leq n$ , evitando di dover calcolare ogni volta i fattoriali.

### Esempio 4: Triangolo di Tartaglia

Si costruisce elencando per righe i coefficienti binomiali, la riga  $n$  è composta da  $\binom{n}{0}, \binom{n}{1}, \dots, \binom{n}{n}$

$$\binom{0}{0} = 1 \tag{1}$$

$$\binom{1}{0} = 1 \quad \binom{1}{1} = 1 \tag{2}$$

$$\binom{2}{0} = 1 \quad \binom{2}{1} = \binom{1}{0} + \binom{1}{1} = 2 \quad \binom{2}{2} = 1 \tag{3}$$

$$\binom{3}{0} = 1 \quad \binom{3}{1} = 3 \quad \binom{3}{2} = 3 \quad \binom{3}{3} = 1 \tag{4}$$

### Definizione 3: Binomio di Newton

$$\forall n \in \mathbb{N} \text{ vale } \forall p, q \in \mathbb{R} \quad (p+q)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} p^k q^{n-k}$$

## 3 Limiti di funzioni

### Definizione 4: Definizione di intorno e limite

Si dice intorno sferico di  $r$  con  $r \in \mathbb{R}$ , un intervallo  $]r-\epsilon, r+\epsilon[$  con  $\epsilon > 0$ ;  $\epsilon$  viene detta raggio dell'intorno

- Se  $r = +\infty$ , si dice intorno di  $+\infty$  un intervallo del tipo  $]M, +\infty[$  con  $M > 0$  ( $M \in \mathbb{R}$ )
- Se  $r = -\infty$ , si dice intorno di  $-\infty$  un intervallo del tipo  $] -\infty, -M[$  con  $M > 0$  ( $M \in \mathbb{R}$ )

Dato  $f: \text{dom} f \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\text{dom} f \subseteq \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in \mathbb{R}$  è punto di accumulazione a  $\text{dom} f$ ,  $l \in \mathbb{R}$

Si dice che  $f$  ha limite  $l$  per  $x \rightarrow x_0$  e si scrive:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$$

Se  $\forall V$  intorno di  $l \quad \exists U$  intorno di  $x_0$  tale che se  $x \in U \cap \text{dom} f$ ,  $x \neq x_0$  allora  $f(x) \in V$

### OSSERVAZIONE:

- Se  $l \in \mathbb{R}$ , si dice che  $f$  ha limite finito in  $x_0$
- Se  $l = +\infty$  o  $l = -\infty$ , allora  $f$  si dice divergente per  $x \rightarrow x_0$
- Se  $l = 0$ , allora si dice che  $f$  è infinitesima in  $x_0$

#### Teorema 4: Unicità del limite

Se  $x_0, l_1, l_2 \in \bar{\mathbb{R}}$  e

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_1 \quad \text{e} \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_2$$

allora  $l_1 = l_2$

**Dim:** Suppongo per assurdo che  $l_1 \neq l_2$

$P_1$  la proposizione di separazione di  $\mathbb{R}$

$\exists V_1$  intorno di  $l_1$

$\exists V_2$  intorno di  $l_2$

tale che  $V_1 \cap V_2 = \emptyset$

D'altra parte

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_1 \Rightarrow$$

$\exists U_1$  intorno di  $x_0$  tale che  
 $x \in U_1 \cap \text{dom} f, x \neq x_0$   
allora  $f(x) \in V_1$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_2 \Rightarrow$$

$\exists U_2$  intorno di  $x_0$  tale che  
 $x \in U_2 \cap \text{dom} f, x \neq x_0$   
allora  $f(x) \in V_2$

Pongo

$U = U_1 \cap U_2$  intorno di  $x_0$

$\Rightarrow \exists \bar{x} \in U \setminus \{x_0\}, \bar{x} \in \text{dom} f$

$\Rightarrow f(\bar{x}) \in V_1 \cap V_2 = \emptyset$  **ASSURDO** poichè  $\bar{x} \in U_1$  e  $\bar{x} \in U_2$

#### Esempio 5: Verificare

$$\lim_{x \rightarrow 2} 2|x-2| \cos[\ln|x-2| + e^{\sin x}] = 0$$

$x_0 = 2, \quad l = 0$

$$f(x) = 2|x-2| \cos[\ln|x-2| + e^{\sin x}]$$
$$\text{dom} f = \mathbb{R} \setminus \{2\}$$

Devo verificare che  $\forall \epsilon > 0 \quad \exists \delta$  tale che se  $\underbrace{|x-2| < \delta, x \in \mathbb{R} \setminus \{2\}, x \neq 2}_{0 < |x-2| < \delta}$  allora  $\underbrace{|f(x) - 0| < \epsilon}_{|f(x)| < \epsilon}$

ossia

$$|2|x-2| \cos[\ln|x-2| + e^{\sin x}]| < \epsilon \quad \Rightarrow \quad \textcircled{*}$$

Parto da  $\textcircled{*}$

$$2|x-2| \underbrace{|\cos[\ln|x-2| + e^{\sin x}]|}_{\leq 1} \leq 2|x-2| < \epsilon$$

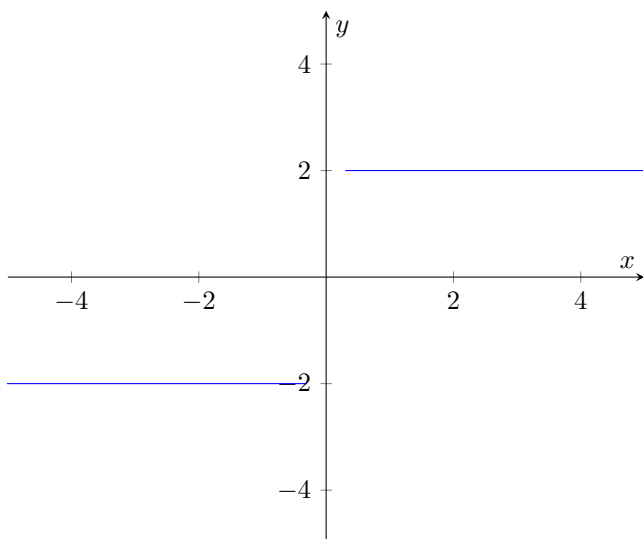
Voglio  $\delta > 0$  tale che se  $|x-2| < \delta$  e  $x \neq 2$  allora  $2|x-2| < \epsilon \Leftrightarrow |x-2| < \frac{\epsilon}{2}$

Prendo  $\delta = \frac{\epsilon}{2}$  e ho verificato che vale il limite.

#### Esempio 6: Limite destro e sinistro

$\sin x =$

$$\begin{array}{ll} -1 & x < 0 \\ 0 & x = 0 \\ 1 & x > 0 \end{array}$$



Se  $x \rightarrow 0^-$   $\text{sgn } x \rightarrow -1$

Se  $x \rightarrow 0^+$   $\text{sgn } x \rightarrow 1$

Quindi  $\nexists \lim_{x \rightarrow 0} \text{sgn } x$  perchè affinché esista, i limiti destro e sinistro devono essere uguali

#### Definizione 5: Punto di Accumulazione

Sia  $A \subseteq \mathbb{R}$ ,  $r \in \mathbb{R}$  si dice:

- punto di acc. destro per  $A$  se  $\forall \epsilon > 0 \quad A \cap ]r, r + \epsilon[ \neq \emptyset$  (cioè  $\exists a \in A$  tale che  $r < a < r + \epsilon$ )
- punto di acc. sinistro per  $A$  se  $\forall \epsilon > 0 \quad A \cap ]r - \epsilon, r[ \neq \emptyset$  (cioè  $\exists a \in A$  tale che  $r - \epsilon < a < r$ )

#### Esempio 7: Verificare che

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} e^{1/x} = +\infty$$

**Soluzione:** devo mostrare  $\forall M > 0 \quad \exists \delta > 0$  tale che se  $0 < x < \underbrace{0 + \delta}_{\delta}$  allora  $e^{1/x} > M$

$$e^{1/x} > M \Leftrightarrow \ln e^{1/x} > \ln M \Leftrightarrow \frac{1}{x} > \ln M \Leftrightarrow x < \underbrace{\frac{1}{\ln M}}_{\delta}$$

Prendo  $\delta = \frac{1}{\ln M}$

#### Definizione 6: Limiti e valore assoluto

Sia  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$ ,  $l \in \mathbb{R}$ ,  $x_0$  di acc. per  $\text{dom } f$ . Allora:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} |f(x) - l| = 0$$

**Prop:** Sia  $x_0, l \in \bar{\mathbb{R}}$ . Se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$ , allora:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = |l|$$

**Osservazione:**

$$\lim_{x \rightarrow x_0} |f(x)| = |l| \not\Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \pm l$$

### Teorema 5: Permanenza del segno

Dato  $f$  reale di variabile reale,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$ , di acc. per  $\text{dom} f$  e  $\text{supp}$ .

