

# Appunti di Matematica

Nicola Ferru



# Indice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 0.1      | Premesse...   | 9         |
| 0.2      | Simboli   | 11        |
| <b>I</b> | <b>Matematica analisi 1 2021/22</b>                                       | <b>13</b> |
| <b>1</b> | <b>Cenni di teoria degli insiemi</b>                                      | <b>15</b> |
| 1.0.1    | Operazioni tra gli insiemi  | 15        |
| 1.1      | Sottoinsiemi di $\mathbb{R}$  | 15        |
| 1.1.1    | Definizione   | 15        |
| 1.2      | Funzione di una variabile   | 16        |
| 1.2.1    | Definizione   | 16        |
| <b>2</b> | <b>Studio di funzione</b>   | <b>19</b> |
| 2.1      | Grafica delle funzioni elementari   | 19        |
| 2.1.1    | Funzione lineare $y = mx + q, m, q \in \mathbb{R}$                        | 19        |
| 2.1.2    | Funzione valore assoluto $y =  x $  | 20        |
| 2.1.3    | Funzione potenza $y = x^n, n \in \mathbb{N}, \text{pari}$                 | 20        |
| 2.1.4    | Funzione potenza $y = x^\alpha, \alpha \in \mathbb{R}$ (ma non razionale) | 21        |
| 2.1.5    | Funzione potenziale $y = x^{\frac{m}{n}}, m, n \in \mathbb{Z}$            | 21        |
| 2.1.6    | Funzione logaritmo $y = \log_a x$   | 21        |
| 2.1.7    | Le coniche: la circonferenza  | 22        |
| 2.1.8    | Le coniche: l'ellisse   | 23        |
| 2.1.9    | Le coniche: iperbole  | 23        |
| 2.1.10   | Le coniche: iperbole equilatera   | 24        |
| 2.1.11   | Le coniche: parabola  | 24        |
| 2.1.12   | Le funzioni trigonometriche   | 25        |
| 2.1.13   | Le funzioni trigonometriche inverse                                       | 27        |
| 2.2      | Limiti  | 31        |
| 2.2.1    | Limite di una funzione  | 32        |
| 2.2.2    | Definizione di Limite destro  | 32        |
| 2.2.3    | Definizione di limite sinistro "da sinistra"                              | 32        |
| 2.2.4    | Teorema d'unicità del limite "da destra"                                  | 32        |
| 2.2.5    | Teorema (algebra dei limiti)  | 34        |
| 2.2.6    | Convenzioni con $\infty$  | 34        |
| 2.2.7    | Forme indeterminate   | 35        |
| 2.2.8    | Teorema del confronto   | 35        |
| 2.2.9    | Limite di funzione composta   | 35        |
| 2.2.10   | Limiti Notevoli   | 35        |
| 2.2.11   | Infinitesimi e infiniti   | 36        |
| 2.2.12   | Funzioni continue   | 38        |
| 2.2.13   | Criteri di invertibilità  | 39        |

|         |   |    |
|---------|---|----|
| 2.3     | Calcolo differenziale per funzioni di una variabile . . . . .       | 39 |
| 2.3.1   | Derivata di una funzione . . . . .                                  | 39 |
| 2.3.2   | Definizione . . . . .   | 39 |
| 2.3.3   | Continuità e derivabilità . . . . .                                 | 39 |
| 2.4     | Punti di non derivabilità . . . . .                                 | 40 |
| 2.4.1   | Punto angoloso . . . . .  | 40 |
| 2.4.2   | Punto cuspide . . . . .   | 41 |
| 2.4.3   | Esempi di derivate . . . . .  | 41 |
| 2.4.4   | Teorema di derivazione della funzione composta . . . . .            | 42 |
| 2.4.5   | Teorema di derivazione della funzione inversa . . . . .             | 43 |
| 2.4.6   | Esercizio . . . . .   | 43 |
| 2.4.7   | Esercizio . . . . .   | 43 |
| 2.4.8   | Esercizio . . . . .   | 43 |
| 2.5     | Massimo e minimo assoluto . . . . .                                 | 43 |
| 2.6     | Massimo e minimo relativo (o estremi locali) . . . . .              | 44 |
| 2.6.1   | Punti Stazionari . . . . .  | 44 |
| 2.7     | Teorema di Fermat . . . . .   | 44 |
| 2.8     | Teorema di Rolle . . . . .  | 44 |
| 2.8.1   | Dimostrazione . . . . .   | 44 |
| 2.8.2   | Esercizio dimostrativo . . . . .                                    | 45 |
| 2.8.3   | Esercizio dimostrativo . . . . .                                    | 45 |
| 2.9     | Teorema di Lagrange ( <i>o del valor medio</i> ) . . . . .          | 45 |
| 2.9.1   | Dimostrazione . . . . .   | 45 |
| 2.9.2   | Esempio . . . . .   | 46 |
| 2.9.3   | Esercizio dimostrativo . . . . .                                    | 46 |
| 2.9.4   | Esercizio dimostrativo . . . . .                                    | 46 |
| 2.10    | Teorema di Cauchy . . . . .   | 47 |
| 2.10.1  | Dimostrazione . . . . .   | 47 |
| 2.11    | Teorema di de l'Hopital . . . . .                                   | 47 |
| 2.12    | Funzioni convesse e concave . . . . .                               | 48 |
| 2.12.1  | Definizione di funzione convessa . . . . .                          | 48 |
| 2.12.2  | Definizione di funzione concave . . . . .                           | 48 |
| 2.12.3  | Derivata seconda . . . . .  | 48 |
| 2.12.4  | Criterio di convessità . . . . .                                    | 48 |
| 2.12.5  | Criterio per i punti di massimo e di minimo relativo . . . . .      | 49 |
| 2.13    | Punti per lo svolgimento dello studio di funzione . . . . .         | 49 |
| 2.13.1  | Studio del grafico di $f(x)$ , Asintoti . . . . .                   | 49 |
| 2.14    | Approssimazione di funzioni con polinomi . . . . .                  | 50 |
| 2.14.1  | Polinomio di Taylor . . . . .                                       | 50 |
| 2.15    | Calcolo integrale per funzioni di una variabile . . . . .           | 51 |
| 2.15.1  | Integrale definito . . . . .  | 51 |
| 2.15.2  | Integrale definito . . . . .  | 51 |
| 2.15.3  | Integrale definito, interpretazione geometrica . . . . .            | 51 |
| 2.15.4  | Sviluppo $e^{2x}$ : metodo rapido (Taylor-McLaurin) . . . . .       | 52 |
| 2.15.5  | Sviluppo di $e^{x^2}$ con il metodo Taylor-McLaurin . . . . .       | 52 |
| 2.15.6  | Integrale definito, classi di funzioni integrali . . . . .          | 52 |
| 2.15.7  | Integrale definito, proprietà . . . . .                             | 52 |
| 2.15.8  | Teorema della media integrale . . . . .                             | 53 |
| 2.15.9  | Integrale indefinito . . . . .                                      | 54 |
| 2.15.10 | Corollario del Teorema fondamentale del calcolo integrale . . . . . | 54 |
| 2.15.11 | Integrali indefiniti immediati . . . . .                            | 55 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 2.15.12 | Integrale indefinito, proprietà . . . . .  | 55 |
| 2.15.13 | Integrale indefinito . . . . .   | 56 |
| 2.15.14 | Integrazione per sostituzione . . . . .  | 56 |
| 2.15.15 | Integrazione per parti . . . . .   | 56 |
| 2.15.16 | Esercizio di esempio . . . . .   | 60 |
| 2.16    | Integrali impropri o generalizzati . . . . .   | 60 |
| 2.16.1  | Definizione . . . . .  | 60 |
| 2.17    | Equazioni differenziali ordinarie . . . . .  | 62 |
| 2.17.1  | Definizione . . . . .  | 62 |
| 2.17.2  | Equazioni differenziali a variabili separabili . . . . .                             | 63 |
| 2.17.3  | Teorema . . . . .  | 63 |
| 2.17.4  | Dimostrazione . . . . .  | 63 |
| 2.17.5  | Equazione di Bernoulli . . . . .   | 64 |
| 2.17.6  | Equazione di Clairaut . . . . .  | 65 |
| 2.18    | Equazioni differenziali lineari di ordine $n$ . . . . .                              | 65 |
| 2.18.1  | Teorema . . . . .  | 66 |
| 2.18.2  | Definizione di funzione linearmente indipendente . . . . .                           | 66 |
| 2.18.3  | Metodo della variazione delle costanti arbitrarie ( <i>o di Lagrange</i> ) . . . . . | 69 |
| 2.18.4  | Equazioni differenziali lineari, Metodo di Lagrange: esempio . . . . .               | 69 |



# Elenco delle tabelle





# Elenco delle figure

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | Grafico di insieme di $f=x^2, g(x) = 3x + 2$  | 18 |
| 2.1  | Grafico di Funzione lineare $y = mx + q, m, q \in R$                                | 19 |
| 2.2  | Grafico di Funzione valore assoluto $y =  x $                                       | 20 |
| 2.3  | Grafico di Funzione potenza $y = x^n, n \in N, \text{pari}$                         | 20 |
| 2.4  | Grafico di Funzione potenza $y = x^\alpha, \alpha \in R$ (ma non razionale)         | 21 |
| 2.5  | Grafico di Funzione potenza $y = x^\alpha, \alpha \in R$ (ma non razionale)         | 21 |
| 2.6  | Funzione logaritmo $y = \log_a x$   | 22 |
| 2.7  | Le coniche: la circonferenza  | 22 |
| 2.8  | Le coniche: l'ellisse   | 23 |
| 2.9  | Le coniche: iperbole  | 23 |
| 2.10 | Le coniche: iperbole equilatera   | 24 |
| 2.11 | Le coniche: parabola  | 24 |
| 2.12 | Le funzioni trigonometriche   | 25 |
| 2.13 | Funzione $\sin x$   | 25 |
| 2.14 | Funzione $\cos x$   | 26 |
| 2.15 | Funzione $\tan x$   | 26 |
| 2.16 | Funzione $\cot x$   | 27 |
| 2.17 | Funzione $\arcsin x$  | 27 |
| 2.18 | Funzione $\arccos x$  | 28 |
| 2.19 | Funzione $\arctan x$  | 28 |
| 2.20 | Operazione sul grafico: traslazione della asse X                                    | 29 |
| 2.21 | Operazione sul grafico: traslazione della asse Y                                    | 29 |
| 2.22 | Operazione sul grafico: contrazione e dilatazione in direzione verticale            | 30 |
| 2.23 | Operazione sul grafico: contrazione e dilatazione in direzione orizzontale          | 30 |
| 2.24 | Operazione sul grafico: $y =  f(x) $  | 31 |
| 2.25 | Esempio limite di funzione  | 31 |
| 2.26 | Esempio di limite di una funzione   | 32 |
| 2.27 | Asintoto verticale  | 33 |
| 2.28 | Asintoto orizzontale  | 34 |
| 2.29 | Esempio di limite notevole di una funzione  | 36 |
| 2.30 | Grafico di Funzione valore assoluto $y =  x $ e quindi $f'_+(0) = 1 \neq f'_- = -1$ | 40 |
| 2.31 | Grafico di Funzione $x =  x^2 - 1 $   | 40 |
| 2.32 | Grafico di Funzione $f(x) = \frac{(x-3)^{\frac{2}{3}}}{2}$                          | 41 |

## 0.1 Premesse...

In questo repository sono disponibili pure le dimostrazioni grafiche realizzate con *Geogebra* consiglio a tutti di dargli un'occhiata e di stare attenti perché possono essere presenti delle modifiche per migliorare il contenuto degli stessi appunti, comunque solitamente vengono fatte revisioni tre/quattro volte alla

settimana perché sono in piena fase di sviluppo. Ricordo a tutti che questo è un progetto volontario e che per questo motivo ci potrebbero essere dei rallentamenti per cause di ordine superiore e quindi potrebbero esserci meno modifiche del solito oppure potrebbero esserci degli errori, chiedo la cortesia a voi lettori di contattarmi per apportare una modifica. Tengo a precisare che tutto il progetto è puramente open source e infatti sono disponibili i sorgenti dei file allegati insieme ai PDF.

Cordiali saluti

## 0.2 Simboli

|                                  |                                    |                        |
|----------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| $\in$ Appartiene                 | $\Rightarrow$ Implica              | $\beta$ beta           |
| $\notin$ Non appartiene          | $\Longleftrightarrow$ Se e solo se | $\gamma$ gamma         |
| $\exists$ Esiste                 | $\neq$ Diverso                     | $\Gamma$ Gamma         |
| $\exists!$ Esiste unico          | $\forall$ Per ogni                 | $\delta, \Delta$ delta |
| $\subset$ Contenuto strettamente | $\ni$ : Tale che                   | $\epsilon$ epsilon     |
| $\subseteq$ Contenuto            | $\leq$ Minore o uguale             | $\sigma, \Sigma$ sigma |
| $\supset$ Contenuto strettamente | $\geq$ Maggiore o uguale           | $\rho$ rho             |
| $\supseteq$ Contiene             | $\alpha$ alfa                      |                        |



## Parte I

# Matematica analisi 1 2021/22



# Capitolo 1

## Cenni di teoria degli insiemi

Per rappresentare un insieme abbiamo tre possibilità:

1. Rappresentazione estensiva  $A = [0, 1, 2, 3, 4]$
2. Rappresentazione intensiva  $A = [x | x \in \mathbb{N} \wedge x < 5]$
3. Rappresentazione con diagrammi di Eulero - Venn



### 1.0.1 Operazioni tra gli insiemi

Un insieme può essere contenuto in un altro:



## 1.1 Sottoinsiemi di $\mathbb{R}$

### 1.1.1 Definizione

1. Un punto  $x_0$  si dice interno ad  $A$  se esiste un suo intorno  $I(x_0, \delta)$  con  $\delta > 0$  contenuto in  $A$ .
2. Si dice esterno ad  $A$  se è interno al CA ( $A^c$ ).
3. Si dice di frontiera per  $A$  se non è né interno né esterno ad  $A$ .

#### Interno di $A$

$^\circ A$  Insieme dei punti interni ad  $A$ .

**Esempio** se  $A = (1, 3]$ ,  $^\circ A = (1, 3)$

$\partial A, \text{FA}$  Insieme dei punti di frontiera di  $A$

**Esempio** se  $A = (1, 3]$ , i punti di frontiera sono i punti  $x = 1$  e  $x = 3$

**Osservazioni**

- Se  $x_0 \in {}^\circ A \Rightarrow x_0 \notin A$
- Se  $x_0 \notin {}^\circ A$  (esterno)  $\Rightarrow x_0 \notin A$
- Se  $x_0 \in \partial A$  (frontiera) può essere  $x_0 \in A$  oppure  $x_0 \notin A$ , in ogni caso per  $\forall I(x_0, \delta)$  continue sia punti di A sia punti CA.