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l > 0$$

Allora  $\exists U$  intorno di  $x_0$  tale che se  $x \in U \cap \text{dom} f$ ,  $x \neq x_0$ , allora

$$f(x) > 0$$

**Dim:** Considero il caso  $l \in \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$ . Poichè  $l > 0 \Rightarrow \exists V$  intorno di  $l$  tale che:

$$V \subseteq ]0, +\infty[$$

$\exists U$  intorno di  $x_0$  tale che se  $x \in U \cap \text{dom} f$ ,  $x \neq x_0$  allora  $f(x) \in V$  Poichè  $V \subseteq ]0, +\infty[$ , ho

$$f(x) > 0$$

$\forall x \in U \cap \text{dom} f$ ,  $x \neq x_0$

**Oss:** vale l'analogo con  $l < 0$

### Teorema 6: Teorema del Confronto

Siano  $f, g$  funzioni reali di variabile reale,  $x_0$  di acc. per  $\text{dom} f \cap \text{dom} g$ , tale che

$$f(x) \leq g(x) \quad \text{definitivamente per } x \rightarrow x_0$$

Se

$$l_f = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \quad \text{e} \quad l_g = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x)$$

allora

$$l_f \leq l_g$$

**Oss:** se  $f(x) < g(x)$  definitivamente per  $\left\{ \begin{matrix} x \rightarrow x_0 \\ \exists l_f \text{ e } l_g \end{matrix} \right\} \not\Rightarrow l_f < l_g$

### Esempio 8

$$0 < e^x \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} e^x = 0 = \lim_{x \rightarrow -\infty} 0$$

### Teorema 7: Teorema dei due carabinieri

Sia  $X \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f, g, h : X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$  di acc. a  $X$ . Se

$$(*) \quad f(x) \leq h(x) \leq g(x) \quad \text{def. per } x \rightarrow x_0$$

e

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l$$

allora

$$\lim_{x \rightarrow x_0} h(x) = l$$

**Dim:** Suppongo per semplicità che  $(*)$  valga  $\forall x \in X$ . Devo mostrare che  $\forall V$  intorno di  $l$   $\exists U$  intorno di  $x_0$  t.c. se  $x \in (U \cap \underbrace{\text{dom} f}_X) \setminus \{x_0\}$ , allora  $h(x) \in V$  con  $V$  intorno di  $l$

$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \Rightarrow \exists U_f$  intorno di  $x_0$  tale che se  $x \in (U_f \cap X) \setminus \{x_0\}$  allora  $f(x) \in V$

$\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l \Rightarrow \exists U_g$  intorno di  $x_0$  tale che se  $x \in (U_g \cap X) \setminus \{x_0\}$  allora  $g(x) \in V$

Prendo  $U = U_f \cap U_g$  è intorno di  $x_0$  se  $x \in (U \cap X) \setminus \{x_0\} \Rightarrow f(x) \in V, \quad g(x) \in V$

Quindi  $f(x) \leq h(x) \leq g(x)$  e  $V$  intervallo allora  $h(x) \in V$

### Esempio 9: Teorema due carabinieri

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$

**Svolgimento:** Si sfrutta il fatto che:

$$\cos x \leq \frac{\sin x}{x} \leq 1 \quad \text{def. per } x \rightarrow 0$$

### Esempio 10: Dimostrare il limite notevole:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{2}$$

**Svolgimento:**

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x^2} \cdot \frac{1 + \cos x}{1 + \cos x} = \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos^2 x}{x^2} \cdot \frac{1}{1 + \cos x} = \\ &= \lim_{x \rightarrow 0} \underbrace{\frac{\sin^2 x}{x^2}}_1 \cdot \underbrace{\frac{1}{1 + \cos x}}_{1/2} = \frac{1}{2} \end{aligned}$$

### Definizione 7: Limite notevole

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{1}{x}\right)^x = e$$

### Teorema 8: Teorema della funzione composta o del cambio di variabile

Siano  $f, g$  funzioni reali di variabile reale, tale che  $g$  o  $f$  sia definita in un insieme  $X$  che abbia  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$  come punto di acc. supp.

1.  $\lim_{y \rightarrow y_0} g(y) = l$
2.  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = y_0$
3.  $f(x) \neq y_0$  def. per  $x \rightarrow x_0$

allora

$$\lim_{x \rightarrow x_0} g(f(x)) = \lim_{y \rightarrow y_0} g(y) = l \quad \text{con } y = f(x)$$

### Esempio 11

$$\lim_{x \rightarrow 0} g\left(x \cdot \sin \frac{1}{x}\right) \text{ non esiste}$$

$$g(y) = \begin{cases} \cos y & \text{se } y \neq 0 \\ 0 & \text{se } y = 0 \end{cases}$$



### Teorema 9: Operazioni sui limiti

$X \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f, g: X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0$  punto di acc. per  $X$ ,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$ . Supp.

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_f, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l_g, \quad l_f, l_g \in \mathbb{R}$$

Allora:

1.  $c \in \mathbb{R}, \quad \lim_{x \rightarrow x_0} (c f(x)) = c l_f$
2.  $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) \pm g(x)) = l_f \pm l_g$
3.  $\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x) \cdot g(x)) = l_f \cdot l_g$
4.  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{l_f}{l_g} \quad \text{se } l_g \neq 0$
5.  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{f(x)} = \frac{1}{l_f} \quad \text{se } l_f \neq 0$

**Oss**: il teorema rimane vero se faccio limite destro o sinistro

### Esempio 12: Calcolare

$$\lim_{x \rightarrow x_0} (f(x))^{g(x)} = (l_f)^{l_g}$$

con  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_f > 0$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l_g \in \mathbb{R}$$

**Svolgimento**:

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)^{g(x)} &= \lim_{x \rightarrow x_0} e^{\ln((f(x))^{g(x)})} = \\
&= \lim_{x \rightarrow x_0} e^{g(x) \cdot \ln f(x)} = \lim_{t \rightarrow l_g \ln l_f} e^t = \\
&= e^{l_g \ln l_f} = e^{\ln((l_f)^{l_g})} = \\
&= l_f^{l_g}
\end{aligned}$$

**Proposizione**: Sia  $X \subseteq \mathbb{R}$ ,  $f, g: X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$  punto di acc. per  $X$ ,  $f$  infinitesima in  $x_0$  (cioè  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$ ) e  $g$  sia limitata def. per  $x \rightarrow x_0$ . Allora:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \cdot g(x) = 0$$

("prodotto di  $f$ . infinitesima per  $g$ . limitata è infinitesimo")

### Esempio 13

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} 2^x \cdot \sin \frac{1}{2^x + 1}$$

$$\begin{aligned}
\lim_{x \rightarrow +\infty} [(2^x) \sin(\frac{1}{2^x + 1}) + \sin(\frac{1}{2^x + 1}) - \sin(\frac{1}{2^x + 1})] &= \lim_{x \rightarrow +\infty} [(2^x + 1) \sin(\frac{1}{2^x + 1}) - \sin(\frac{1}{2^x + 1})] = \\
y = \frac{1}{2^x + 1} \quad y \rightarrow 0 \text{ per } x \rightarrow +\infty & \\
= \lim_{y \rightarrow 0} [\frac{1}{y} \sin y - \sin y] &= \lim_{y \rightarrow 0} [\underbrace{\frac{\sin y}{y}}_1 - \sin y] = \\
= 1 - 0 = 1 &
\end{aligned}$$

#### Esempio 14: Verificare che

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arctan x}{x} = 1$$

**Svolgimento:** Pongo  $y = \arctan x \Leftrightarrow x = \tan y$

Quindi

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\arctan x}{x} &= \lim_{y \rightarrow 0} \frac{y}{\tan y} = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{y}{\frac{\sin y}{\cos y}} = \\ \lim_{y \rightarrow 0} y \cdot \frac{\cos y}{\sin y} &= \lim_{y \rightarrow 0} \underbrace{\left(\frac{\sin y}{y}\right)^{-1}}_1 \cdot \cos y = 1 \cdot 1 = 1 \end{aligned}$$

#### Esempio 15: Calcolare

$$\lim_{x \rightarrow 0} \sqrt{|x|} \cos \frac{1}{x^2}$$

**Soluzione:** il limite vale 0 poichè  $\sqrt{|x|}$  è infinitesima in  $x = 0$  e  $\cos \frac{1}{x^2}$  è limitata def. per  $x \rightarrow 0$

#### Esempio 16: Calcolare

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} (x + \sin x)$$

**Soluzione:**  $x + \sin x \geq \underbrace{x - 1}_{+\infty} \quad \forall x \in \mathbb{R}$

Quindi anche:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} x + \sin x = +\infty$$

#### Definizione 8: Forme Indeterminate

$f, g: X \rightarrow \mathbb{R}, \quad x_0$  punto di acc. per  $X$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \cdot g(x)$$

Non posso dire nulla se so che

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0 \quad e \quad \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = \pm\infty \quad \text{F.I. } 0 \cdot \infty$$

Oppure

$$\text{F.I.} \quad +\infty - \infty \quad \frac{0}{0} \quad \frac{\infty}{\infty} \quad 0^0 \quad +\infty^0 \quad 1^{+\infty}$$

#### Esempio 17: Limite notevole

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{\alpha}{x}\right)^x = e^\alpha \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$$

**Soluzione:**

$$\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{\alpha}{x}\right)^x = \lim_{y \rightarrow \pm\infty} \left(1 + \frac{1}{y}\right)^{\alpha y} = \lim_{y \rightarrow \pm\infty} \underbrace{\left(1 + \frac{1}{y}\right)^y}_e^\alpha = e^\alpha \quad \checkmark$$

### Esempio 18: Limite notevole

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x)}{x} = 1$$

**Soluzione :**

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\ln(1+x)}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x} \ln(1+x) = \lim_{x \rightarrow 0} \ln(\underbrace{(1+x)^{1/x}}_e) = \ln e = 1 \quad \checkmark$$

### Esempio 19: Verificare il limite

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} = 1$$

**Soluzione :**

$$\begin{aligned} \lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - 1}{x} &= & y = e^x - 1 \\ &= \lim_{y \rightarrow 0} \frac{y}{\ln(1+y)} = & \text{uso il limite notevole verificato prima (esempio 18)} \\ &= 1 \quad \checkmark \end{aligned}$$

### Definizione 9: Limite notevole

Dall'esempio precedente (es. 19) si ricava:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\alpha^x - 1}{x} = \ln \alpha \quad \forall \alpha > 0$$

### Esempio 20

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \left( \frac{1 + |\sin x|}{x} \right)^x \quad \text{F.I. } 0^\infty$$

**Svolgimento :** Uso il teorema del confronto

Visto che  $0 \leq |\sin x| \leq 1$  allora  $1 \leq 1 + \sin x \leq 2$ , quindi  $\frac{1}{x} \leq \frac{1 + \sin x}{x} \leq \frac{2}{x}$ .  
 I due estremi tendono a 0 per  $x \rightarrow +\infty$  quindi anche  $\frac{1 + |\sin x|}{x}$  tende a 0.

### Esempio 21

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} (1 + 3 \sin e^x)^{\cos e^{-x^2} + \frac{1}{\sin e^x}}$$

**Svolgimento :**

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} e^{(\cos e^{-x^2} + \frac{1}{\sin e^x}) \ln(1 + 3 \sin e^x)}$$

Ricordare il limite notevole  $\frac{\ln(1+y)}{y} = 1$  per  $y \rightarrow 0$  Quindi:

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} [\cos e^{-x^2} \cdot \ln(1 + 3 \sin e^x) + \frac{3}{\sin e^x} \cdot \ln(1 + 3 \sin e^x)]$$

Adesso pongo  $y = 3 \sin e^x$  che tende a 0 per  $x \rightarrow -\infty$  e ottengo:

$$\cos e^{-x^2} = 1 \quad \ln(1 + 3 \sin e^x) = 0 \quad 3 \cdot \underbrace{\frac{\ln(1+y)}{y}}_1 = 3$$

Il risultato è quindi  $1 \cdot 0 + 3 = 3$

### 3.1 O-piccoli

#### Definizione 10: O-Piccolo

Date  $f, g$  funzioni reali di variabile reale,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$  di acc. per  $\text{dom} f \cap \text{dom} g$ ,  $g(x) \neq 0$  def. per  $x \rightarrow x_0$   
Si dice che  $f$  è "o-piccolo" di  $g$  per  $x \rightarrow x_0$  se:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 0$$

E si scrive:  $f(x) = o(g(x))$  per  $x \rightarrow x_0$   $f(x) \in o(g(x))$  per  $x \rightarrow x_0$

**Osservazione :**

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0 \Leftrightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{1} = 0 \Leftrightarrow f = o(1) \text{ per } x \rightarrow x_0$$

#### Esempio 22: o-piccolo

$1 - \cos x = o(x)$  per  $x \rightarrow 0$ ?

**Svolgimento :**

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1 - \cos x}{x} = \lim_{x \rightarrow 0} x \cdot \frac{1 - \cos x}{x^2} \quad x = 0 \quad \frac{1 - \cos x}{x^2} = \frac{1}{2}$$

Quindi  $0 \cdot \frac{1}{2} = 0$  ✓ e  $1 - \cos x$  è o-piccolo di  $x$  per  $x \rightarrow 0$

**Osservazione :**

$$\begin{aligned} f_1(x) &= o[g(x)] \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ f_2(x) &= o[g(x)] \text{ per } x \rightarrow x_0 \end{aligned} \quad \nRightarrow \quad f_1(x) = f_2(x) \text{ per } x \rightarrow x_0$$

**Osservazione :**

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = l \in \mathbb{R} \quad \Rightarrow \quad f(x) = lg(x) + o[g(x)] \quad \text{per } x \rightarrow x_0$$

cioè

$$f(x) - lg(x) = o[g(x)] \quad \text{per } x \rightarrow x_0$$

**Dim :**

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - lg(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \left( \underbrace{\frac{f(x)}{g(x)}}_l - \underbrace{\frac{lg(x)}{g(x)}}_l \right) = l - l = 0 \quad \checkmark$$

**Teorema 10: Principio di sostituzione degli infinitesimi**

$X \subseteq \mathbb{R}$   $f, g, f_1, g_1 : X \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$  punto di acc. per  $X$ .

Se  $g(x) \neq 0$  def. per  $x \rightarrow x_0$  e:

$$\begin{aligned} f(x) &= f_1(x) + o(f_1(x)) && \text{per } x \rightarrow x_0 \\ g(x) &= g_1(x) + o(g_1(x)) && \text{per } x \rightarrow x_0 \end{aligned}$$

Allora:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)}{g_1(x)}$$

**Osservazione :**

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x) + o(f_1(x))}{g_1(x) + o(g_1(x))} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1(x)}{g_1(x)}$$

**Esempio 23: Calcolare**

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x - \ln(1+x)}{x \ln(1+x) - 2 \sin^2 x + 1 - \cos x} \quad \text{F.I. } \frac{0}{0}$$

**Svolgimento :**

Conoscendo gli sviluppi in serie

$$\sin x = x - \frac{x^3}{6} + o(x^3) \text{ per } x \rightarrow 0$$

$$\ln(1+x) = x + o(x) \text{ per } x \rightarrow 0$$

$$\text{NUM} = \sin x - \ln(1+x) = x - \frac{x^3}{6} + o(x^3) - x + o(x^2) = \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} + o(x^2) + o(x^3) = \frac{x^2}{2} + o\left(\frac{x^2}{2}\right)$$

$$\begin{aligned} -\frac{x^3}{6} &= o\left(\frac{x^2}{2}\right) && o(x^3) = o(x^2) \\ &= \frac{x^2}{2} + o\left(\frac{x^2}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\text{DEN} = x \ln(1+x) - 2 \sin^2 x + 1 - \cos x \quad 1 - \cos x = \frac{1}{2}x^2 + o\left(\frac{1}{2}x^2\right) \text{ per } x \rightarrow 0$$

$$\begin{aligned} &= x(x + o(x)) - 2(x + o(x))(x + o(x)) + \frac{1}{2}x^2 + o\left(\frac{x^2}{2}\right) = \\ &= x^2 + x o(x) - 2x^2 - 4x o(x) - 2(o(x))^2 + \frac{1}{2}x^2 + o\left(\frac{x^2}{2}\right) = \\ &= -\frac{1}{2}x^2 + o(x^2) \end{aligned}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\text{NUM}}{\text{DEN}} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^2}{2} + o(x^2)}{-\frac{1}{2}x^2 + o(x^2)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\frac{x^2}{2}}{-\frac{1}{2}x^2} = -1$$

## Sviluppi asintotici di alcune funzioni

$\sin x$	$x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5)$ per $x \rightarrow 0$
$\cos x$	$1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + o(x^4)$ per $x \rightarrow 0$
$\ln(1+x)$	$x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} + o(x^3)$ per $x \rightarrow 0$
$\cosh x$	$1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + o(x^4)$ per $x \rightarrow 0$
$\sinh x$	$x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + o(x^5)$ per $x \rightarrow 0$
$\tan x$	$x + \frac{x^3}{3} + o(x^3)$ per $x \rightarrow 0$
$\arctan x$	$x - \frac{x^3}{3} + o(x^3)$ per $x \rightarrow 0$
$e^x$	$1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + o(x^3)$

### Esempio 24: Sviluppi asintotici

$$\sinh(e^x) \quad \text{per } x \rightarrow -\infty$$

**Svolgimento:** Voglio sfruttare

$$\sinh y = y + \frac{y^3}{3!} + \frac{y^5}{5!} + o(y^5)$$

Quindi scrivo

$$\sinh e^x = e^x + \frac{(e^x)^3}{3!} + \frac{(e^x)^5}{5!} + o((e^x)^5)$$

Sapendo che  $y$  deve tendere a 0, abbiamo  $e^x$  che tende a 0 per  $x \rightarrow -\infty$  quindi la sostituzione è valida

### Definizione 11: Algebra degli o-piccoli

- $o(g(x)) + o(g(x)) = o(g(x))$
- $o(g(x)) - o(g(x)) = o(g(x))$
- $o(g(x)) \cdot o(g(x)) = o(g(x)^2)$
- $g(x) \cdot o(g(x)) = o(g(x)^2)$