**Definizione**  $x_0$  è un punto di accumulazione per A se in  $\forall I(x_0, \delta)$  esiste un punti di A diverso da  $x_0$ . (Cioè in ogni intorno di  $x_0$   $\exists$  infiniti elementi di A)

**Esempio** se  $A = (-2, 3]$ ,  $x = -2$  è accumulazione per A, ma anche  $x = 3, x = 0, x = 1, \dots$ , cioè è di accumulazione per A, qualunque  $x \in [2, 3]$ .

$DA = A'$  = derivato di A è l'insieme dei punti di accumulazione per A. Se  $x_0 \in DA$  allora può aversi  $x_0 \in A$  oppure  $x_0 \notin A$

**Esercizio**  $x = 1, x = 3$  sono entrambi punti di accumulazione per l'intervallo  $(1, 3]$ ,  $x = 3$  appartiene all'intervallo dato,  $x = 1$  NO.

1. Se  $x_0 \in A \Rightarrow x_0 \in DA$ ;
2. Se  $x \notin DA$  allora  $x_0$  si dice isolato;
3. Se  $DA = \emptyset \Rightarrow A$  si dice discreto **Esempio**  $A = \{1, 2, 3, 4\}$
4. Se  $DA = A \Rightarrow A$  si dice perfetto **Esempio**  $A = [a, b]$

**Definizione** Dato  $A \subset R$  si definisce chiusura di A e si indica con  $\bar{A}$ , l'insieme:  $\boxed{\bar{A} = A \cup \partial A}$  A è chiuso  $\Leftrightarrow A = \bar{A}$

**Esempio** se  $A = (2, 5]$ , allora  $\bar{A} = [2, 5]$

**Teorema di Bolzano Weierstrass**

Ogni  $A \subset R^n$  limitato e finito possiede almeno un punto di accumulazione. Un insieme chiuso e limitato in  $R^n$  ammette massimo e minimo assoluto.

**Esempio**  $A = [1, 4]$ ,  $\max(A) = 4$ ,  $\min(A) = 1$   $A = \{x \in R : x^2 \leq 1\}$   $\max A = 1$ ,  $\min(A) = -1$

**1.2 Funzione di una variabile****1.2.1 Definizione**

Dati  $A, B \subseteq R$  una funzione A in B è una legge (o relazione, o mappa) che ad ogni elemento x di A associa uno ed un solo elemento y di B.  $f: A \rightarrow B$  oppure  $y = f(x)$   $x \in A$  e  $y = f(x) \in B$

- $A$  = dominio o insieme di definizione di f.
- $B$  = codominio di f.

Il grafico di f è un insieme di punti del piano (generalmente una curva) che è sottoinsieme del prodotto cartesiano  $A \times B$  costituito da  $(x, f(x))$  con  $x \in A, f(x) \in B$



**Definizione di funzione Immagine** L'immagine di  $A$  tramite  $f$ ,  $f(A)$ , è l'insieme dei valori di  $y$  tale che  $\exists x \in A$  tale che  $f(x) \in B$ .

**Esempio** Se  $f: A \rightarrow B$   $f(x) = x^2$   $A = \mathbb{R}$ ,  $f(A) = [0, +\infty)$

**Definizione di funzione suriettiva** Si dice che  $f: A \rightarrow B$  è suriettiva se  $f(A) = B$  (cioè fissato  $y \in B \exists x \in A : y = f(x)$ )

**Definizione di funzione iniettiva** Si dice che  $f: A \rightarrow B$  è iniettiva se  $x_2 \neq x_1 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$

**Una funzione può essere sia iniettiva che suriettiva “biiettiva”** Se  $f$  è sia suriettiva che iniettiva allora si dice biiettiva (cioè si ha un corrispondenza biunivoca tra  $A$  e  $B$ )

**Quando una funzione è pari?** Una funzione è pari se  $\forall x \in A : f(x) = f(-x)$  quindi il grafico di  $f$  è simmetrico rispetto all'asse  $Y$  (es.  $y = x^2$ )

**Quando una funzione è dispari?** Una funzione è dispari se  $\forall x \in A : f(-x) = -f(x)$ ,  $f(x) = -f(-x)$  quindi il grafico di  $f$  è simmetrico rispetto all'origine (es.  $y = x^3$ )

**Quando una funzione è periodica?** Una funzione  $A \rightarrow B$  è periodica di periodo  $T > 0$ , se  $\forall x \in A, x + T \in A$  e  $f(x + T) = f(x)$

**Esempio** Funzioni trigonometriche

**Quando una funzione è limitata superiormente?** Una funzione si dice limitata superiormente se  $\exists M \in \mathbb{R} : f(x) \leq M \forall x \in A$  (il grafico di  $f$  sta sotto la retta orizzontale  $y = M$ )

**Quando una funzione è limitata inferiormente?** Analogamente, al caso precedente, una funzione si dice limitata inferiormente se  $\exists m \in \mathbb{R} : f(x) \geq m \forall x \in A$  (il grafico di  $f$  sta sopra la retta orizzontale  $y = m$ ). La funzione  $f$  si dirà limitata se è limitata sia inferiormente che superiormente).

**Quando una funzione viene definita composta?** Una funzione  $A \rightarrow B$  e  $B \rightarrow C$  si definisce composta di  $f$  e  $g$ :  $g(f(x))$  La funzione  $h: A \rightarrow C$   $h = g \circ f$

**Esempio**  $f(x) = x^2, g(x) = 3x + 2, (A \equiv B \equiv C \equiv \mathbb{R}) g \circ f = 3x^2 + 2$

**Esempio**  $f(x) = x^2, g(x) = 3x + 2$

$$g \circ f = 3x^2 + 2$$

L'operazione di composizione non è commutativa ( $g \circ f \neq f \circ g$ ). La composizione di due funzioni biettive è biiettiva

**Quando una funzione è inversa?** Date  $f: A \rightarrow B$  biiettiva, si definisce funzione inversa di  $f$ :  $f^{-1}: B \rightarrow A$  tale che  $f^{-1} \circ f = I_A$   $f \circ f^{-1} = I_B$

**Nota** La funzione  $y = x^2$  ( $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ) non è biiettiva ma è stata “resa” biiettiva, quindi invertibile, restringendo il suo dominio (per l'iniettività) e codominio (per la suriettività). Nell'esempio il dominio è stato «rimpicciolito» in modo tale da avere una funzione strettamente crescente e quindi iniettiva. Il codominio è stata «rimpicciolito» all'intervallo massimale  $[0, +\infty)$  e la funzione è diventata anche suriettiva.



Figura 1.1: Grafico di insieme di  $f=x^2, g(x) = 3x + 2$

**Quando una funzione viene definita monotona?** Sia  $f:A \rightarrow B$ ,  $f$  si dice monotona in  $A$  se verifica una delle seguenti condizioni ( $\forall x_1, x_2 \in A$ )

1.  $f$  strettamente crescente se  $x_1 < x_2, f(x_1) < f(x_2)$
2.  $f$  crescente se  $x_1 < x_2, f(x_1) \leq f(x_2)$
3.  $f$  strettamente decrescente se  $x_1 < x_2, f(x_1) > f(x_2)$
4.  $f$  decrescente se  $x_1 < x_2, f(x_1) \geq f(x_2)$

Se si verificano la 1 e 3 allora la funzione  $f(x)$  è *strettamente monotona*.

*Teorema.* Una funzione  $f:A \rightarrow B$  strettamente monotona in  $A$ , è invertibile in  $A$ . Inoltre la sua inversa è ancora strettamente monotona.

## Capitolo 2

# Studio di funzione

In analisi matematica la locuzione studio di funzione indica l'applicazione pratica dei teoremi e delle tecniche del calcolo infinitesimale nello specifico caso di una funzione di cui è nota l'espressione analitica. Lo studio di funzione è utile per ricavare esplicitamente le informazioni che descrivono il comportamento di una funzione nel suo dominio. Spesso, le informazioni ottenute mediante uno studio di funzione sono sufficienti per poter tracciare, anche a mano, un grafico qualitativo della funzione studiata e che in genere, per funzioni a valori reali di una variabile reale, viene rappresentato su un piano cartesiano, anche se in taluni casi potrebbe essere più semplice ricorrere un sistema di coordinate differente. In genere, con "studio di funzione" ci si riferisce implicitamente al solo e specifico caso delle funzioni reali di una sola variabile reale, ma con le opportune modifiche è comunque possibile adattare le considerazioni seguenti anche al caso delle funzioni di più variabili reali, nonché anche per le funzioni di una o più variabili complesse.

By Wikipedia

### 2.1 Grafica delle funzioni elementari

#### 2.1.1 Funzione lineare $y = mx + q$ , $q \in \mathbb{R}$



Figura 2.1: Grafico di Funzione lineare  $y = mx + q$ ,  $q \in \mathbb{R}$

$C.E. \equiv R$  Non Limitata

### 2.1.2 Funzione valore assoluto $y = |x|$



Figura 2.2: Grafico di Funzione valore assoluto  $y = |x|$

$C.E. \equiv R$  Limitata inferiormente in  $x = 0$

$$|x| = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ -x & x < 0 \end{cases}$$

### 2.1.3 Funzione potenza $y = x^n, n \in N, \text{pari}$



Figura 2.3: Grafico di Funzione potenza  $y = x^n, n \in N, \text{pari}$

### 2.1.4 Funzione potenza $y = x^\alpha, \alpha \in R$ (ma non razionale)



Figura 2.4: Grafico di Funzione potenza  $y = x^\alpha, \alpha \in R$  (ma non razionale)

*C.E.* :  $\{x \in R : x \geq 0\}$  Limitata inferiormente da  $x = 0$  non limitata superiormente Strettamente crescente

### 2.1.5 Funzione potenziale $y = x^{\frac{m}{n}}, m, n \in Z$

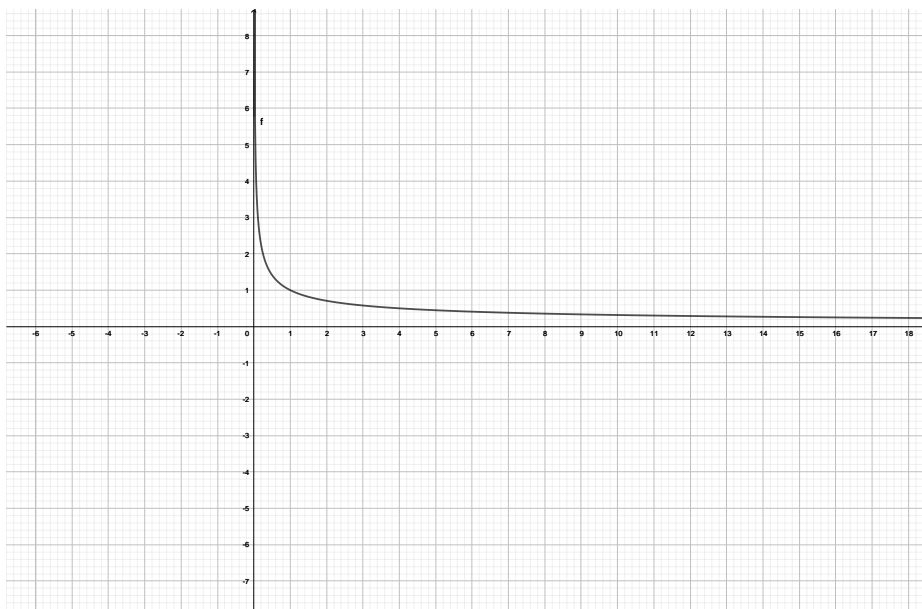


Figura 2.5: Grafico di Funzione potenza  $y = x^\alpha, \alpha \in R$  (ma non razionale)

### 2.1.6 Funzione logaritmo $y = \log_a x$

*C.E.*  $\equiv x > 0$  Non limitata, strettamente crescente se  $a > 1$ , Strettamente decrescente se  $0 < a < 1$ .

Figura 2.6: Funzione logaritmo  $y = \log_a x$ 

### 2.1.7 Le coniche: la circonferenza



Figura 2.7: Le coniche: la circonferenza

### 2.1.8 Le coniche: l'ellisse



Figura 2.8: Le coniche: l'ellisse

### 2.1.9 Le coniche: iperbole



Figura 2.9: Le coniche: iperbole

### 2.1.10 Le coniche: iperbole equilatera



Figura 2.10: Le coniche: iperbole equilatera

### 2.1.11 Le coniche: parabola



Figura 2.11: Le coniche: parabola



### 2.1.12 Le funzioni trigonometriche

Funzioni trigonometriche elementari:  $y = \sin x$ ,  $y = \cos x$ ,  $y = \tan x$ ,  $y = \cot x$

Relazioni fondamentali:  $(\sin x)^2 + (\cos x)^2 = 1$ ,  $\tan x = \frac{\sin x}{\cos x}$ ,  $\cot x = \frac{\cos x}{\sin x}$



Figura 2.12: Le funzioni trigonometriche

#### Funzione $\sin x$

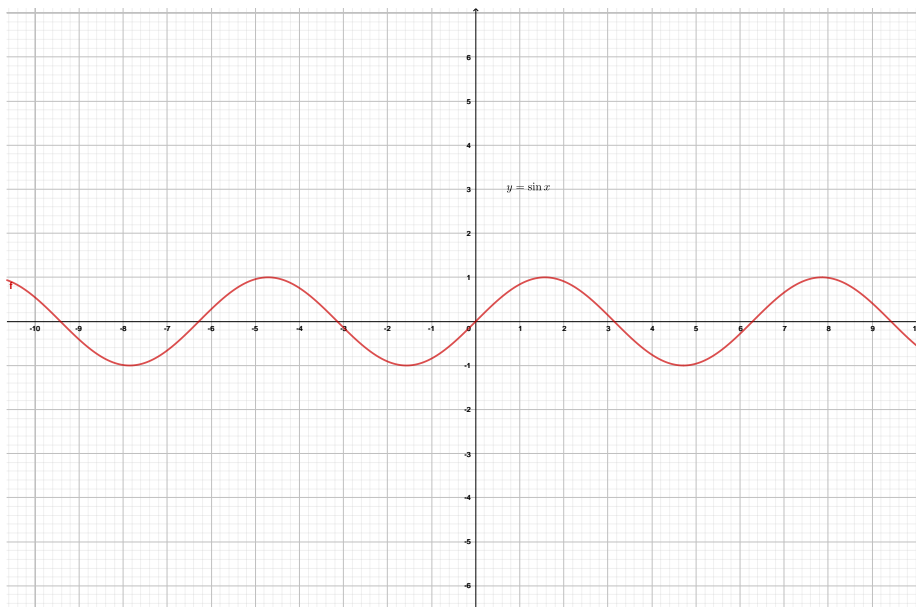
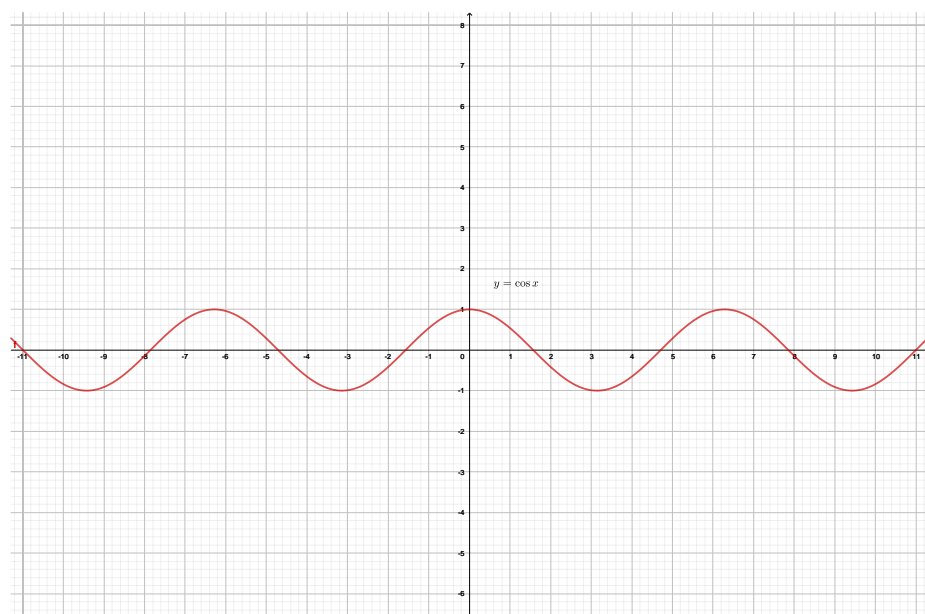
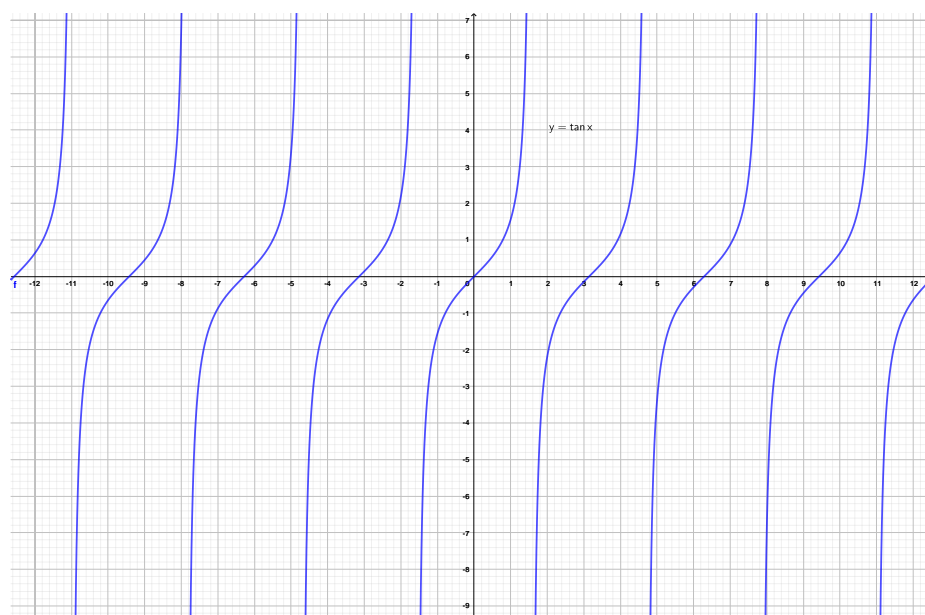
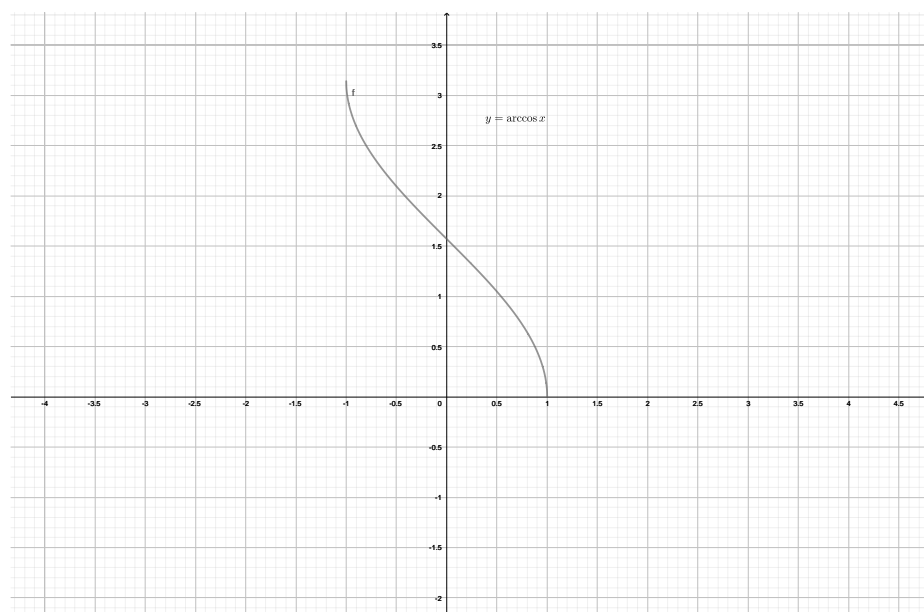
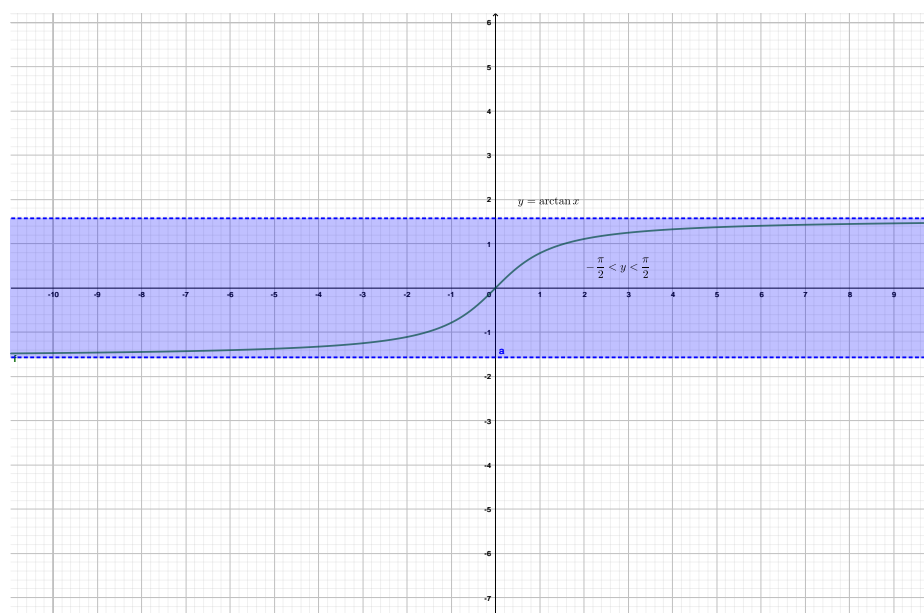


Figura 2.13: Funzione  $\sin x$

**Funzione  $\cos x$** Figura 2.14: Funzione  $\cos x$ **Funzione  $\tan x$** Figura 2.15: Funzione  $\tan x$

**Funzione  $\cot x$** Figura 2.16: Funzione  $\cot x$ **2.1.13 Le funzioni trigonometriche inverse****Funzione  $\arcsin x$** Figura 2.17: Funzione  $\arcsin x$

**Funzione**  $\arccos x$ Figura 2.18: Funzione  $\arccos x$ **Funzione**  $\arctan x$ Figura 2.19: Funzione  $\arctan x$

### Operazione sul grafico: traslazione della asse X

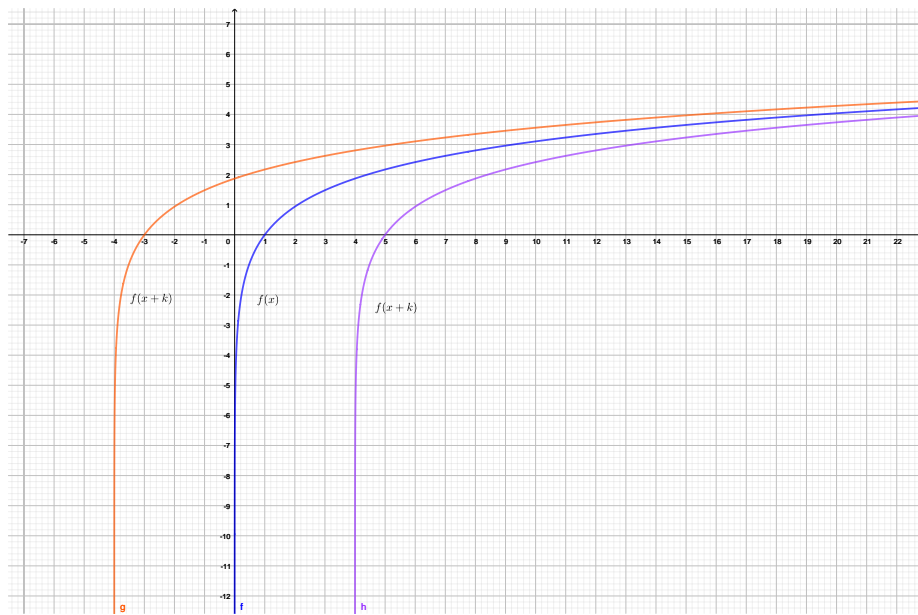


Figura 2.20: Operazione sul grafico: traslazione della asse X

### Operazione sul grafico: traslazione della asse Y



Figura 2.21: Operazione sul grafico: traslazione della asse Y

### Operazione sul grafico: contrazione e dilatazione in direzione verticale



Figura 2.22: Operazione sul grafico: contrazione e dilatazione in direzione verticale

### Operazione sul grafico: contrazione e dilatazione in direzione orizzontale



Figura 2.23: Operazione sul grafico: contrazione e dilatazione in direzione orizzontale

Operazione sul grafico:  $y = |f(x)|$



Figura 2.24: Operazione sul grafico:  $y = |f(x)|$

## 2.2 Limiti



| x     | f(x)  |
|-------|-------|
| 0,1   | 0,998 |
| 0,001 | 0,999 |

$$C.E. = \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

Figura 2.25: Esempio limite di funzione

Il limite di una funzione è un'operazione, o meglio un operatore, che permette di studiare il comportamento di una funzione nell'intorno di un punto  $x_0$ .

*Mediante il limite è possibile stabilire a quale valore tende la funzione man mano che i valori della variabile si approssimano al punto  $x_0$ .*



Figura 2.26: Esempio di limite di una funzione

### 2.2.1 Limite di una funzione

Sia  $f(x)$  definita in  $A \in \mathbb{R}$ , e sia  $x_0$  un punto di accumulazione per  $A$ . Si dice che  $f(x)$  ha limite  $l$  per  $x$  che tende a  $x_0$ , se  $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : |f(x) - l| = \varepsilon \Rightarrow x \in I(x_0, \delta_\varepsilon)$  escluso al più  $x_0$  cioè  $|x - x_0| < \delta_\varepsilon$

- $l - \varepsilon < f(x) < l + \varepsilon$
- $x_0 - \varepsilon < x < x_0 + \delta_\varepsilon$

#### In simboli

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

### 2.2.2 Definizione di Limite destro

$l_1$  si definisce *limite destro* di  $f(x)$  per  $x$  che tende a  $x_0^+$ :  $\lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = l_1$   
se  $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : |f(x) - l_1| < \varepsilon \Rightarrow x_0 < x < x_0 + \delta_\varepsilon$  cioè  $x \in (x_0, x_0 + \delta_\varepsilon)$

### 2.2.3 Definizione di limite sinistro “da sinistra”

$l_2$  si definisce *limite sinistro* di  $f(x)$  per  $x$  che tende a  $x_0^-$ :  $\lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = l_2$  se  $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta_\varepsilon > 0 : |f(x) - l_2| < \varepsilon \Rightarrow x_0 - \delta_\varepsilon < x < x_0$  cioè  $x \in (x_0 - \delta_\varepsilon, x_0)$

### 2.2.4 Teorema d'unicità del limite “da destra”

Se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l \Rightarrow l$  è unico

Dimostrazione. Per assurdo: supponiamo che  $\exists l_1, l_2 : l_1 \neq l_2$  con  $l_1 = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$  in  $I(x_0, \delta_{1\varepsilon})$ ,  $l_2 = \lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$  in  $I(x_0, \delta_{2\varepsilon})$

Fissato  $\varepsilon = \frac{|l_1 - l_2|}{2}$

$$2\varepsilon = |l_1 - l_2| = |l_1 - f(x) + f(x) - l_2| \leq |f(x) - l_1| + |f(x) - l_2| < 2\varepsilon \text{ in } I(x_0, \delta_\varepsilon), \delta_\varepsilon = \min(\delta_{1\varepsilon}, \delta_{2\varepsilon})$$

Assurdo!  $\Rightarrow l_1 = l_2$



**Esempi**

$$y = \frac{|x|}{x} \quad C.E. = \mathbb{R} \setminus \{0\}$$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{|x|}{x} = 1 \quad \nexists \text{ limitate}$$

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

**Definizione** Sia  $f(x)$  definita in  $A \in \mathbb{R}$ , e sia  $x_0$  un punto di accumulazione per  $A$ . Si dice che  $f(x)$  ha limite  $+\infty$  per  $x$  che tende a  $x_0$ , se  $\forall M > 0, \exists \delta_M > 0 : \forall x \in I(x_0, \delta_m) \Rightarrow f(x) > M$

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

**Definizione** Sia  $f(x)$  definita in  $A \in \mathbb{R}$ , e sia  $x_0$  un punto di accumulazione per  $A$ . Si dice che  $f(x)$  ha limite  $-\infty$  per  $x$  che tende a  $x_0$ , se  $\forall M > 0, \exists \delta_M > 0 : \forall x \in I(x_0, \delta_m)$  risulta  $f(x) < -M$ .