### Confrontare esponenziali, logaritmi e potenze

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x}{x^n} = +\infty \quad \forall n \geq 1$$

$$\Rightarrow x^n = o(e^x) \quad \text{per } x \rightarrow +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^n}{\ln x} = +\infty \quad \forall n \geq 1$$

$$\Rightarrow \ln x = o(x^n) \quad \text{per } x \rightarrow +\infty$$

Quindi:

$$e^x \gg x^n \gg \ln x \quad \text{per } x \rightarrow +\infty$$

### Esempio 25: Calcolare

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^5 + e^x + \sin x}{3e^x + x^{15} \ln x} \quad \text{F.I. } \frac{\infty}{\infty}$$

**Svolgimento:**

NUM:  $x^5 = o(e^x) \quad \frac{x \sin x}{e^x} = \frac{x}{e^x} \cdot \sin x = 0 \cdot f \text{ limitata} = 0$   
 $= e^x + o(e^x)$

DEN:  $\frac{x^{15} \ln x}{e^x} = \frac{x^{16}}{e^x} \cdot \frac{\ln x}{x} = 0 \cdot 0 = 0$  quindi è  $o(e^x)$   
 $= 3e^x + o(3e^x)$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x + o(e^x)}{3e^x + o(3e^x)} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{e^x}{3e^x} = \frac{1}{3}$$

### Definizione 12: Nomenclatura

$f, g: X \rightarrow \mathbb{R}, x_0 \in \bar{\mathbb{R}}$  di acc. per  $X$

Se  $\lim |f(x)| = +\infty, \lim |g(x)| = +\infty$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \Rightarrow \begin{array}{ll} +\infty & \text{si dice che } f \text{ è un } \underline{\text{infinito di ordine superiore}} \\ & \text{a } g \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ l \in \mathbb{R} \setminus \{0\} & \text{si dice che } f \text{ e } g \text{ sono } \underline{\text{infiniti dello stesso}} \\ & \underline{\text{ordine}} \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ 0 & \text{si dice che } f \text{ è un } \underline{\text{infinito di ordine inferiore}} \\ & \text{a } g \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ \nexists & \text{si dice che } f \text{ e } g \text{ non sono } \underline{\text{confrontabili}} \end{array}$$

Se  $\lim f(x) = 0, \lim g(x) = 0$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| \Rightarrow \begin{array}{ll} +\infty & \text{si dice che } f \text{ è un } \underline{\text{infinito di ordine inferiore}} \\ & \text{a } g \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ l \in \mathbb{R} \setminus \{0\} & \text{si dice che } f \text{ e } g \text{ sono } \underline{\text{infiniti dello stesso}} \\ & \underline{\text{ordine}} \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ 0 & \text{si dice che } f \text{ è un } \underline{\text{infinito di ordine superiore}} \\ & \text{a } g \text{ per } x \rightarrow x_0 \\ \nexists & \text{si dice che } f \text{ e } g \text{ non sono } \underline{\text{confrontabili}} \end{array}$$

### Esempio 26: Verificare

$\sin x^2$  e  $x^2$  sono infiniti dello stesso ordine per  $x \rightarrow 0$

**Svolgimento:**

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x^2}{x^2} = 1 \quad \checkmark \quad \text{Ricordando il limite notevole } \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x} = 1$$

### Esempio 27: Calcolare

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{4x^2 \sin(\sqrt{x}) + (1 - \cos x)^2}{\sqrt{x} \sinh(x^2) + (e^x - 1)^3}$$

**Svolgimento:** Sapendo che

$$\sin y = y - \frac{y^3}{3!} + o(y^3) \quad \text{per } y \rightarrow 0$$

$$\cos y = 1 - \frac{y^2}{2!} + o(y^2) \quad \text{per } y \rightarrow 0$$

$$e^y = 1 + y + \frac{y^2}{2} + o(y^2) \quad \text{per } y \rightarrow 0$$

$$\sinh y = y + \frac{y^3}{3!} + o(y^3) \quad \text{per } y \rightarrow 0$$

Allora NUM:  $\sin(\sqrt{x}) = x^{1/2} - \frac{x^{3/2}}{3!} + o(x^{3/2}) \quad (1 - \cos x)^2 = (1 - 1 + \frac{x^2}{2} + o(x^2))^2 \quad x \rightarrow 0$

$$= 4x^{5/2} - \frac{4}{6}x^{7/2} + o(x^{7/2}) + \frac{1}{4}x^4 + o(x^4) =$$
$$= 4x^{5/2} + o(x^{5/2}) \quad \text{per } x \rightarrow 0^+ \quad \text{perchè devo prendere ciò che tende a 0 più lentamente}$$

DEN:  $\sqrt{x} \sinh(x^2) = x^{5/2} + \frac{1}{6}x^{9/2} + o(x^{9/2}) \quad (e^x - 1)^3 = (1 - 1 + x + \frac{x^2}{2} + o(x^2))^3 \quad x \rightarrow 0^+$

$$= x^{5/2} + o(x^{5/2}) + x^3 + o(x^3) = x^{5/2} + o(x^{5/2}) \quad \text{per } x \rightarrow 0^+$$

$$\Rightarrow \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{4x^{5/2} + o(x^{5/2})}{x^{5/2} + o(x^{5/2})} = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{4}{1} = 4$$

## 4 Successioni

### Definizione 13: Successione

Una successione è una funzione il cui dominio è  $\mathbb{N}$  o un suo sottoinsieme infinito, per noi avranno valori in  $\mathbb{R}$ , ossia

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$$

Le successioni si scrivono col simbolo  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$

Si dice che:

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = l$$

Se  $\forall V$  intorno di  $l \exists N > 0$  tale che  $a_n \in V \forall n > N$

**Es:**  $\{\frac{1}{n}\}_{n \geq 1}, \quad 1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots \rightarrow ? \quad n \rightarrow +\infty$

**Def:** sia  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  una successione:

1.  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  è convergente se  $\exists \lim a_n \in \mathbb{R}$ . Se  $\lim a_n = 0$ , la successione è infinitesima
2.  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  è divergente se  $\lim a_n = \pm\infty$
3.  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  è regolare o determinata se  $\exists \lim a_n$
4.  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  è irregolare o indeterminata se  $\nexists \lim a_n$



### Esempio 28

$$a_n = \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n, \quad n \geq 1$$

**Svolgimento :**

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = e$$

$a_n$  è convergente.

**Proposizione** sia  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  succ. convergente, allora è anche limitata, ossia  $\exists M > 0$  tale che

$$|a_n| \leq M \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

limitata  $\nRightarrow$  convergente

convergente  $\Rightarrow$  limitata

### Teorema 11: Teorema della permanenza del segno

Se  $\lim a_n = l > 0$ , allora  $a_n > 0$  definitivamente per  $n \rightarrow +\infty$

### Teorema 12: Teorema del Confronto

$\{a_n\}, \{b_n\}$  siano due succ. tali che  $a_n \leq b_n$  def. per  $x \rightarrow +\infty$  e

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = l_a \quad \text{e} \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = l_b$$

Allora  $l_a \leq l_b$

### Teorema 13: Teorema dei due carabinieri

$\{a_n\}, \{b_n\}, \{c_n\}$  succ. tali che  $a_n \leq b_n \leq c_n$  def. per  $n \rightarrow +\infty$  Se

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n = \lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = l \in \mathbb{R}$$

Allora

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} b_n = l$$

**Gerarchia degli infiniti :**

$$n^n \gg n! \gg e^n \gg n^k \gg \log_b n \quad \text{per } n \rightarrow +\infty \quad a, b > 1 \quad k > 0$$

### Definizione 14: Successioni monotone

$\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  succ. reale, si dice

- **Crescente:** se  $a_{n+1} \geq a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$
- **Decrescente:** se  $a_{n+1} \leq a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$
- **Strett. Crescente:** se  $a_{n+1} > a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$
- **Strett. Decrescente:** se  $a_{n+1} < a_n \quad \forall n \in \mathbb{N}$

Es:

$\{2^n\} = 1, 2, 4, \dots$  Strett. crescente

$\{1^n\}$  Costante

$\{\frac{1}{2^n}\}$  Strett. decrescente

$\{1 + \frac{1}{n}\}$  Strett. decrescente

#### Definizione 15: Successione di Cauchy

Una succ. reale  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  si dice di Cauchy (o successione fondamentale) se  $\forall \epsilon > 0 \quad \exists N > 0$  tale che

$$n, p > N \Rightarrow |a_n - a_p| < \epsilon$$

Es:  $a_n = (-1)^n$  non è di Cauchy

$a_n = \frac{1}{1+n}$  è di Cauchy

Una successione reale  $a_n$  è convergente se e solo se è di Cauchy.

#### Definizione 16: Sottosuccessioni

Data una succ.  $a_n$  si dice sottosuccessione di  $\{a_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  una succ.  $\{a_{n_k}\}_{k \in \mathbb{N}}$  tale che  $a_k$  sia una succ. strett. crescente di numeri naturali, cioè  $n_{k+1} > n_k \quad \forall k \in \mathbb{N}$

Es:  $n_k = 2k, k \in \mathbb{N} \quad a_{n_k} = a_{2k}, k \in \mathbb{N}$  prendo solo gli elementi pari

**Osservazione:** per mostrare che una succ. non ha limite, mi basta mostrare che due sottosucc. hanno limite diverso o che una non abbia limite.

#### Teorema 14: Teorema di Bolzano-Weistrass

Sia  $a_n$  una succ. limitata. Allora  $\exists$  una sottosucc. di  $a_n$  convergente

#### Esempio 29: Calcolare

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{\ln((n+5)!) - \ln(n! + 5)}{\ln(n^\alpha + \cos(n\pi))}$$

al variare di  $\alpha > 0$

**Svolgimento:**

$$\begin{aligned} \text{NUM} &= \ln((n+5)!) - \ln(n! + 5) = \ln((n+5)(n+4)(n+3)(n+2)(n+1)n!) - \ln(n!(1 + \frac{5}{n!})) = \\ &= \ln((n+5)(n+4)(n+3)(n+2)(n+1))) + \underbrace{\ln(n!) - \ln(n!) - \ln(1 + \frac{5}{n!})}_0 = \\ &= \ln((n+5)(n+4)(n+3)(n+2)(n+1))) = \\ &= \ln(n^5) + o(\ln n^5) \\ &= 5 \ln n + o(\ln n) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{DEN} &= \ln(n^\alpha + \underbrace{\cos(n\pi)}_{-1^n}) = \ln(n^\alpha(1 + \frac{-1^n}{n^\alpha})) = \\
&= \ln n^\alpha \cdot \underbrace{\ln 1 + \frac{-1^n}{n^\alpha}}_0 = \\
&= \ln n^\alpha = \\
&= \alpha \ln n + o(\ln n)
\end{aligned}$$

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{5 \ln n + o(\ln n)}{\alpha \ln n + o(\ln n)} = \frac{5}{\alpha}$$

## 5 Funzioni Continue

### Definizione 17: Funzione Continua

$f$  funzione reale di variabile reale,  $x_0 \in \text{dom} f$ .  $f$  si dice continua in  $x_0$  se è verificata una delle seguenti:

- $x_0$  è punto isolato del dominio
- Se  $x_0$  non è punto isolato del dominio (ossia  $x_0$  punto di acc. per  $\text{dom} f$ ). Allora

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

Una funzione è continua se è continua in ogni punto del suo dominio.

**Osservazione**: Si parla di continuità di  $f$  solo nei punti del dominio di  $f$ .

### Esempio 30

$$f(x) = \frac{1}{x} \quad \text{dom} f = \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1}{x} = \frac{1}{x_0} = f(x_0) \quad \forall x_0 \in \text{dom} f$$

$\Rightarrow f$  è continua in  $x_0 \quad \forall x_0 \in \text{dom} f = \mathbb{R} \setminus \{0\}$

**Def**: Se  $x_0 \in \text{dom} f$  è punto di acc. per  $\text{dom} f$ , ho che  $f$  è continua in  $x_0 \Leftrightarrow \forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0$  tale che se  $|x - x_0| < \delta$  e  $x \in \text{dom} f$  allora:

$$|f(x) - f(x_0)| < \epsilon \quad \Leftrightarrow \quad \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

### Definizione 18: Discontinuità di I specie

Sia  $f$  funzione reale di variabile reale,  $x_0 \in \text{dom} f$  punto di acc. destro e sinistro per  $\text{dom} f$ . Se esistono i limiti finiti:

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) \quad e \quad \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$$

Ma

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) \neq \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x)$$

Allora si dice che  $x_0$  è punto di discontinuità di I specie o di salto

#### Definizione 19: Discontinuità di II specie

Sia  $f$  funzione reale di variabile reale,  $x_0 \in \text{dom} f$ , punto di acc. destro e sinistro. Se:

1. Almeno uno dei due limiti sinistro o destro in  $x_0$  sia infinito  
Oppure
  2. Almeno uno dei due limiti sinistro o destro in  $x_0$  non esiste
- Allora si dice che  $x_0$  è punto di discontinuità di II specie

#### Definizione 20: Discontinuità di III specie

$I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in I$ ,  $l \in \mathbb{R}$ , tale che

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \neq f(x_0)$$

Allora  $x_0$  si dice punto di discontinuità eliminabile per  $f$

#### Teorema 15: Teorema di Weistrass

Sia  $f$  funzione reale definita e continua su  $[a, b]$ . Allora  $f$  ha massimo e minimo (assoluti) in  $[a, b]$ , cioè  $\exists x_m, x_M \in [a, b]$  tale che:

$$\min_{x \in [a, b]} f(x) = f(x_m) \quad \max_{x \in [a, b]} f(x) = f(x_M)$$

**Es :**  $\sin[-2\pi, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}$

$$\min_{x \in [-2\pi, 2\pi]} \sin x = -1 \quad \max_{x \in [-2\pi, 2\pi]} \sin x = 1$$

#### Teorema 16: Teorema degli zeri

Sia  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  continua in  $[a, b]$  chiuso e limitato. Se  $f(a) \cdot f(b) < 0$   
Allora  $\exists \epsilon \in ]a, b[$  tale che  $f(\epsilon) = 0$

#### Teorema 17: Teorema dei valori intermedi

Siano  $I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  continua. Allora  $f(I)$  è un intervallo, cioè  $\forall x_1, x_2 \in I$  e  $y \in \mathbb{R}$  tale che

$$f(x_1) < y < f(x_2)$$

Allora  $\exists \epsilon \in I$  tale che  $f(\epsilon) = y$

#### Teorema 18: Continuità della funzione inversa

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  continua e invertibile. Allora:

1.  $f$  è strettamente monotona
2. la  $f$  inversa  $f^{-1} : f(I) \rightarrow I$  è continua

## 6 Derivata

### Definizione 21: Calcolo differenziale

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $x_0 \in I$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  funzione. Se esiste il limite:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \text{ rapporto incrementale} \quad (= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h})$$

Tale limite si dice derivata di  $f$  in  $x_0$  (oppure derivata prima) e si indica con

$$f^1(x_0), Df(x_0), \frac{d}{dx}f(x_0)$$

Inoltre se il limite esiste finito,  $f$  si dice derivabile in  $x_0$ .

Se  $f$  è derivabile  $\forall x_0 \in I$ ,  $f$  si dice derivabile in  $I$

**Es:**  $f(x) = x^n$ ,  $x \in \mathbb{R}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ . Sia  $x_0 \in \mathbb{R}$  Calcolo  $f^1(x_0)$

$$f(x) = 1 \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad n = 0$$

$$\begin{aligned} f^1(x_0) &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \\ &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1 - 1}{x - x_0} = 0 \\ f^1(x_0) &= 0 \quad \forall x_0 \in \mathbb{R} \quad \text{se } n = 0 \end{aligned}$$

$$f(x) = x \quad \forall x \in \mathbb{R}, \quad n = 1$$

$$\begin{aligned} f^1(x_0) &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x - x_0}{x - x_0} = 1 \\ f^1(x_0) &= 1 \quad \forall x_0 \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

$$\text{Se } n > 1 \quad f(x) = x^n$$

$$\begin{aligned} f^1(x_0) &= \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{x^n - x_0^n}{x - x_0} = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(x_0 + h)^n - x_0^n}{h} = \end{aligned}$$

$$\text{Utilizziamo il binomio di Newton: } (a + b)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} a^{n-k} b^k$$

$$\begin{aligned} &= \sum_{k=0}^n \frac{n!}{k!(n-k)!} \cdot x_0^{n-k} \cdot h^k = \\ &= \underbrace{\frac{n!}{n!} \cdot x_0^n \cdot 1}_{x_0^n} + \underbrace{\frac{n!}{(n-1)!} \cdot x_0^{n-1} \cdot h}_{n \cdot x_0^{n-1} \cdot h} + \underbrace{\frac{n!}{2(n-2)!} \cdot x_0^{n-2} \cdot h^2}_{\frac{1}{2}n(n-1) \cdot x_0^{n-2} \cdot h^2} \quad \text{nel caso di } n = 2 \text{ (per gli altri valori è analogo)} \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{x_0^n + n \cdot x_0^{n-1} \cdot h + \frac{1}{2}n(n-1) \cdot x_0^{n-2} \cdot h^2 - x_0^n}{h} = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} \frac{n \cdot x_0^{n-1} \cdot h + \frac{1}{2}n(n-1) \cdot x_0^{n-2} \cdot h^2}{h} = \\ &= \lim_{h \rightarrow 0} n \cdot x_0^{n-1} + \underbrace{\frac{1}{2}n(n-1) \cdot x_0^{n-2} \cdot h}_0 = \\ &= n \cdot x_0^{n-1} \quad \forall x_0 \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

## Tabella Derivate Semplici

$f(x)$	$f'(x)$
$k$	$0$
$x^n$	$n \cdot x^{n-1}$
$\ln  x $	$\frac{1}{x}$
$\log_a  x $	$(\log_a e) \cdot \frac{1}{x}$
$e^x$	$e^x$
$a^x$	$(\ln a) \cdot a^x$
$\sin x$	$\cos x$
$\cos x$	$-\sin x$
$\tan x$	$\frac{1}{\cos^2 x} = 1 + \tan^2 x$
$\cot x$	$-\frac{1}{\sin^2 x} = -1 - \cot^2 x$
$\arcsin x$	$\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\arccos x$	$-\frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$
$\arctan x$	$\frac{1}{1+x^2}$

### Teorema 19: Derivabilità

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $x_0 \in I$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  derivabile in  $x_0$ . Allora,  $f$  è continua in  $x_0$ .