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

**Definizione di Asintoto verticale** Se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty$  allora la retta verticale  $x = x_0$  si chiama asintoto verticale

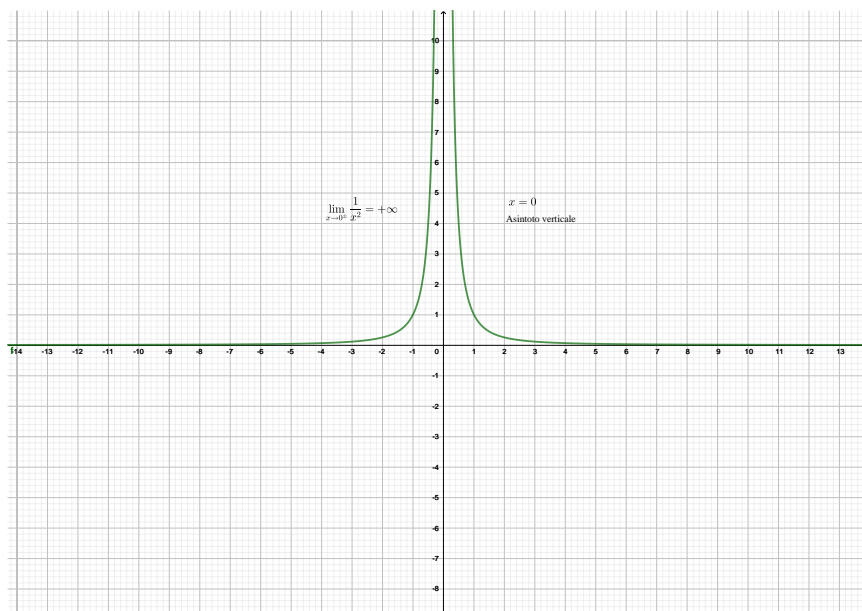


Figura 2.27: Asintoto verticale

Sia  $f(x)$  definita in  $A \in \mathbb{R}$ , si dice che  $f(x)$  ha limite  $l$ , per  $x$  che tende a  $+\infty$ , se:  $\forall \varepsilon > 0, \exists K_\varepsilon > 0 : \forall x \in I(K_\varepsilon, +\infty)$  risulta  $|f(x) - l| < \varepsilon$

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

**Definizione di Asintoto orizzontale** Se  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = l$  Allora la retta orizzontale  $y = l$  si chiama Asintoto orizzontale

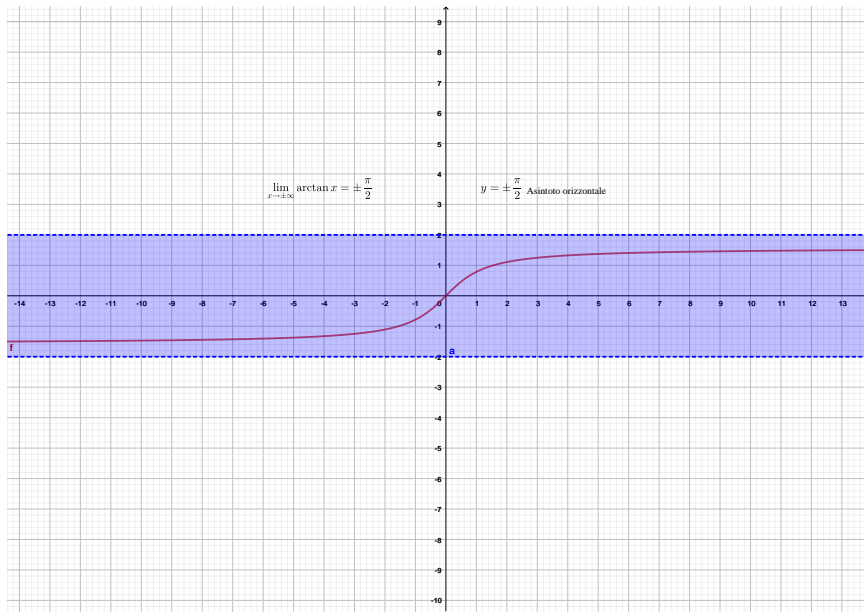


Figura 2.28: Asintoto orizzontale

Sia  $f(x)$  definita in  $A \in \mathbb{R}$ , si dice che  $f(x)$  ha limite  $+\infty$ , per  $x$  che tende a  $+\infty$ , se:  $\forall M > 0, \exists K_M > 0 : \forall x \in (K_M, +\infty)$  risulta  $f(x) \in (M, +\infty)$   $\mid \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = +\infty$   $\mid$

### 2.2.5 Teorema (algebra dei limiti)

Se:

- $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l_1$   $\lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = l_2$
- $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) \pm g(x) = l_1 \pm l_2$
- $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) * g(x) = l_1 * l_2$
- $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{l_1}{l_2}, g(x), l_2 \neq 0$

### 2.2.6 Convenzioni con $\infty$

- $\forall a > 0, a \pm \infty = \pm \infty$
- $+\infty + \infty = +\infty$
- $-\infty - \infty = -\infty$
- $\forall a > 0, a * (\pm \infty) = \pm \infty$
- $\forall b < 0, b * (\pm \infty) = \mp \infty$
- $(\pm \infty) * (\pm \infty) = +\infty$
- $(\pm \infty) * (\mp \infty) = -\infty$

**Convenzioni con  $\infty$**

$$\frac{a}{\infty} = 0 \quad \frac{a}{0} = \infty$$

### 2.2.7 Forme indeterminate

$$\boxed{+\infty - \infty \quad \frac{\infty}{\infty} \quad \frac{0}{0} \quad 1^\infty \quad e^{+\infty \cdot 0} \quad 0 - \infty}$$

- $a^{+\infty} = \begin{cases} +\infty, & a > 1 \\ 0, & 0 < a < 1 \end{cases}$
- $a^{-\infty} = \begin{cases} 0, & a > 1 \\ +\infty, & 0 < a < 1 \end{cases}$

### 2.2.8 Teorema del confronto

Siano  $f(x), f_1(x), f_2(x)$  tre funzioni definite in  $A \subseteq \mathbb{R}$  sia  $x_0$  un punto di accumulazione per  $A$  e  $f_1(x) \leq f(x) \leq f_2(x)$  se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f_1(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f_2(x) = l$  allora  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$

#### Dimostrazione

Se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f_1(x) = \lim_{x \rightarrow x_0} f_2(x) = l$  allora per definizione di limite:

- $\exists \delta_1 : |f_1(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in I(x_0, \delta_1)$
- $\exists \delta_2 : |f_2(x) - l| < \varepsilon \quad \forall x \in I(x_0, \delta_2)$

$$\Rightarrow l - \varepsilon < f_1(x) \leq f(x) \leq f_2(x) < l + \varepsilon$$

$$\forall x \in I(x_0, \delta_2), \delta = \min(\delta_1, \delta_2)$$

#### Casi particolari di $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) * g(x)$

**Teorema** Se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = x$ ;  $|g(x)| \leq M$  per  $x \in I(x_0, \delta) \Rightarrow \lim_{x \rightarrow x_0} f(x) * g(x) = 0$

**Esempio**  $\lim_{x \rightarrow x_0} x * \sin \frac{1}{x} = 0$

### 2.2.9 Limite di funzione composta

Siano  $g : A \rightarrow B : B \rightarrow \mathbb{R} : \lim_{x \rightarrow x_0} g(x) = y_0$  e  $\lim_{y \rightarrow y_0} f(y) = l$  con  $l = f(y_0)$  (se  $f$  è continua)

$$\Rightarrow \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} f[g(x)] = l}$$

### 2.2.10 Limiti Notevoli

$$\bullet \quad \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\sin(x)}{x} = 1}$$

$$\bullet \quad \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\tan(x)}{x} = 1}$$

$$\bullet \quad \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1 - \cos(x)}{x} = \frac{1}{2}}$$

$$\bullet \quad \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} \left(1 + \frac{1}{x}\right) = e}$$

$$\bullet \quad \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{\log_a(1+x)}{x} = \log_a e}$$

$$\bullet \quad \boxed{\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{a^x - 1}{x} = \log_e a}$$

#### Esempi

$$1. \lim_{x \rightarrow x_0^+} x e^x + e^{-\frac{1}{x}} = 0$$

$$2. \lim_{x \rightarrow x_0^-} x e^x + e^{-\frac{1}{x}} = \infty$$

$$3. \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{1 - \cos(x)}{x^2} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{(1 - \cos(x))(1 + \cos(x))}{x^2(1 + \cos(x))} = \frac{1}{2}$$

$$4. \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} + \arctan x = \frac{\pi}{2}$$

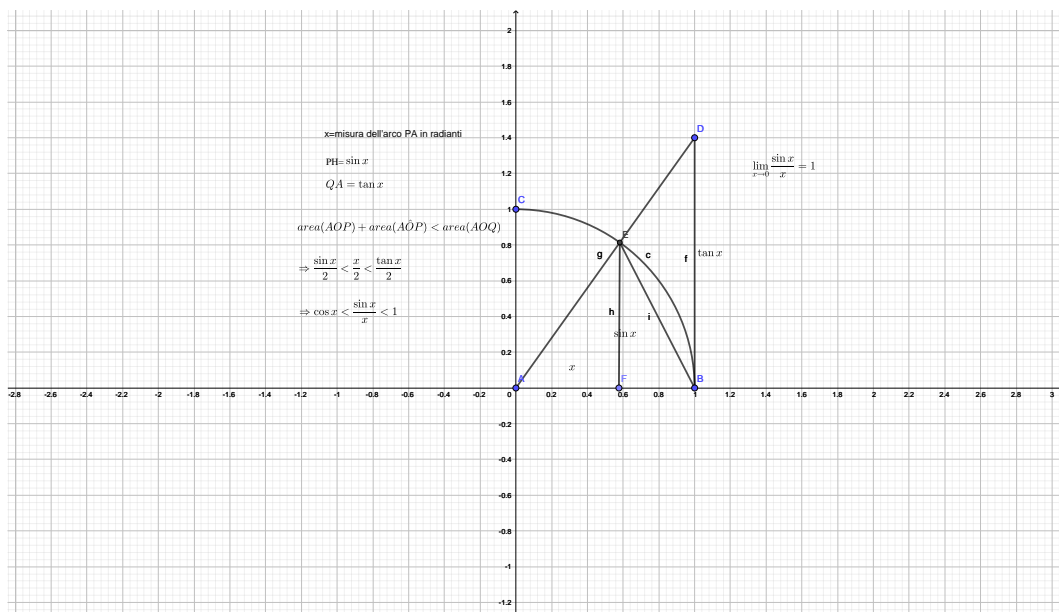


Figura 2.29: Esempio di limite notevole di una funzione

### 2.2.11 Infinitesimi e infiniti

**Definizione** Una funzione  $f(x)$  si dice infinitesima per  $x \rightarrow x_0$  (per  $x \rightarrow \infty$ ),  $x_0$  punto di accumulazione per il dominio di  $f(x)$ , se:  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0$  (oppure  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = 0$ ).

#### Esempi

- $y = e^x$  è un infinitesimo per  $x \rightarrow -\infty$
- $y = \ln x$  è un infinitesimo per  $x \rightarrow 1$
- $y = \sin x$  è un infinitesimo per  $x \rightarrow 0$  (ma anche per  $x \rightarrow \pi, 2\pi$ , etc.)
- $y = \ln 1 + x$  è un infinitesimo per  $x \rightarrow 1$

#### Ordine di infinitesimo

Siano  $f(x)$  e  $g(x)$  infinitesimi per  $x \rightarrow x_0$  (o per  $x \rightarrow \infty$ ), con  $g(x) \neq 0$ . Se  $\exists \alpha R+$  e  $l \in R$ ,  $l \neq 0$  tale che  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{[g(x)]^\alpha} = l$  (oppure  $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{[g(x)]^\alpha} = l$ )

Allora, si dice che per  $x \rightarrow x_0$  (o per  $x \rightarrow \infty$ ),  $f(x)$  è un infinitesimo di ordine  $\alpha$  rispetto all'infinitesimo campione  $g(x)$ .

#### Esempi

- $y = \sin x$  è un infinitesimo per  $x \rightarrow 0$  di ordine 1 rispetto all'infinitesimo campione  $g(x) = x$ , infatti,  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\sin x}{x^\alpha} = 1$  solo se  $\alpha = 1$
- $y = \tan^2 x$  è un infinitesimo di ordine 2 rispetto ad  $x$ , per  $x \rightarrow 0$
- $\text{ord}(1 - \cos x) = 2$  rispetto ad  $x$  per  $x \rightarrow 0$

**Confronto tra infinitesimi**

Siano  $f(x)$  e  $g(x)$  infinitesime per  $x \rightarrow x_0$ ,

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \begin{cases} l \neq 0 & \text{ord}(f) = \text{ord}(g) \\ \pm\infty & \text{ord}(f) < \text{ord}(g) \\ 0 & \text{ord}(f) > \text{ord}(g) \\ \text{non esiste, } f \text{ e } g \text{ non confrontabile} & \end{cases}$$

Stesso risultato se  $f(x)$  e  $g(x)$  sono infinitesime per  $x \rightarrow \infty$ . Utilizzando il confronto tra infinitesimi nel calcolo dei limiti del tipo  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1+f_2}{g_1+g_2}$ , dove  $f_1, f_2, g_1, g_2$  sono funzioni infinitesime per  $x \rightarrow x_0$ , si possono *trascurare gli infinitesimi di ordine maggiore* (analogo discorso per funzioni infinitesime  $x \rightarrow \infty$ ).

**esempio**  $\lim_{x \rightarrow 0} \frac{x^2+x^3+2\tan x}{(e^x-1)^2+\sin x} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{2\tan x}{\sin x} = 2$

**Definizione di funzioni asintotiche** Si dice che due funzioni  $f, g$  sono asintotiche per  $x \rightarrow x_0$  se  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = 1$  e si scrive  $f \sim g$  per  $x \rightarrow x_0$

**esempi**

- $\sin x \sim x$  per  $x \rightarrow 0$
- $\ln(1+x) \sim x$  per  $x \rightarrow 0$
- $e^x - 1 \sim x$  per  $x \rightarrow 0$

**Definizione di funzioni infinite** Una funzione  $f(x)$  si dice *infinita* per  $x \rightarrow x_0$  (o per  $x \rightarrow \infty$ ),  $x_0$  punto di accumulazione per il dominio di  $f(x)$ , (o per  $x \rightarrow \infty$ ) se:

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

**Esempi**

- $y = e^x$  è un infinito per  $x \rightarrow +\infty$
- $y = \ln x$  è un infinito per  $x \rightarrow 0^+$
- $y = x^2 + x$  è un infinito per  $x \rightarrow \infty$

**Regole aritmetiche** Siano  $f(x) = o(x^\alpha)$  (si legge «o piccolo di») e  $g(x) = o(x^\beta)$  due funzioni *infinitesime* rispettivamente di ordine  $\alpha$  e  $\beta$  per  $x \rightarrow 0$ . Allora si ha

- $cf(x) = o(x^\alpha), \forall c \in R$
- $x^\lambda f(x) = o(x^{\lambda+\alpha})$
- $f(x)g(x) = o(x^{\alpha+\beta})$
- $f(x) + g(x) = o(x^\gamma), \gamma = \min(\alpha, \beta)$

**Ordine di infinito** Siano  $f(x)$  e  $g(x)$  infiniti per  $x \rightarrow x_0$  (o per  $x \rightarrow \infty$ ), con  $g \neq 0$ . Se  $\exists \alpha \in R_+$  e  $l \in R, l \neq 0$  tale che

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{[g(x)]^\alpha} = l \text{ (o } \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{[g(x)]^\alpha} = l)$$

Allora, per  $x \rightarrow x_0$  (o per  $x \rightarrow \infty$ ),  $f(x)$  è un infinito di ordine  $\alpha$  rispetto all'infinito compone  $g(x)$ .