**Dim:** Devo mostrare

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = f(x_0)$$

Poichè  $f$  è derivabile in  $x_0$

$$f(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + o(x - x_0) \quad \text{per } x \rightarrow x_0$$

Quindi

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} (f(x_0) + \underbrace{f'(x_0)(x - x_0)}_0 + \underbrace{o(x - x_0)}_0) = f(x_0) \quad \checkmark$$

**Osservazione:**  $f$  derivabile in  $x_0 \Rightarrow f$  e  $x_0 \nRightarrow f$  continua in  $x_0$

### Definizione 22: Derivata destra e sinistra

Sia  $I$  intervallo di  $\mathbb{R}$ ,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in I$ . Se esiste

$$\lim_{x \rightarrow x_0^+} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \quad (= \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0 + h) - f(x_0)}{h})$$

Tale limite si dice derivata destra di  $f$  in  $x_0$ . Se  $f_+^1(x_0) \in \mathbb{R}$ ,  $f$  si dice derivabile da destra in  $x_0$

### Osservazione :

$f$  derivabile in  $x_0$



$f$  derivabile da destra in  $x_0$   
 $f$  derivabile da sinistra in  $x_0$   
 $f_+^1(x_0) = f_-^1(x_0)$

### Teorema 20: Algebra delle derivate

$f, g$  derivabile in  $x_0 \in I$ ,  $I$  intervallo aperto di  $\mathbb{R}$ ,  $\alpha \in \mathbb{R}$

1.  $\alpha f$  è derivabile in  $x_0$  e  $(\alpha f)^1(x_0) = \alpha f^1(x_0)$
2.  $f + g$  è derivabile in  $x_0$   $(f + g)^1(x_0) = f^1(x_0) + g^1(x_0)$
3.  $f \cdot g$  è derivabile in  $x_0$   $(f \cdot g)^1(x_0) = f^1(x_0) \cdot g(x_0) + f(x_0) \cdot g^1(x_0)$
4. Se  $g(x_0) \neq 0$ , allora  $f/g$  è derivabile in  $x_0$   $(\frac{f}{g})^1(x_0) = \frac{f^1(x_0) \cdot g(x_0) - f(x_0) \cdot g^1(x_0)}{g(x_0)^2}$

### Derivata della $f$ inversa

$f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $I$  intervallo aperto,  $f$  continua, invertibile in  $I$  e derivabile in  $x_0$ , tale che  $f^1(x_0) \neq 0$ . Allora  $f^{-1}$  è invertibile in  $y_0 = f(x_0)$  e si ha:

$$(f^{-1})^1(y_0) = \frac{1}{f^1(x_0)} = f^1(f^{-1}(y_0))$$

### Esempio 31

$$D(\arcsin y) = ?$$

### Svolgimento :

Posso calcolare la derivata negli  $y_0 = \sin x_0$  ove  $\sin^1(x_0) \neq 0$  ossia  $\cos(x_0) \neq 0$ , quindi  $x_0 = \pm \pi/2$

$$\begin{aligned} D \arcsin y &= \frac{1}{(D \sin)(\arcsin y)} = \frac{1}{\cos(\arcsin y)} = \\ &= \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\arcsin y)}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\sin(\arcsin y))^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 x}} \end{aligned}$$

### Teorema 21: Derivata delle $f$ composte

Siano  $f, g$  funzioni reali di variabile reale, definite in un intervallo  $I$ , se  $g$  è derivabile in  $x_0$  e  $f$  è derivabile in  $g(x_0)$ . Allora si ha:

$$Df(g(x_0)) = f^1(g(x_0)) \cdot g^1(x_0)$$

### Esempio 32

Calcolare la derivata di  $x^\alpha$  con  $\alpha > 0$

**Svolgimento:**  $x^\alpha = e^{\alpha \log x} = f \cdot g(x)$   $f(y) = e^y$   $g(x) = \alpha \log x$   
 $f^1(y) = e^y$ ,  $g^1(x) = \alpha \cdot \frac{1}{x}$   $D(x^\alpha) = e^{\alpha \log x} \cdot (\alpha \cdot \frac{1}{x}) = \alpha \cdot x^{\alpha-1}$

### Definizione 23: Punti di non derivabilità

$I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  con derivata sinistra e destra in  $x_0$  tale che:

$$f_+^1(x_0) \neq f_-^1(x_0)$$

E almeno una delle due sia finita, allora  $x_0$  si dice punto angoloso

### Definizione 24

$f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $I$  intervallo aperto,  $x_0 \in I$  e si indica:

$$f^1(x_0) = \pm\infty$$

Allora  $x_0$  si dice punto di flesso a tangente verticale

Se, invece si ha:

$$f_-^1(x_0) = -\infty \quad f_+^1(x_0) = +\infty$$

Oppure il contrario,  $x_0$  si dice punto di cuspid

### Teorema 22: Limite della derivata

$I \subseteq \mathbb{R}$ , intervallo,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $x_0 \in I$ . Supp:

1.  $f$  sia continua in  $x_0$
2.  $f$  sia derivabile in  $I \setminus \{x_0\}$
3.  $\exists \lim_{x \rightarrow x_0} f^1(x)$

Allora  $\exists f^1(x_0)$  e vale

$$f^1(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} f^1(x)$$

In particolare se il limite è in  $\mathbb{R}$ ,  $f$  è derivabile.

### Definizione 25: Derivata di ordine superiore

$I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $f : I \rightarrow \mathbb{R}$  derivabile. Se  $f^1$  è derivabile in  $x_0$ , allora  $f$  è derivabile due volte in  $x_0$  e si dice che tale valore è la derivata seconda di  $f$  in  $x_0$  e si indica con

$$f^{11}(x_0), D^2 f(x_0), \frac{d^2}{dx^2} f(x_0)$$

**Osservazione:** dalla definizione di derivata seconda si ottiene anche quella di derivata n-esima di  $f$  in  $x_0$ .

**Formule di Leibniz:** Date  $f, g$  derivabili n volte in  $x_0$  si ha:

$$(f \cdot g)^n(x_0) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \cdot f^{(n-k)}(x_0) \cdot g^k(x_0)$$



### Teorema 23: Teorema di de L'Hopital

Siano  $f, g : ]a, b[ \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $a, b \in \bar{\mathbb{R}}$   $f, g$  derivabile in  $]a, b[$ . Se:

1.  $g'(x) \neq 0 \quad \forall x \in ]a, b[$
2.  $f(x), g(x) \rightarrow 0$  oppure  $f(x), g(x) \rightarrow +\infty$  per  $x \rightarrow a^+$
3.  $\exists \lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f'(x)}{g'(x)} = l \in \mathbb{R}$

Allora

$$\lim_{x \rightarrow a^+} \frac{f(x)}{g(x)} = l$$

Si ha l'analogo per  $x \rightarrow b^-$  oppure per  $x \rightarrow x_0$   $x_0 \in ]a, b[$

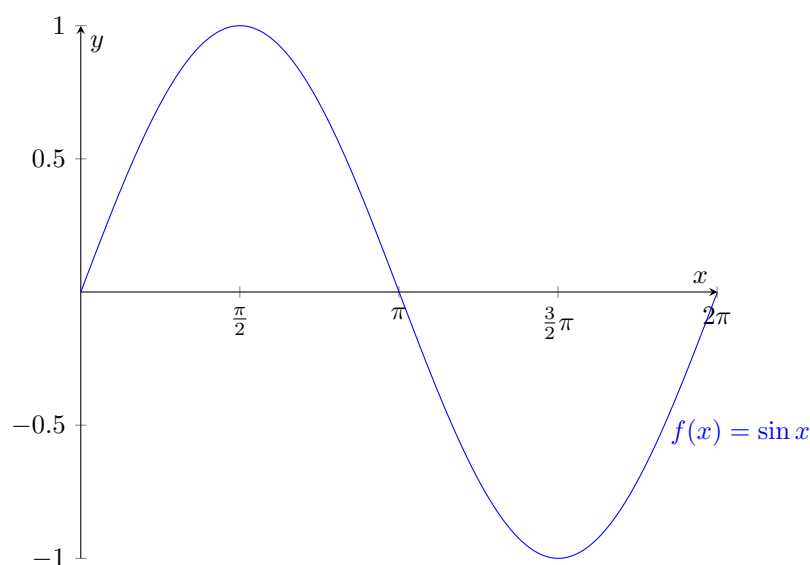
**Osservazione**: non sempre applicando de l'Hopital si semplifica il limite.