**Esempi**

- $ord(\sqrt{x}) = \frac{1}{2}$  rispetto ad  $x$  per  $x \rightarrow +\infty$
- $ord(\frac{1}{\sin x}) = 1$  rispetto ad  $\frac{1}{x}$  per  $x \rightarrow 0$
- $ord(\frac{1}{e^x-1}) = 1$  rispetto ad  $\frac{1}{x}$  per  $x \rightarrow 0$

**Cofronto tra infiniti** Siano  $f(x)$  e  $g(x)$  infiniti per  $x \rightarrow x_0$

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \begin{cases} l \neq 0 & ord(f) = ord(g) \\ \pm\infty & ord(f) > ord(g) \\ 0 & ord(f) < ord(g) \\ \text{non esiste, } f \text{ e } g \text{ non confrontabile} & \end{cases}$$

Stesso risultato se  $f(x)$  e  $g(x)$  sono infinite per  $x \rightarrow \infty$ . Utilizzando il confronto tra infiniti nel calcolo dei limiti del tipo  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f_1+f_2}{g_1+g_2}$ , dove  $f_1, f_2, g_1, g_2$  sono funzioni infinite per  $x \rightarrow x_0$ , si possono **trascurare gli infiniti di ordine minore** (analogo discorso per funzione infinito  $x \rightarrow \infty$ ).

**Esempio**  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^2+x^3+3\sqrt{x}}{x^2(2x-1)+\sqrt{3}x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{x^3}{2x^3} = \frac{1}{2}$ .

**Gerarchia degli infiniti** Per  $x \rightarrow +\infty$  si ha  $(\log_\alpha x)^\alpha \ll x^\beta \ll b^x$ , con  $\alpha, \beta > 0, a, b > 1$ . Non sempre è possibile calcolare l'ordine di infinito (o di infinitesimo) rispetto alla funzione campione usuale.

**Esempio**  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{a^x}{x^a} = +\infty, \forall \alpha > 0, a > 1, \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{(\log_a x)^\beta}{x^a} = +\infty, \forall \alpha, \beta > 0, a > 1$

**Regole aritmetiche** Siano  $f(x)$  e  $g(x)$  due funzioni *infinite* di ordine rispettivamente  $\alpha$  e  $\beta$ . Allora si ha

- $ord(f(x) + g(x)) = \max \alpha, \beta$
- $ord(f(x) * g(x)) = \alpha + \beta$
- $ord((f(x))^\gamma) = \alpha\gamma$

**2.2.12 Funzioni continue**

Una funzione continua è una funzione che, intuitivamente, fa corrispondere ad elementi sufficientemente vicini del dominio elementi arbitrariamente vicini del codominio.

**Definizione** Una funzione  $f(x)$  è continua in  $x_0$ , se:  $l_1 = \lim_{x \rightarrow x_0^+} f(x) = l_2 = \lim_{x \rightarrow x_0^-} f(x) = f(x_0)$  ossia  $\forall \epsilon > 0 \exists \delta_\epsilon > 0: |f(x) - f(x_0)| < \epsilon \forall x \in I(x_0, \delta_\epsilon)$  ( $l = f(x_0)$ )

**Teorema della permanenza del segno**

Sia  $f(x)$  definita almeno in un intorno di  $x_0$  e continua in  $x_0$ . Se  $f(x_0) > 0$  allora  $\exists \delta > 0: f(x) > 0 \forall x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$

**Teorema degli zeri**

Sia  $f(x)$  continua in  $[a, b]$   $f(a) * f(b) < 0$  allora  $\exists x_0 \in (a, b): f(x_0) = 0$ . Se  $f$  è anche strettamente monotona, lo zero è unico.

**Teorema dell'esistenza dei valori intermedi (conseguenza del teorema degli zeri)** Una funzione  $f(x)$  continua in  $[a, b]$  assume tutti i valori compresi tra  $f(a)$  ed  $f(b)$ .

**Teorema di Wierstrass (sul massimo e il minimo)**

Sia  $f(x)$  continua in  $[a, b]$ . Allora  $f(x)$  assume massimo e il minimo assoluto in  $[a, b]$ , cioè  $\exists x_1, x_2 \in [a, b] : f(x_1) \leq f(x) \leq f(x_2)$

**2.2.13 Criteri di invertibilità**

Una funzione continua e strettamente monotona in  $[a, b]$  è invertibile in tale intervallo. Dimostrazione.

**2.3 Calcolo differenziale per funzioni di una variabile**

Sia  $f: (a, b) \rightarrow R$ , si definisce derivata di  $f$  nel punto  $x_0 \in (a, b)$  il numero, se  $\exists$  finito:

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

$$f'(x_0), y'(x_0), \frac{df}{dx}|_{x_0}, \frac{dy}{dx}|_{x_0}, Df(x_0), Dy(x_0)$$

**2.3.1 Derivata di una funzione**

**Significato geometrico della derivata in un punto e equazione della retta tangente** Sia  $x_0 \in (a, b) : x_0 + h \in (a, b)$

Si definisce Rapporto incrementale  $\frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} = \tan \beta$

Sia  $\beta$  l'angolo che la retta  $r$  forma con l'asse delle  $x$ , considerando il triangolo ABC possiamo scrivere  $f(x_0+h) - f(x_0) = \tan \beta [x_0 + h - x_0]$  Ossia:  $\tan \beta = \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h}$  Ma  $m = \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h}$  È il coefficiente angolare della retta  $f$  passante per AB

Per cui  $\tan \beta = m$  Ossia  $\tan \beta$  è il coefficiente angolare della retta secante per AB

Quando  $h \rightarrow 0$  in punto B si sposta sulla curva avvicinandosi ad A, la retta  $r$  diventa tangente alla curva in A e si ha:  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} = f'(x_0) = \tan \alpha$  coefficiente angolare di t Equazione della retta tangente dal grafico di  $f(x)$  nel punto di ascissa  $x_0$ :  $y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$  Infatti, tra tutte le rette del fascio proprio passanti  $A(x_0, f(x_0))$  dieq.  $y - f(x_0) = m(x - x_0)$  per  $m = f'(x_0)$  si ottiene l'equazione di t. Se  $f'(x)$  è definita  $\forall x \in (a, b)$  allora  $f(x)$  è derivabile in  $(a, b)$  e risulta definita la funzione  $f' : (a, b) \rightarrow R$  detta derivata prima di  $f(x)$

$f(x)$  è derivabile in  $[a, b]$ , se è derivabile  $\forall x \in (a, b)$  e ammette derivata destra in  $x=a$  (si scrive  $f'_+(a)$ ) e derivata sinistra in  $x=b$  (si scrive  $f'_-(b)$ )

**2.3.2 Definizione**

- Derivata destra  $\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} = f'_+(x_0)$
- Derivata sinistra  $\lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} = f'_-(x_0)$

Se  $f'_+(x) = f'_-(x)$   $f$  è derivabile in  $x$

**2.3.3 Continuità e derivabilità****Teorema**

Sia  $f : (a, b) \rightarrow R$ . Se  $f$  è derivabile in  $x_0 \in (a, b)$  allora  $f$  è continua in  $x_0$ ,  $x + h \in (a, b) : \lim_{h \rightarrow 0} f(x_0 + h) - f(x_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0+h) - f(x_0)}{h} * h = 0$ . Da cui  $\lim_{h \rightarrow 0} f(x_0 + h) = f(x_0)$  che è la continuità di  $f$  in  $x_0$ .

Quindi **derivabilità  $\Rightarrow$  continuità** Occhio non è vero il contrario perché non per forza una funzione continua è derivabile.

**Esempio**  $y = |x|$  è continua ma non è derivabile in  $x = 0$ . Infatti,

$$y = |x| = \begin{cases} x & x \geq 0 \\ -x & x < 0 \end{cases} \text{ e } y' = \frac{|x|}{x} = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$$

## 2.4 Punti di non derivabilità

### 2.4.1 Punto angoloso

Se  $f'_+(x) \neq f'_-(x)$  e almeno un  $\exists$  finita  $x_0$  si dice **punto angoloso**, in quanto le rette tangenti alla  $f(x)$  nel punto di ascissa  $x_0$  formano un angolo.

#### Esempio

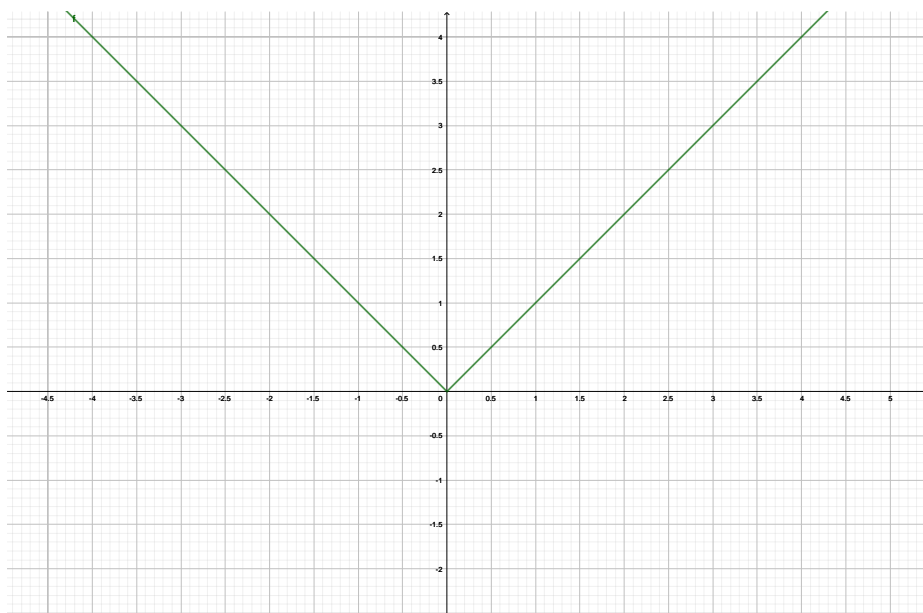


Figura 2.30: Grafico di Funzione valore assoluto  $y = |x|$  e quindi  $f'_+(0) = 1 \neq f'_- = -1$

#### Un altro esempio

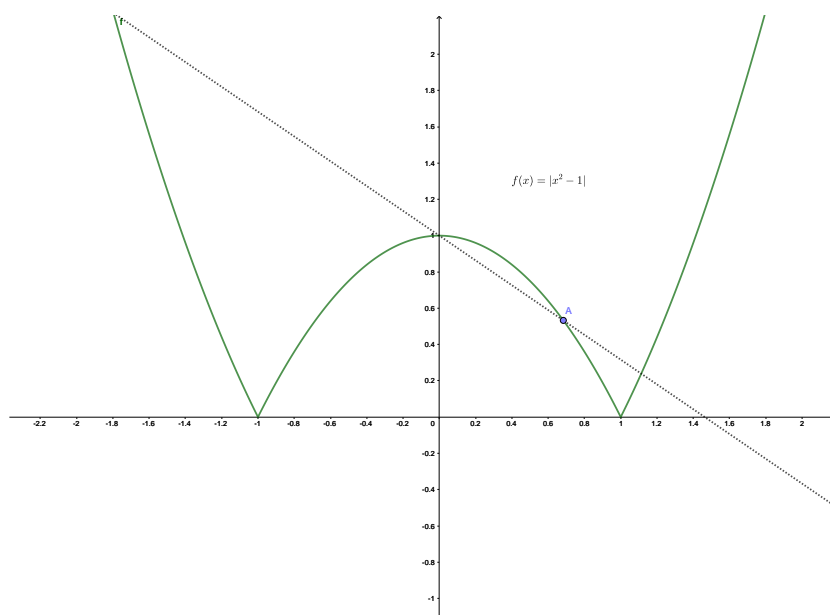


Figura 2.31: Grafico di Funzione  $x = |x^2 - 1|$



### 2.4.2 Punto cuspidi

Se  $f'_+(x) \neq f'_-(x)$  sono  $\infty$ ,  $x_0$  si dice **punto cuspidi**; la retta tangente alla  $f(x)$  nel punto di ascissa  $x_0$  è verticale.

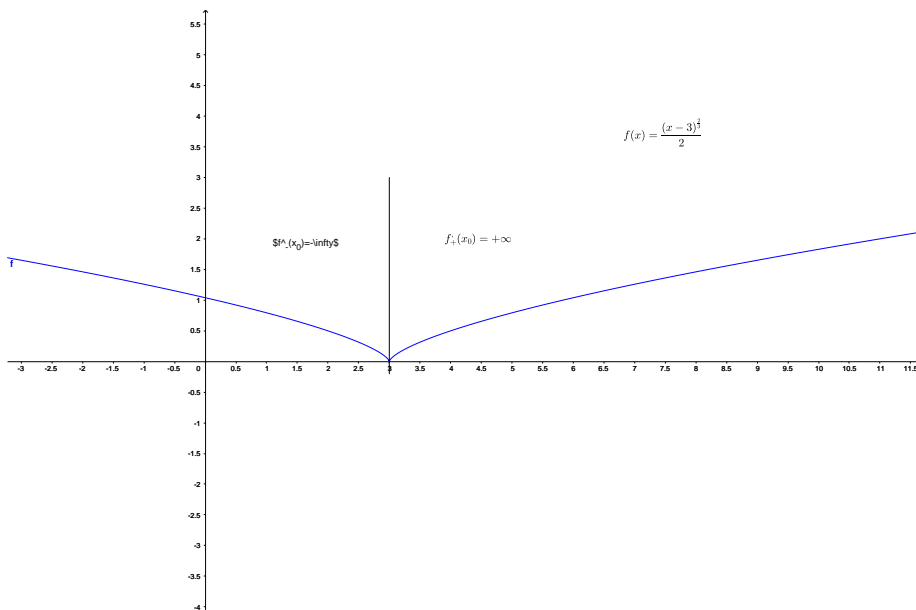


Figura 2.32: Grafico di Funzione  $f(x) = \frac{(x-3)^{\frac{2}{3}}}{2}$

### Punto di flesso a tangente verticale

Se  $f'_+(x_0) = f'_-(x_0) = \pm\infty$  sono  $\infty$ ,  $x_0$  si dice punto di flesso a tangente verticale; la retta tangente alla  $f(x)$  nel punto di ascissa  $x_0$  è verticale.

### 2.4.3 Esempi di derivate

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

### Qualche esercizio dimostrativo

Utilizzando la definizione calcolare la derivata di

1.  $f(x) = k$   

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{k - k}{h} = 0$$
2.  $f(x) = e^x$   

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{e^x(e^h - 1)}{h} = e^x$$
3.  $f(x) = \ln x$   

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\ln(x+h) - \ln x}{h} = \frac{\ln(1 + \frac{h}{x})}{\frac{h}{x}} = \frac{1}{x}$$

4.  $f(x) = \cos x$   

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos(x+h) - \cos(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x \cos h - \sin x \sin h - \cos x}{h} =$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\cos x (\cos h - 1)}{h} - \frac{\sin x \sin h}{h} = -\sin x$$
5.  $f(x) = \sin x$   

$$f'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin(x+h) - \sin(x)}{h} = \frac{\sin x \cos h + \cos x \sin h - \sin x}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin x (\cos h - 1)}{h} +$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{\sin h \cos x}{h} = \cos x$$

Se  $f$  e  $g$  sono derivabile in  $x$ , allora sono derivabili in  $x$  anche la somma, la differenza, il prodotto, il quoziente (con il denominatore  $\neq 0$ ) e si ha:

1.  $(f \pm g)' = f' \pm g'$
2.  $(f * g)' = f' * g + f * g'$
3.  $(\frac{f}{g})' = \frac{f' * g - f * g'}{g^2}, g \neq 0$

- Dimostriamo la 2)  $(f * g)' = f' * g + f * g'$   

$$(f * g)' = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h)g(x+h) - f(x)g(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h)g(x+h) \pm f(x)g(x+h) - f(x)g(x) \pm f(x)g(x+h)}{h} =$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(x+h)[f(x+h) - f(x)]}{h} + \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x)[f(x+h) - f(x)]}{h}$$

Per ipotesi  $f$  e  $g$  sono derivabile, quindi continue in  $x$ , perciò:

$$\lim_{h \rightarrow 0} g(x+h) = g(x),$$

$$(f * g)' = \dots = f'(x) * g(x) + f(x) * g'(x)$$

- Dimostriamo la 3)  

$$(\frac{f}{g})' = \frac{\frac{f(x+h) - f(x)}{h} \cdot \frac{f(x)}{g(x)}}{\frac{f(x+h) - f(x)}{h} \cdot \frac{f(x)}{g(x)}} = \frac{f(x+h)g(x) - f(x)g(x+h)}{g(x+h)g(x) * h} = \frac{f(x+h)g(x) - f(x)g(x+h) \pm f(x)g(x) \pm f(x)g(x+h)}{g(x+h)g(x) * h}$$

$$\frac{[f(x+h) - f(x)]g(x) - f(x)[g(x+h) - g(x)]}{g(x+h)g(x) * h} = \frac{\frac{[f(x+h) - f(x)]g(x)}{h} - \frac{f(x)[g(x+h) - g(x)]}{h}}{g(x+h)g(x) * h} =$$

$$\frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{g(x+h)g(x) * h} = \frac{f'(x)g(x) - f(x)g'(x)}{[g(x)]^2 * h}$$

### Esercizio

- Calcolare la derivata di  $f(x) = \sin x \ln x$   

$$f'(x) = \cos x \ln x + \frac{\sin x}{x}$$
- Scrivere l'equazione della retta tangente alla curva di eq  $f(x) = 2e^x \sqrt[3]{x}$  nel punto di ascissa  $x=1$   

$$f'(x) = 2e^x \sqrt[3]{x} + 2 \frac{e^x}{3 \sqrt[3]{x^2}}$$

### 2.4.4 Teorema di derivazione della funzione composta

Sia  $g(x)$  una funzione derivabile in  $x$ , e se  $f(x)$  è una funzione derivabile nel punto  $g(x)$ , allora la funzione composta  $f(g(x))$  è derivabile in  $x$ , e si ha:

$$[f(g(x))]' = f'(g(x)) * g'(x)$$

Dimostrazione. Se  $h \neq 0$  si ha  $\lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x+h)) - f(g(x))}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(g(x+h)) - f(g(x))}{h} * \frac{g(x+h) - g(x)}{h} = f'(g(x)) * g'(x)$  in quanto se  $h \rightarrow 0$  allora  $k \rightarrow 0$  con  $k = g(x+h) - g(x)$ , essendo  $g(x)$  continua in  $x$ . Se  $h=0$ , il teorema continua a valere.

### Esercizio

1. Calcolare la derivata di  $f(x) = \ln(\sin x)$ .  

$$f'(x) = \frac{\cos x}{\sin x} = \cot x$$
2. Calcolare la derivata di  $f(x) = e^{\sqrt{2x^3+x}}$ .  

$$f'(x) = e^{\sqrt{2x^3+x}} \frac{6x^2+1}{2\sqrt{2x^3+x}}$$

3. Calcolare la derivata di  $f(x) = \sin(\ln x)$   
 $f'(x) = \frac{\cos(\ln x)}{x}$

Scrivere l'equazione della retta alla curva di equazione  $f(x) = (xe^{2x} - 1)^3$  nel punto di ascissa  $x=0$ , L'eq. Retta tangente a  $f(x)$  in  $x = x_0 : y = f'(x_0)(x - x_0) + f(x_0)$

Per noi  $x_0 = 0$

$$f'(x) = 3(xe^{2x} - 1)^2(e^{3x} + xe^{2x}) \Rightarrow f'(0) = 3$$

$$f(0) = -1$$

Quindi l'equazione è:  $y = 3x - 1$

### 2.4.5 Teorema di derivazione della funzione inversa

Sia  $f(x)$  una funzione continua e strettamente monotona in  $[a, b]$ . Se  $f$  è derivabile in  $x_0 \in (a, b)$  e se allora anche la funzione inversa di  $f^{-1}$  è derivabile nel punto  $y_0 = f(x_0)$ , e la derivata vale:

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

Dimostrazione. Si ha  $\frac{f^{-1}(y_0+k) - f^{-1}(y_0)}{k} = \frac{h}{f(x_0+h) - f(x_0)}$  Se  $k \rightarrow 0$  anche  $h \rightarrow 0$  in quanto  $f'$  è continua

### 2.4.6 Esercizio

Utilizzando il teorema di derivazione della funzione inversa, dimostrare che:

$$D[\arcsin(y)] = \frac{1}{\sqrt{1-y^2}}$$

$x = \arcsin(y)$  è la funzione inversa di  $y = \sin(x)$  quest'ultima è invertibile per  $x \in [-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}]$ . Applichiamo il teorema della funzione inversa,  $f^{-1}(y) = \frac{1}{f'(x)}$

$$\boxed{[\arcsin(y)]' = \frac{1}{[\sin(x)]'} = \frac{1}{\cos(x)}}$$

Ma sappiamo che:  $\cos(x) = \sqrt{1 - \sin^2 x}$

$$\boxed{[\arcsin(y)]' = \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2 x}} = \frac{1}{\sqrt{1 - y^2}}}$$

### 2.4.7 Esercizio

Calcolare la derivata della funzione  $y = e^x$  vista come funzione inversa di  $f(x) = \ln x$ . Per  $x > 0$ , si ha  $x = f^{-1}(y) = e^y$   $f(x) = \ln x \Rightarrow f'(x) = \frac{1}{x}$  Perciò, per il teorema della derivata della funzione inversa si ha  $(f^{-1}(y))' = \frac{1}{f'(x)} \Rightarrow (e^y)' = x = e^y$ . Quindi  $(e^x)' = e^x$

### 2.4.8 Esercizio

Utilizzando il teorema di derivazione della funzione inversa, dimostrare che  $(\arctan x)' = \frac{1}{1+x^2}$ . Sia  $f(x) = \tan x$ , in  $x \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$  si ha  $x = f^{-1}(x) = \arctan x$

$f(x) = \tan x \Rightarrow f'(x) = 1 + \tan^2 x$ . Perciò, per il teorema della derivata della funzione inversa si ha  $(f^{-1}(y))' = \frac{1}{f'(x)} \Rightarrow (\arctan y)' = \frac{1}{1 + \tan^2 x} = \frac{1}{1 + y^2}$

## 2.5 Massimo e minimo assoluto

Sia  $f : [a, b] \rightarrow R$ , si dice  $M$  è **massimo assoluto** (o globale) di  $f$  in  $[a, b]$  e  $x_0 \in [a, b]$  è un punto di massimo se

$$f(x_0) = M \geq f(x), \forall x \in [a, b]$$

**in modo analogo:** Si dice che  $m$  è un **minimo assoluto** (o globale) di  $f$  in  $[a, b]$  e  $x_1 \in [a, b]$  è punto di minimo se

$$f(x_1) = m \leq f(x), \forall x \in [a, b]$$

## 2.6 Massimo e minimo relativo (o estremi locali)

Sia  $f : [a, b] \rightarrow R$ , si dice che  $x_0 \in [a, b]$  è un punto di **massimo relativo** (o locale) per  $f(x)$  se  $\exists I(x_0, \delta)$ :

$$f(x_0) \geq f(x), \forall x \in I(x_0, \delta)$$

**In modo analogo:** si dice che  $x_0 \in [a, b]$  è un punto di **minimo relativo** (o locale) per  $f(x)$  se  $\exists I(x_0, \delta)$ :

$$f(x_0) \leq f(x), \forall x \in I(x_0, \delta)$$

### 2.6.1 Punti Stazionari

*I punti in cui  $f(x)$  ha derivata nulla ( $f' = 0$ ) Si dice punti stazionari o critici.*

## 2.7 Teorema di Fermat

*Sia  $f(x)$  definita in  $[a, b]$  e derivabile in  $x_0 \in (a, b)$ . Se  $x_0$  è un punto di estremo locale allora*

$$f'(x_0) = 0$$

**Dimostrazione** Sia  $x_0$  un punto di massimo relativo, cioè  $\exists I(x_0, \delta): f(x_0) \geq f(x_0 + h), \forall h : |h| < \delta$  si

$$\text{ha: } \frac{f(x_0+h)-f(x_0)}{h} \begin{cases} \leq 0 & \text{se } 0 < h < \delta \\ \geq 0 & \text{se } -\delta < h < 0 \end{cases} \text{ e}$$

$$\bullet \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(x_0+h)-f(x_0)}{h} = f'_+ \leq 0$$

$$\bullet \lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{f(x_0+h)-f(x_0)}{h} = f'_- \geq 0$$

Ma essendo  $f(x)$  derivabile in  $x_0$ :

$$f'_+(x_0) = f'_-(x_0) \Rightarrow f' = 0$$

Se  $x_0 = a$  allora  $0 < h < \delta$  e se  $x_0$  è un punto di **massimo relativo** si ha  $\lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{f(a+h)-f(x)}{h} = f'(a) \leq 0$ .

Mentre, se parliamo del **minimo relativo** in  $x_0 = a$ :  $\lim_{h \rightarrow 0^-} \frac{f(a+h)-f(x)}{h} = f'(a) \leq 0$  In modo analogo: se  $x_0 = b$  è punto di **massimo relativo** (con  $-\delta < h < 0$ ) allora  $f'(b) \geq 0$ , se invece  $x_0 = b$  è un punto di **minimo relativo**, allora  $f'(b) \leq 0$

## 2.8 Teorema di Rolle

Sia  $f : [a, b] \rightarrow R$ .

1.  $f$  è continua in  $[a, b]$ ,
2.  $f$  è derivabile in  $(a, b)_{f(a)=f(b)}$
3.  $f(a) = f(b)$

Allora  $\exists x_0 \in (a, b) : f'(x_0) = 0$  Per il Teorema di Rolle esistono almeno un punto a tangente orizzontale.

### 2.8.1 Dimostrazione

Per il Teorema di Weierstrass,  $f$  ha massimo e minimo assoluti in  $[a, b]$  ( $x_1, x_2 \in [a, b]$ ):

$$f(x_1) \leq f(x) \leq f(x_2).$$

*Se uno dei due è interno ad  $[a, b]$ , per esempio  $x_1$  allora per il Teorema di Fermat  $f'(x_1) = 0$ . Se invece nessuno dei due è interno ad  $[a, b]$  per esempio  $x_1 = a, x_2 = b$ . Dall'ipotesi  $f(a) = f(b)$  si ottiene minimo=massimo, cioè  $f(x)$  è costante  $\forall x \in [a, b]$  e quindi  $f'(x) = 0 \forall x \in [a, b]$ .*

### 2.8.2 Esercizio dimostrativo

#### Testo

Dire se la funzione  $f(x) = e^{x^2-1}$  soddisfa il teorema di Rolle nell'intervallo  $[-1, 1]$  e in caso affermativo calcolare il punto (o i punti del Teorema.)

#### Soluzione

Sono verificate tutte le ipotesi del teorema di Rolle, infatti:

1.  $f(x) = e^{x^2-1}$  è continua in tutto  $\mathbb{R}$  e quindi anche in  $[-1, 1]$
2.  $f(x)$  è derivabile in tutto  $\mathbb{R}$ , quindi anche in  $(-1, 1)$ ,
3.  $f(-1) = f(1)$

Allora  $\forall x_0 \in (-1, 1) : f'(x_0) = 0$

$x_0$  Si ricava facendo il calcolo:  $f'(x_0) = 0$ , cioè  $2xe^{x^2-1} = 0 \Rightarrow x_0 = 0$

### 2.8.3 Esercizio dimostrativo

#### Testo

Dire se la funzione  $f(x) = \ln|x|$  soddisfa il teorema di Rolle nell'intervallo  $[-e, e]$ .

#### Soluzione

Il teorema di Rolle non è applicabile perché  $f(x) = \ln|x|$  non è definita in  $x = 0$ , quindi non è né continua né definita in  $x = 0$  e perciò non soddisfa tutte le ipotesi del teorema.

## 2.9 Teorema di Lagrange (o del valor medio)

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

1.  $f$  è continua in  $[a, b]$ ,
2.  $f$  è derivabile in  $(a, b)$ ,

Allora  $\forall x_0 \in (a, b) : f'(x_0) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$

Per il Teorema di Lagrange  $\exists$  almeno un punto  $(x_0, f(x_0))$  sul grafico di  $f(x)$  in cui la retta tangente  $t$  è parallela alla retta  $r$  secante la curva in  $(a, f(a))$  e  $(b, f(b))$ .

### 2.9.1 Dimostrazione

Si considera la funzione ausiliaria

$$g(x) = f(x) - \left[ f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{b-a}(x-a) \right]$$

equazione di  $r$

Per  $g(x)$  vale il Teorema di Rolle, infatti:

1.  $g(x)$  è continua in  $[a, b]$  perché lo è  $f(x)$  (l'altro pezzo è lineare);
2.  $g(x)$  è derivabile in  $(a, b)$  perché  $f(x)$  (l'altro pezzo è lineare);
3.  $g(a) = g(b) = 0$ .