## 6.1 Massimo e minimo assoluto di una funzione

### Definizione 26

$M$  massimo assoluto per  $f$  se  $\exists x_1 \in X$  tale che  $f(x_1) = M$  e  $f(x) \leq f(x_1) = M \quad \forall x \in X$  ( $x_1$  è punto di massimo assoluto), per il minimo assoluto si ha la situazione analoga

**Esempio**:  $\sin x$



Punti di massimo assoluto = 1;

Punti di minimo assoluto = -1

**Osservazione**: per quanto riguarda massimo e minimo locale se  $\exists U$  intorno di  $x_0$  si dice che  $f(x_0)$  è max o min locale se  $f(x_0) \geq f(x)$  oppure  $f(x_0) \leq f(x) \quad \forall x \in U \cap X$

### Teorema 24: Teorema di Fermat o del punto critico

$f : ]a, b[ \rightarrow \mathbb{R} \quad x_0 \in ]a, b[, f$  derivabile in  $x_0$ ,  $f$  ha estremo locale in  $x_0$ . Allora  $f'(x_0) = 0$

**Dim**: Ipotizziamo che  $x_0$  è punto di estremo locale e  $f$  è derivabile in  $x_0$ . Allora esiste  $U \subseteq ]a, b[$  intorno di  $x_0$  tale che

$$f(x) \leq f(x_0) \quad \forall x \in U$$

Quindi

$$f(x) - f(x_0) \leq 0 \quad \forall x \in U$$

Osservo

$$\frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0} \leq 0 \quad x > x_0 \quad \geq 0 \quad x < x_0$$

Applicando la definizione di derivata esiste, quindi, il limite di  $\frac{f(x)-f(x_0)}{x-x_0}$  che è  $\leq 0$  per  $x \rightarrow x_0^+$  oppure  $\geq 0$  per  $x \rightarrow x_0^-$

$$\Rightarrow 0 \leq f_-^1(x_0) = f^1(x_0) = f_+^1(x_0) \leq 0$$

$$\Rightarrow f^1(x_0) = 0$$

**Osservazione:** il teorema non è valido se  $x_0 = a$  o  $x_0 = b$  e anche se  $f$  non è derivabile.

#### Teorema 25: Teorema di Rolle

$$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R},$$

1.  $f$  continua in  $[a, b]$

2.  $f$  derivabile in  $]a, b[$

3.  $f(a) = f(b)$

Allora esiste  $c \in ]a, b[$  tale che  $f^1(c) = 0$

**Dim:** Se  $f$  non c'è nulla da dimostrare poichè  $f^1(c) = 0$ .

Suppongo che  $f$  non sia costante, per il teorema di Weistrass ha max e min in  $[a, b]$  tali che

$$f(x_m) \leq f(x) \leq f(x_M) \quad \forall x \in [a, b]$$

È necessario dimostrare che  $x_m$  o  $x_M$  siano all'interno dell'intervallo aperto  $a, b$ . Perchè per il teorema di Fermat  $f^1$  si annulla in tali punti.

Suppongo per assurdo che  $x_m$  e  $x_M$  appartengono agli estremi  $a$  e  $b$  compresi. Di conseguenza ottengo che, per il terzo punto del teorema di Rolle,  $f(a) = f(b)$ , quindi,  $f(x_m) = f(x_M)$  ciò implica che  $f$  è continua, ma all'inizio abbiamo considerato  $f$  come non continua.

#### Teorema 26: Teorema di Lagrange

Sia  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  continua in  $[a, b]$  e derivabile in  $]a, b[$ . Allora esiste  $c \in ]a, b[$  tale che

$$\frac{f(b) - f(a)}{b - a} = f^1(c)$$

**Dim:** La dimostrazione viene da se applicando la formula del teorema, la prima parte indica il coefficiente angolare della retta che passa secante per i due estremi  $a, b$  che è uguale alla derivata prima della funzione nel punto  $c$ , che è il coefficiente angolare della tangente nel punto  $c$

#### Teorema 27: Teorema di Cauchy

$f, g : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ , continue in  $[a, b]$  e derivabili in  $]a, b[$ . Allora esiste  $c \in ]a, b[$  tale che

$$g^1(c)[f(b) - f(a)] = f^1(c)[g(b) - g(a)]$$

Se  $g^1(x) \neq 0$  vale:

$$\frac{f(b) - f(a)}{g(b) - g(a)} = \frac{f^1(c)}{g^1(c)}$$

**Osservazione:** Cauchy  $\Rightarrow$  Lagrange  $\Rightarrow$  Rolle  
 $\underbrace{\quad}_{g(x)=x} \quad \underbrace{\quad}_{f(a)=f(b)}$

### Teorema 28: Monotonie

$f : ]a, b[ \rightarrow \mathbb{R}$  derivabile:

1.  $f$  è crescente  $\Leftrightarrow f'(x) \geq 0 \quad \forall x \in ]a, b[$
2.  $f$  è decrescente  $\Leftrightarrow f'(x) \leq 0 \quad \forall x \in ]a, b[$
3. Se  $f'(x) > 0 \quad \forall x \in ]a, b[ \Rightarrow f$  è strett crescente
4. Se  $f'(x) < 0 \quad \forall x \in ]a, b[ \Rightarrow f$  è strett decrescente

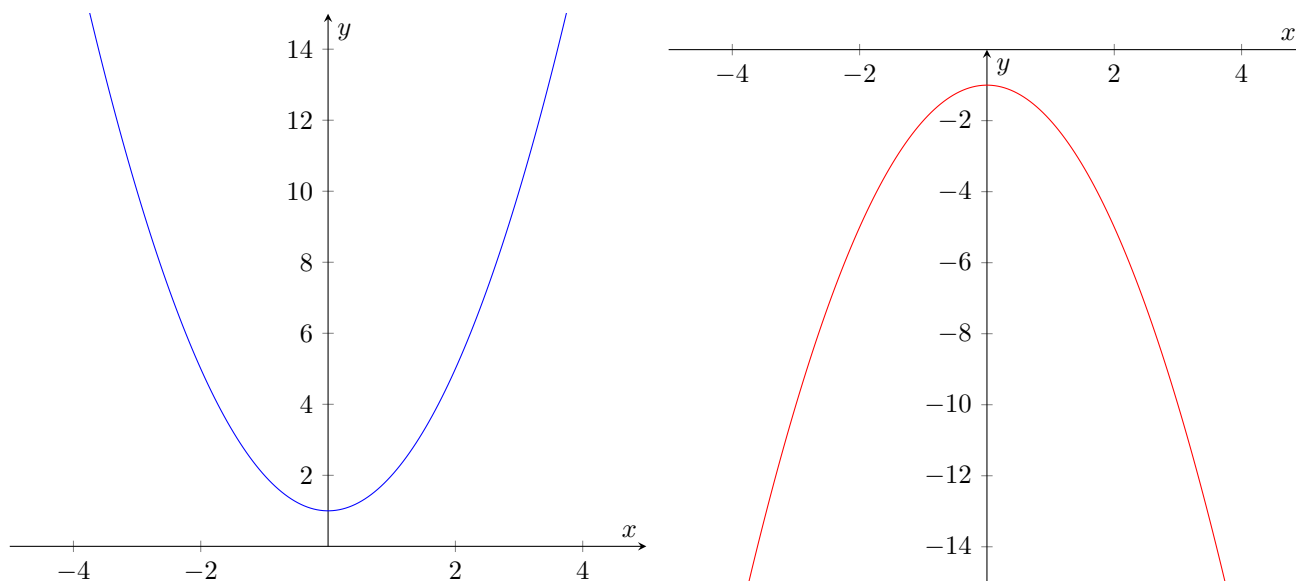
**Dim:** faccio solo punto 1 (per gli altri il ragionamento è analogo)

Se  $f$  è crescente e prendo due punti  $x, y$  con  $y > x$ , allora di conseguenza ho che  $f(y) \geq f(x)$ , quindi applicando Lagrange ho  $\frac{f(y)-f(x)}{y-x} = f'(c) \geq 0$  quindi se faccio il limite per  $y \rightarrow x^+$  ottengo che  $f'_+(x) \geq 0$  se ora applico il ragionamento per ogni  $x$  ottengo che  $f'(x) \geq 0$ . ✓

## 7 Studio di Funzione

### Definizione 27: Funzioni concave e convesse

$f : \mathbb{R} \supseteq I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $I$  intervallo,  $f$  è convessa in  $I$  se  $\forall x_1, x_2 \in I$ , il segmento che congiunge  $x_1, f(x_1)$  e  $x_2, f(x_2)$  non ha punto sotto il grafico di  $f$ . Se gli unici punti che appartengono al grafico di  $f$  sono gli estremi del segmento, allora  $f$  si dice strettamente convessa.  
 $f$  è concava se  $-f$  è convessa,  $f$  è strettamente concava se  $-f$  è strettamente convessa



### Definizione 28: Asintoti

Sia  $f$  funzione reale di variabile reale:

- se  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = c \in \mathbb{R} \Rightarrow$  la retta  $y = c$  è asintoto orizzontale a  $+\infty$
- se  $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = c \in \mathbb{R} \Rightarrow$  la retta  $y = c$  è asintoto orizzontale a  $-\infty$

Per  $x_0 \in \mathbb{R}$  punto di acc. per dom  $f$

- se  $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = \pm\infty$  oppure vale lo stesso per  $x \rightarrow x_0^-$ , allora la retta  $x = x_0$  è asintoto verticale

Se esiste  $m, q \in \mathbb{R}$ ,  $m \neq 0$

- $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} \frac{f(x)}{x} = m$  e  $\lim_{x \rightarrow \pm\infty} f(x) - m \cdot x = q$ , allora la retta  $y = m \cdot x + q$  è asintoto obliquo per  $x \rightarrow \pm\infty$

### Esempio 33: Studio di funzione

$$f(x) = |\arctan(\log x)|$$

**Dominio** :  $\log x \rightarrow x > 0$  quindi  $]0, +\infty[$

**Simmetrie e Periodicità** : non è pari  $f(-x) \neq f(x)$  e non è dispari  $f(-x) \neq -f(x)$  per ogni  $x \in \text{dom} f$ , inoltre non è presente nessuna periodicità evidente

**Limiti agli estremi di dom  $f$**  :

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} |\arctan(\log x)| = |\arctan(-\infty)| = \left| -\frac{\pi}{2} \right| = \frac{\pi}{2}$$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} |\arctan(\log x)| = |\arctan(+\infty)| = \frac{\pi}{2}$$

Abbiamo asintoto orizzontale per  $x \rightarrow +\infty$  a  $\frac{\pi}{2}$  ma non abbiamo asintoto verticale

**Segno** :  $|\arctan(\log x)| > 0$  verificata  $\forall x \in \text{dom} f$

**Continuità** :  $f$  è composizione di funzioni continue, quindi è continua nel suo dominio.

**Derivabilità** :  $f$  è derivabile in  $]0, +\infty[ \setminus \{1\}$  perchè per  $x = 1$   $f(x) = 0$

$$f'(x) \text{ per } 0 < x < 1 = -\frac{1}{1+(\log x)^2} \cdot \frac{1}{x}$$

$$f'(x) \text{ per } 1 < x = \frac{1}{1+(\log x)^2} \cdot \frac{1}{x}$$

Ora verifichiamo se è derivabile in  $x = 1$

$$\lim_{x \rightarrow 1^-} -\frac{1}{1+(\log x)^2} \cdot \frac{1}{x} = -\frac{1}{1+0} \cdot 1 = -1$$

$$\lim_{x \rightarrow 1^+} \frac{1}{1+(\log x)^2} \cdot \frac{1}{x} = \frac{1}{1+0} \cdot 1 = 1$$

Derivata destra e sinistra sono diverse quindi non è derivabile in  $x = 1$ , che è quindi punto angoloso

**Segno derivata** :  $f'(x) = -\frac{1}{1+(\log x)^2} \cdot \frac{1}{x} = < 0 \cdot > 0 = < 0 \quad \forall x \in ]0, 1[$  quindi in quell'intervallo  $f$  è strett decrescente

$f'(x) = \frac{1}{1+(\log x)^2} \cdot \frac{1}{x} = > 0 \cdot > 0 = > 0 \quad \forall x \in ]1, +\infty[$  quindi in quell'intervallo  $f$  è strett crescente

**Derivata Seconda** :  $f''(x) = -[(-1) \cdot (1 + \log^2 x)^{-2} \cdot 2 \log x \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{x} + \frac{1}{1+\log^2 x} \cdot \frac{-1}{x^2}] \quad \forall x \in ]0, 1[$

$f''(x) = [(-1) \cdot (1 + \log^2 x)^{-2} \cdot 2 \log x \cdot \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{x} + \frac{1}{1+\log^2 x} \cdot \frac{-1}{x^2}] \quad \forall x \in ]1, +\infty[$

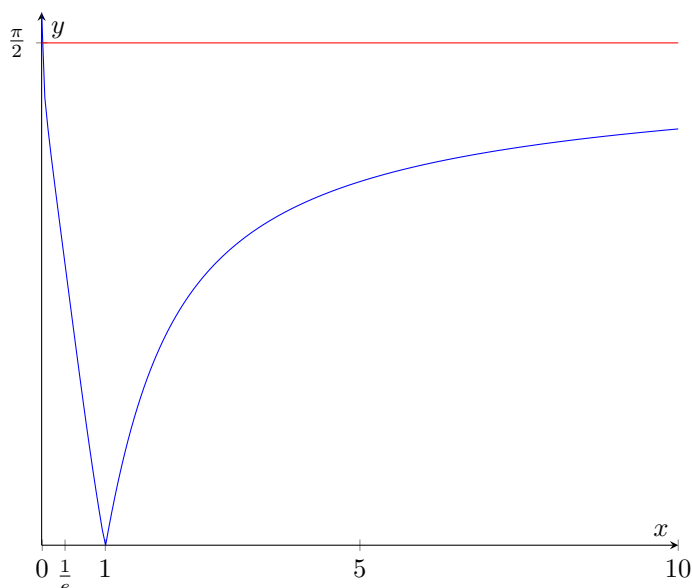
$= \frac{-1}{(1+\log^2 x)^2} \cdot \frac{1}{x^2} \cdot [2 \log x + 1 + \log^2 x] = < 0 \cdot > 0 \cdot \geq 0 = < 0 \quad (\log x + 1)^2 = 0 \Leftrightarrow \log x = -1 \Leftrightarrow x = \frac{1}{e} \in ]0, 1[$

la derivata seconda in quell'intervallo è però  $\geq 0$

Quindi la derivata seconda di  $f$  si annulla per  $x = \frac{1}{e}$  ed è maggiore di zero per ogni  $x \in ]0, 1[ \setminus \{\frac{1}{e}\}$  quindi  $f$  è strett convessa in  $]0, 1[ \setminus \{\frac{1}{e}\}$ , però  $x = \frac{1}{e}$  non è punto di flesso

Invece nell'intervallo  $]1, +\infty[$   $f''(x) < 0$  è quindi strett concava nell'intervallo

**Grafico** :



**Massimo e minimo**:  $f$  non ha max locale nel suo dominio, ma ha un min locale e assoluto in  $x = 1$ .  $x = 0$  è punto di max assoluto per l'estensione per continuità di  $f$ .

#### Definizione 29: Formula di Taylor

Suppongo:

$$f'(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x) - f(x_0)}{x - x_0}$$

$$\Rightarrow f(x) - f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x - x_0) + o(x - x_0) \text{ per } x \rightarrow x_0$$

$$\Rightarrow f(x) = \underbrace{f(x_0) + f'(x_0) \cdot (x - x_0)}_{\text{polinomio di grado 1}} + \underbrace{o(x - x_0)}_{\text{ERRORE}} \text{ per } x \rightarrow x_0$$

se  $f$  è derivabile  $\Rightarrow f = \text{polinomio di grado 1} + \text{errore}$

**Esempio**:  $f(x) = e^x$ ,  $x_0 = 0$

$$\begin{aligned} e^x &= e^0 + e^0 \cdot (x - 0) + o(x - 0) \text{ per } x \rightarrow 0 \\ &= e^x = 1 + x + o(x) \text{ per } x \rightarrow 0 \end{aligned}$$

#### Definizione 30: Polinomio di Taylor

Prendo  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $I$  intervallo,  $x_0$  punto interno ad  $I$ ,  $f$  derivabile  $n$  volte in  $x_0$ .

Chiamo polinomio di Taylor di grado  $n$  centrato in  $x_0$  il polinomio:

$$P_{x_0}^n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} \cdot (x - x_0)^k$$

$$f^{(0)} = f$$

#### Teorema 29: formula di Taylor con resto nella forma di Peano

Se  $f: I \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $I \subseteq \mathbb{R}$  intervallo,  $x_0$  punto interno ad  $I$ ,  $f$  derivabili  $n$  volte in  $x_0$ , allora:

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} \cdot (x - x_0)^k + o((x - x_0)^n) \text{ per } x \rightarrow x_0$$

**Osservazione**: se  $x_0 = 0$ , si chiama polinomio e formula di McLaurin.

## Sviluppi di McLaurin

$f(x)$	$P_0^n(x)$	$\sum_{k=0}^{n \rightarrow +\infty}$
$e^x$ per $x \rightarrow 0$	$1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$	$\sum \frac{x^k}{k!} + o(x^k)$
$\log(1+x)$ per $x \rightarrow 0$	$x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \dots$	$\sum (-1)^{k+1} \frac{x^k}{k} + o(x^k)$
$(1+x)^\alpha$ per $x \rightarrow 0$	$1 + \alpha x + \frac{\alpha(\alpha-1)x^2}{2} + \dots$	$\sum \binom{\alpha}{k} x^k + o(x^k)$
$\cos x$ per $x \rightarrow 0$	$1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \dots$	$\sum (-1)^k \frac{x^{2k}}{(2k)!} + o(x^{2k})$
$\cosh x$ per $x \rightarrow 0$	$1 + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots$	
$\sin x$ per $x \rightarrow 0$	$x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \dots$	$\sum (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!} + o(x^{2k+1})$
$\sinh x$ per $x \rightarrow 0$	$x + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots$	
$\arctan x$ per $x \rightarrow 0$	$x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \dots$	$\sum (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{2k+1} + o(x^{2k+1})$
$\tan x$ per $x \rightarrow 0$	$x + \frac{x^3}{3} + \frac{2x^5}{15} + \dots$	

## 8 Serie Numeriche