- $\Rightarrow x_0 : g'(x) = 0$
- $g'(x_0) = f'(x_0) - \frac{f(b)-f(a)}{b-a} = 0$
- $\Rightarrow f'(x_0) = \frac{f(b)-f(a)}{b-a}$

### 2.9.2 Esempio

$f(x) = x^2$  in  $[a, b]$ , per il Teorema di Lagrange  $\forall x_0 \in [a, b]$ :

$$\frac{b^2 - a^2}{b - a} = 2x_0 \Rightarrow x_0 = \frac{b+a}{2} \text{ Media aritmetica di } a \text{ e } b$$

### 2.9.3 Esercizio dimostrativo

#### Testo

Dire se è applicabile in Teorema di Lagrange alla funzione  $f(x) = \arcsin x$  nell'intervallo  $[-1, 1]$  e in caso affermativo calcolare i punti teorema.

#### Soluzione

La funzione data soddisfa tutte le ipotesi del teorema di Lagrange, infatti:

1.  $f$  è continua in  $[-1, 1]$  (è il suo campo di esistenza),

2.  $f$  è derivabile in  $(-1, 1)$

$$\text{Allora } \forall x_0 \in (-1, 1) : f'(x_0) = \frac{f(1) - f(-1)}{2} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{1-x_0^2}} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow x_0 = \pm \frac{\sqrt{\pi^2 - 4}}{\pi}$$

### 2.9.4 Esercizio dimostrativo

#### Testo

Determinare un intervallo in cui è applicabile il Teorema di Lagrange alla funzione  $f(x) = |x - \frac{1}{x}|$ .

#### Soluzione

1. La funzione data è contenuta nel suo campo di esistenza cioè nell'insieme:  $A = \{x \in R : x \neq 0\}$

2.  $f$  è derivabile nell'insieme  $B = \{x \in R : x \neq 0, \pm 1\}$  con derivata:  $f'(x) = |\frac{x^2-1}{x}| \cdot \frac{x^2+1}{x(x^2-1)}$

Perciò un intervallo in cui  $f$  soddisfa il teorema di Lagrange, è un qualunque intervallo  $[a, b]$  che contiene  $x = 0$  e tale che punti  $x = -1$  non siano interni ad esso (potrebbero stare agli estremi)

Per esempio:  $[1, 2]$  ( $f$  è continua in  $[1, 2]$  e derivabile in  $(1, 2)$ , da notare che è derivabile anche in  $x = 2$  ma non serve...) oppure  $[-4, -3]$ . etc...

1. Criterio di monotonia

Sia  $f(x) : [a, b] \rightarrow R$ , continue in  $[a, b]$ , è derivabile in  $(a, b)$ . Allora:

- $f$  è crescente in  $[a, b] \Leftrightarrow f'(x) \geq 0 \forall x \in [a, b]$ ;
- $f$  è decrescente in  $[a, b] \Leftrightarrow f'(x) \leq 0 \forall x \in [a, b]$ .

**Dimostrazione** Sia  $f'(x) \geq 0$  e siano  $x_1, x_2 \in [a, b]$  con  $x_2 > x_1$ .

Per il Teorema di Lagrange  $\forall x_0 \in (x_1, x_2)$ :

$$f(x_2) - f(x_1) = f'(x_0)(x_2 - x_1)$$

$$\text{ma } f'(x_0) \geq 0 \text{ e } x_2 - x_1 > 0 \Rightarrow f(x_2) \geq f(x_1)$$

**Viceversa** Sia  $f(x)$  crescente in  $[a, b]$ .

Allora  $\forall x, x+h \in (a, b)$ , si ha  $\frac{f(x+h)-f(x)}{h} \geq 0$

Facendo il limite per  $h \rightarrow 0$  si ha

$$f'(x) \geq 0$$

Analoga dimostrazione per

$$f \text{ è decrescente in } [a, b] \Leftrightarrow f' \leq 0 \forall x \in [a, b] \quad (2.1)$$

Analoga dimostrazione per  $f$  è decrescente in  $[a, b] \Leftrightarrow f'(x) \leq 0 \forall x \in [a, b]$

Si ha inoltre

- $f'(x) > 0 \Rightarrow$  strettamente crescente
- $f'(x) < 0 \Rightarrow$  strettamente decrescente

2. Sia  $f(x) : [a, b] \rightarrow R$ , derivabile in  $(a, b)$ .

$$f \text{ è costante} \Leftrightarrow f'(x) = 0 \forall x \in (a, b) \quad (2.2)$$

3. Sia  $x_0 \in (a, b)$  e  $f'(x_0) = 0$

*Se esiste un intorno destro (sinistro), in cui  $f'(x) > 0$  e un intorno sinistro (destro) in cui  $f'(x) < 0$ , allora  $x_0$  è un punto di minimo (massimo) relativo.*

## 2.10 Teorema di Cauchy

Siamo  $f, g : [a, b] \rightarrow R$ :

1.  $f$  e  $g$  sono continue in  $[a, b]$
2.  $f$  e  $g$  sono derivabili in  $(a, b)$ .

Allora se  $g'(x) \neq 0, \forall x \in (a, b), \exists x_0 \in (a, b): \frac{f'(x_0)}{g'(x_0)} = \frac{f(b)-f(a)}{g(b)-g(a)}$

### 2.10.1 Dimostrazione

Si consideri la funzione ausiliaria

$$\varphi(x) = f(x) - [f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{g(b)-g(a)}(g(b) - g(a))]$$

Essendo  $g' \neq 0, \forall x \in (a, b)$ , allora  $g(b) \neq g(a)$ . Inoltre

1.  $\varphi(x)$  è continua in  $[a, b]$ ;
2.  $\varphi(x)$  è derivabile in  $(a, b)$ ;
3.  $\varphi(a) = \varphi(b)$

$$\Rightarrow \exists x_0 \in (a, b) : \varphi'(x_0) = 0$$

Cioè

$$\frac{f'(x_0)}{g'(x_0)} = \frac{f(b)-f(a)}{g(b)-g(a)}$$

## 2.11 Teorema di de l'Hopital

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

Se esiste il limite  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = l$  finito e limitato. Allora  $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)}$

Il teorema è valido anche per  $x \rightarrow x_0^+$  o  $x \rightarrow x_0^-$  e per  $x \rightarrow \pm\infty$  (f e g derivabili in intervalli illimitati)

## 2.12 Funzioni convesse e concave

### 2.12.1 Definizione di funzione convessa

Sia  $f(x) : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ , si chiama epigrafico (o sopragrafico) di  $f$  l'insieme

$$\text{epi} f := \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \in [a, b] \text{ e } y \leq f(x)\}$$

$f$  è convessa in  $[a, b]$  se il suo epigrafico è un insieme convesso

**Analogamente:**  $f$  è concava in  $[a, b]$  se il suo epigrafico è un insieme concavo

Sia  $f(x)$  derivabile in  $[a, b]$ ,  $f$  è convessa in  $[a, b] \Leftrightarrow f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0), \forall x, x_0 \in [a, b]$

Cioè  $\forall x_0$  il grafico di  $f$  sta al di sopra della retta tangente ad  $f(x)$  in  $(x_0, f(x_0))$

### 2.12.2 Definizione di funzione concava

Sia  $f(x)$  derivabile in  $[a, b]$ ,  $f$  è concava in  $[a, b] \Leftrightarrow f(x) \leq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0), \forall x, x_0 \in [a, b]$

Cioè  $\forall x_0$  il grafico di  $f$  sta al di sotto della retta tangente ad  $f(x)$  in  $(x_0, f(x_0))$

### 2.12.3 Derivata seconda

La derivata seconda di una funzione  $f(x)$  rappresenta la velocità di variazione della pendenza del grafico di  $f(x)$ .

$$f''(x) = \frac{1}{R} \text{ Curvatura del grafico di } f(x) \text{ in } x$$

### 2.12.4 Criterio di convessità

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

1. Se  $f$  è derivabile in  $(a, b)$  allora

$$f \text{ è convessa (concava)} \Rightarrow f'(x) \text{ è crescente (decrecente)}$$

2. Se  $f$  è derivabile due volte in  $(a, b)$  allora

$$f \text{ è convessa (concava)} \Rightarrow f''(x) \leq 0 (f''(x) \geq 0), \forall x \in (a, b)$$

Utilizzando il segno di  $f''(x)$  si può stabilire se  $x_0$  è un punto di massimo o un punto di minimo relativo per  $f(x)$ .

Sia  $f(x)$  derivabile due volte con derivata continua in un intorno di  $x_0 \in (a, b)$ :

- se  $f'(x_0) = 0, f''(x) > 0 \Rightarrow x_0$  è punto di minimo relativo;
- se  $f'(x_0) = 0, f''(x) < 0 \Rightarrow x_0$  è punto di massimo relativo.

Infatti, supponiamo che  $f'(x_0) = 0, f''(x) > 0$  con  $f''$  continua. Per il Teorema della permanenza del segno:  $f''(x) > 0$  in  $I(x_0, \delta) \Rightarrow f$  è convessa in  $I$ :

$$f(x) \geq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0).$$

Ma  $f'(x_0) = 0 \Rightarrow f(x) \geq f(x_0), \forall x, x_0 \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$  cioè  $x_0$  è di minimo relativo per  $f$ .



### 2.12.5 Criterio per i punti di massimo e di minimo relativo

Sia  $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$ , derivabile  $n$  volte in  $x_0 \in (a, b)$ ,  $n \geq 2$ , tale che in  $x_0$  tutte le derivate tranne l' $n$ -esima siano nulle. Allora:

$$\text{se } n \text{ pari è } \begin{cases} f^{(n)}(x_0) > 0 & x_0 \text{ è di minimo relativo} \\ f^{(n)}(x_0) < 0 & x_0 \text{ è di massimo relativo} \end{cases}$$

Se  $n$  è dispari  $x_0$  non è punto di estremo (si dice flesso a tangente orizzontale).

#### Definizione

Sia  $f : (a, b) \rightarrow \mathbb{R}$  e  $x_0 \in (a, b)$  un punto di derivabilità per  $f(x)$  oppure  $f'(x_0) = \pm\infty$ .  $x_0$  si dice di flesso se esiste un intorno destro di  $x_0$  in cui  $f$  è convessa (concava) ed un intorno sinistro in cui  $f$  è concava (convessa).

Se  $x_0$  è di flesso per  $f$ , ed esiste  $f''(x_0)$ , allora  $f''(x_0) = 0$

## 2.13 Punti per lo svolgimento dello studio di funzione

Per svolgere correttamente lo studio di funzione, bisogna suddividere il tutto in punti per svolgere correttamente lo studio in modo ordinato ed efficiente. Se effettivamente.

1. Determinazione del Campo di esistenza;
2. Determinazione del tipo di funzione;
3. Intersezione con gli assi;
4. Valori agli estremi del campo di esistenza;
5. Positività e negatività;
6. Determinazione degli asintoti;
7. Determinazione della derivata prima;
8. Crescenza e decrescenza;
9. Determinazione dei Massimi e minimi;
10. Determinazione della derivata seconda;
11. Determinazione della concavità, convessità e flessi;
12. Determinazione di eventuali ulteriori punti appartenenti alla funzione;
13. Grafico della funzione;
14. Qualche esempio di studio completo di funzione.

### 2.13.1 Studio del grafico di $f(x)$ , Asintoti

Se esiste una retta di equazione  $y = mx + q$ :

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \{f(x) - (mx + q)\} = 0$$

Allora  $y = mx + q$  si definisce asintoto obliquo per  $f(x)$ . Si ha

$$m = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x}; q = \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) - mx$$

Se  $\lim_{x \rightarrow \infty} f(x) = l, y = l$  si chiama asintoto orizzontale. Se l'asintoto orizzontale non c'è (il limite sopra è infinito) allora potrebbe esserci quello obliquo. Se  $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = \infty, x = x_0$  si chiama asintoto verticale con  $x_0$  punto di accumulazione per  $f$ .

## 2.14 Approssimazione di funzioni con polinomi

### 2.14.1 Polinomio di Taylor

Data una funzione  $f$  derivabile  $n$  volte in  $x_0$ , esiste uno e un solo polinomio

$$T_n(x_0) = f(x_0), T'_n(x_0) = f'(x_0), \dots, T^{(n)}(x_0) = f^{(n)}(x_0). \quad (2.3)$$

Tale polinomio si chiama polinomio di Taylor ed è

$$T_n(x) = f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)}{2}(x - x_0)^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x - x_0)^n \quad (2.4)$$

Polinomio di centro  $x_0$  e grado  $n$

$$T_n(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)(x - x_0)^k}{k!} \quad (2.5)$$

Se  $x_0 = 0$   $T_n(x)$  è detto polinomio di Mac Laurin di grado  $n$ .  $R_n(x)$  = errore che si commette quando si approssima  $f(x)$  con  $T_n(x)$ :

Si ha:  $R_n(x) = f(x) - T_n(x)$

- $R_n(x) = o((x - x_0)^n)$  per  $x \rightarrow x_0$ , Formula di Peano

$$\text{cioè } \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{R_n(x)}{(x - x_0)^n} = 0$$

- Se  $f$  è derivabile  $n + 1$  volte in  $(a, b)$  escluso al più  $x_0$ ,  
 $\forall x \in (a, b), \exists c$  compreso tra  $x$  e  $x_0$ :  
 $R_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!}(x - x_0)^{n+1}$  Formula di Lagrange

Esempio.

$$y = \sin x \text{ in } x = 0, \quad T_{2n+1}(x) = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!} \text{ solo potenze dispari}$$

- $T_1(x) = x$
- $T_3(x) = x - \frac{x^3}{3!}$
- $T_5(x) = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!}$

Analogamente in  $x = 0$ , si ottiene

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \dots (-1)^{n+1} \frac{x^n}{n} + R_n(x)$$

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3!} - \dots \frac{x^n}{n!} + R_n(x)$$

$$\arctan x = x - \frac{x^3}{3} + \frac{x^5}{5} - \dots \frac{x^{2n+1}}{2n+1} + R_{2n+1}(x)$$

## 2.15 Calcolo integrale per funzioni di una variabile

### 2.15.1 Integrale definito

Sia  $f : [a, b] \rightarrow R$ , limitata. Costruiamo la somma di Cauchy-Riemann

$$S_n = \sum_{j=1}^n f(\xi_j) \cdot (x_j - x_{j-1}) = \frac{b-a}{n} \sum_{j=1}^n f(\xi_j)$$

Dove la suddivisione dell'intervallo  $[a, b]$  è individuata dai punti  $a = x_0, x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n = b, x_j = a + jh, h = \frac{b-a}{n}$

### 2.15.2 Integrale definito

la scelta dei punti  $\xi_j$  è arbitraria. All'aumentare dei punti della suddivisione di  $[a, b]$  aumenta il numero degli addendi della somma di Cauchy-Riemann e diminuisce il valore assoluto di tali addendi.

**Definizione** Si dice che una funzione  $f : [a, b] \rightarrow R$ , limitata, è integrabile secondo Riemann in  $[a, b]$ , se detta  $S_n$  una sua qualsiasi successione di Cauchy-Riemann, esiste finito il limite di  $S_n$  (per  $n \rightarrow \infty$ ), e tale limite non dipende dalla scelta dei punti  $\xi_j$ . Allora si pone:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \int_a^b f(x) dx$$

Si legge «Integrale da  $a$  a  $b$  in  $dx$ »  $f(x)$  si chiama funzione integrale e  $x$  è la variabile d'integrazione ed è una variabile muta:

$$\int_a^b f(t) dt \text{ ha lo stesso significato di } \int_a^b f(x) dx$$

**Variabile muta** - è una variabile che la si può nominare come meglio si crede, perché tanto il risultato è identico e quindi non ci sono vincoli nominativi.

### 2.15.3 Integrale definito, interpretazione geometrica

$$\int_a^b f(x) dx, \int_I f(x) dx, \int_a^b f$$

$I = [a, b]$  è dominio di integrazione,  $a$  e  $b$  sono gli estremi di integrazione.

Se  $f(x)$  è positiva allora  $\int_a^b f(x) dx$  rappresenta l'aria del «sottografico» di  $f(x)$ . Infatti la somma  $S_n$  un'approssimazione dell'area del «trapezoide  $T$ » individuato da  $f$ :

$$T : \{(x, y) \in R^2 : a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq f(x)\}$$

Se  $f \geq 0 \Rightarrow \int_a^b f(x) dx = \text{area di } T$

Se in  $[a, b]$ ,  $f$  cambia segno allora  $\int_a^b f(x) dx$  è sempre un numero ma non rappresenta più l'area del sottografico di  $f$ .

Osservazione  $\int_a^b f(x) dx$  è un numero, non dipende da  $x$ . L'insieme delle funzioni integrabili secondo Riemann in  $I = [a, b]$  si indica con  $R(I)$  o  $R([a, b])$ .

$R(I)$  non è vuoto, infatti ogni funzione costante  $y = c$  è integrabile su qualunque intervallo  $[a, b]$  e si ha

$$\int_a^b c dx = c(b - a)$$

Per qualunque suddivisione di  $[a, b]$  si ha

$$S_n = \sum_{j=1}^n f(\xi_j) * (x_j - x_{j-1}) = \frac{b-a}{n} \sum_{j=1}^n c = (b-a)c$$

### 2.15.4 Sviluppo $e^{2x}$ : metodo rapido (Taylor-McLaurin)

$$e^t = 1 + t + \frac{t^2}{2} + \frac{t^3}{6} + \frac{t^4}{24} + o(x^4)$$

Quindi sostituendo la  $t$  con un'altro l'argomento di  $e$  il risultato è il seguente

$$e^{2x} = 1 + 2x + \frac{(2x)^2}{2} + \frac{(2x)^3}{6} + \frac{(2x)^4}{24} + o(x^4)$$

Svolgiamo le potenze e poi semplifichiamo il numeratore e il denominatore tramite un divisore comune.

$$e^{2x} = 1 + 2x + \frac{4}{3}x^2 + \frac{2}{3}x^3 + o(x^4)$$

### 2.15.5 Sviluppo di $e^{x^2}$ con il metodo Taylor-McLaurin

$$e^{x^2} = 1 + x^2 + \frac{x^4}{2} + \frac{x^6}{6} + \frac{x^8}{24} + o(x^9)$$

Visto che gli esponenti sono tutti pari e quelli dispari non sono accettati per validare  $o(x^9)$  dobbiamo anche esprimere questa formula  $o(x^9) = k * x^{10}$

### 2.15.6 Integrale definito, classi di funzioni integrali

1. Se  $f : [a, b] \rightarrow R$  è continua, allora è integrabile.
2. Se  $f : [a, b] \rightarrow R$  è Monotona e limitata, e allora è integrabile.
3. Se  $f : [a, b] \rightarrow R$  è limitata in  $[a, b]$  con un numero finito di punti di discontinuità, allora è integrabile.

Questo teorema si può estendere alle funzioni limitate con un'infinità numerabile di punti di discontinuità, cioè i punti di discontinuità possono essere infiniti ma non devono essere «troppi».

La funzione di Dirichlet su  $[a, b]$ :

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in Q \cap [a, b] \\ 0 & \text{se } x \in [a, b] - Q \end{cases}$$

è limitata e non è integrabile secondo Riemann (*i punti di discontinuità sono «troppo»: tutto  $[a, b]$* ) Infatti se si scelgono i punti  $\xi_j$  razionali si ha

$$S_n = \sum_{j=1}^n f(\xi_j) * (x_j - x_{j-1}) = \sum_{j=1}^n 1 * (x_j - x_{j-1}) = (b - a)$$

### 2.15.7 Integrale definito, proprietà

Se invece si scelgono i punti  $\xi_j$  irrazionali si ha

$$S_n = \sum_{j=1}^n f(\xi_j) * (x_j - x_{j-1}) = \sum_{j=1}^n 0 * (x_j - x_{j-1}) = 0$$

Siano  $f$  e  $g$  integrabili in  $[a, b]$ , allora:

1. Linearità dell'integrale: se  $\alpha$  e  $\beta$  sono costanti la funzione  $\alpha f(x) + \beta g(x)$  è integrabile e si ha

$$\int_a^b \alpha f(x) + \beta g(x) dx = \int_a^b \alpha f(x) dx + \int_a^b \beta g(x) dx$$

2. Addittività dell'integrale rispetto all'intervallo di integrazione: Se  $a \leq s \leq b$  allora  $f$  è integrabile anche su  $[a, s]$  e  $[s, b]$  e:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^s f(x) dx + \int_s^b f(x) dx$$

3. Positività e monotonia:

$$f \geq 0 \Rightarrow \int_a^b f(x) dx \geq 0$$

$$f \geq g \Rightarrow \int_a^b f(x) dx \geq \int_a^b g(x) dx$$

In particolare

$$\left| \int_a^b f(x) dx \right| \leq \int_a^b |f(x)| dx$$

Per convenzione, se  $a < b$  si pone  $\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx$

### 2.15.8 Teorema della media integrale

- a) Sia  $f$  limitata e integrabile secondo Riemann in  $[a, b]$ . Allora

$$m \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \leq M \quad (2.6)$$

Dove  $m = \inf_{[a,b]} f$  e  $M = \sup_{[a,b]} f$

- b) Se  $f$  è continua su  $[a, b]$   $\exists x_0 \in (a, b)$ :

$$\frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx = f(x_0) \quad (2.7)$$

(valor medio integrale di  $f$  su  $[a, b]$ )

#### Dimostrazione

- a) Essendo  $f(x)$  limitata si ha

$$m \leq f(x) \leq M$$

Integrando membro a membro su  $[a, b]$ :

$$m \leq \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x) dx \leq M$$

b) Indichiamo con  $y_0$  il valore  $y_0 = \frac{1}{b-a} \int_a^b f(x)dx$  che è un valore compreso tra  $m$  ed  $M$ .

Essendo  $f$  continua, per il teorema dei valori intermedi, esisterà  $x_0 \in (a, b) : f(x_0) = y_0$  cioè la tesi

### 2.15.9 Integrale indefinito

Sia  $f$  continua in  $[a, b]$ , allora la funzione integrale  $F(x) = \int_a^x f(t)dt$  è di classe  $C^1([a, b])$

$$F'(x) = f(x) \forall x \in [a, b]$$

#### Dimostrazione

Scriviamo il rapporto incrementale di  $F(x)$ :

$$\frac{F(x+h) - F(x)}{h} = \frac{1}{h} \left[ \int_a^{x+h} f(t)dt - \int_a^x f(t)dt \right] = \frac{1}{h} \left[ \int_x^{x+h} f(t)dt \right]$$

Per il Teorema della media integrale applicato ad  $f$  in  $[x, x+h]$ ,  $\exists \xi(h, x+h)$ :

$$\frac{1}{h} \left[ \int_x^{x+h} f(t)dt \right] = f(\xi(h, x+h))$$

Si è ottenuto  $\frac{F(x+h) - F(x)}{h} = f(\xi(h, x+h))$

Ed essendo  $f$  continua in  $[a, b]$  si ha la tesi:

$$F'(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(x+h) - F(x)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} f(\xi(h, x+h)) = f(x)$$

**Osservazione** L'ipotesi di continuità per  $f$  è fondamentale per la derivabilità di  $F$ . Infatti, se  $f$  è solo integrabile non si può affermare che  $F$  è derivabile. Infatti se  $f$  è solo integrabile non si può affermare che  $F$  è derivabile.

Esempio

$$f(x) = \text{segn} x = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \Rightarrow F(x) = |x|$$

$f(x)$  è integrabile ma non è continua,  $F(x)$  è continua ma non è derivabile in  $x=0$ .

**Definizione di primitiva** Una funzione  $F(x)$ , derivabile in  $[a, b]$ , si chiama PRIMITIVA di  $f(x)$  se:

$$F'(x) = f(x) \forall x \in [a, b]$$

**Esempio** - Una primitiva di  $f(x) = \cos x$  è la funzione  $F(x) = \sin x$ .

Se  $f(x) = x^2 \Rightarrow F(x) = \frac{x^3}{3}$

Se  $f(x)$  è una primitiva di  $f(x)$  lo è anche  $F(x) + c$ . Infatti  $(F(x) + c)' = F'(x) = f(x)$

**Definizione** La famiglia di tutte le primitive di una funzione  $f(x)$  continua in  $[a, b]$  è detta **INTEGRALE INDEFINITO** e si indica:  $\int f(x)dx$

### 2.15.10 Corollario del Teorema fondamentale del calcolo integrale

Sia  $f(x)$  una funzione continua su  $[a, b]$  e  $G(x)$  una primitiva di  $f$ . Allora

$$\int_a^b f(x)dx = G(b) - G(a) = [G(x)]_a^b = G(x) \Big|_a^b$$

Esempio

$$\int_a^b x^2 dx = \frac{x^3}{3} \Big|_a^b$$

$$\int_1^2 x^2 dx = \frac{x^3}{3} \Big|_1^2 = \frac{2^3}{3} - \frac{1^3}{3} = \frac{7}{3}$$

### Dimostrazione

Consideriamo una funzione  $f(t)$  definita in un intervallo  $[c, b]$ . L'area del sottografico della funzione  $f$  con  $x \in [a, b]$  è dato da:

$$\int_a^b f(t) dt = \int_c^b f(t) dt - \int_c^a f(t) dt$$

Ma poiché  $F(x) = \int_c^x f(t) dt$  allora  $F(a) = \int_c^a f(t) dt$  e  $F(b) = \int_c^b f(t) dt$

Per cui

$$\int_a^b f(t) dt = \int_c^b f(t) dt - \int_c^a f(t) dt = F(b) - F(a) = [F(x)]_a^b$$

Questo è il legame tra l'integrale definito  $\int_a^b f(x) dx$  e l'integrale indefinito  $\int f(x) dx$ .

- $\int_a^b f(x) dx$  è un numero reale
- $\int_a^b f(x) dx$  è un insieme di funzioni

### 2.15.11 Integrali indefiniti immediati

Esercizio

$$\int \frac{\sin x}{\cos x} dx = - \int \frac{1}{\cos x} (-\sin x) dx = -\ln |\cos x| + c$$

- $\int \sin x \cos^2 x dx = - \int -\sin x \cos^2 x dx = \frac{\cos^3 x}{3} + c$
- $\int \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} dx = \int x(1+x^2)^{-\frac{1}{2}} dx = (1+x^2)^{\frac{1}{2}} + c$
- $\int \frac{1}{(1+x^2) \arctan x} dx = \int \frac{1}{(1+x^2)} dx = \ln(\arctan x) + c$

### Integrazione per parti

Siano  $f$  e  $g$  due funzioni derivabili con derivata continua, si ha

$$\int f(x)g'(x) dx = f(x)g(x) - \int f'(x)g(x) dx$$

$f(x)$  = *fattore finito*

$g'(x) dx$  = *fattore differenziale*

L'ipotesi che le derivate di  $f$  e  $g$  siano continue assicura che gli integrali siano ben definiti.

### 2.15.12 Integrale indefinito, proprietà

Dalle proprietà delle derivate si ottiene:

**I**

$$\int [f(x) + g(x)] dx = \int f(x) dx + \int g(x) dx,$$

**II**

$$\int c f(x) dx = c \int f(x) dx, c = \text{costante}$$

### 2.15.13 Integrale indefinito

Integrali indefiniti immediati

$$\begin{aligned}
 \int x^\alpha dx &= \frac{x^{\alpha+1}}{\alpha+1} + x\alpha \neq -1 & \int \cos x dx &= \sin x + c \\
 \int \frac{1}{x} dx &= \ln|x| + c\alpha = 1 & \int \frac{1}{\cos^2 x} dx &= \tan x + c \\
 \int e^x dx &= e^x + c & \int \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx &= \arcsin x + c \\
 \int \sin x dx &= -\cos x + c & \int \frac{-1}{\sqrt{1-x^2}} dx &= \arccos x + c \\
 & & \int \frac{1}{1+x^2} dx &= \arctan x + c
 \end{aligned}$$

### 2.15.14 Integrazione per sostituzione

Sia  $F$  una primitiva di  $f$  in un intervallo  $I$ , ossia

$$F'(t) = f(t) \forall t \in I$$

Sia  $t = g(x)$  una funzione derivabile con derivata continua in  $[a, b] : g([a, b]) \subset I$  del teorema della derivata di una funzione composta

$$D[F(g(x))] = F'(g(x)) + g'(x) = f(g(x)) * g'(x)$$

Integrando otteniamo

$$\int D[F(g(x))] = \int f(g(x)) * g'(x) dx$$

Ovvero

$$\int f(g(x)) * g'(x) dx = F(g(x)) + c$$

Esercizio

$$\int \frac{\sin x}{\cos x} dx = - \int \frac{1}{\cos x} (-\sin x) dx = -\ln|\cos x| + c$$

•

$$\int \sin x \cos^2 x = - \int -\sin x \cos^2 x dx = \frac{\cos^3 x}{3} + c$$

•

$$\int \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} dx = (1+x^2)^{\frac{1}{2}} + c$$

•

$$\int \frac{1}{(1+x^2) \arctan x} dx = \int \frac{1}{(1+x^2)} \frac{1}{\arctan x} dx = \ln(\arctan x) + c$$

### 2.15.15 Integrazione per parti

Siano  $f$  e  $g$  due funzioni derivabili con derivata comune, si ha

$$\int f(x)g'(x) dx = f(x)g(x) - \int f'(x)g(x) dx \quad (2.8)$$

1.  $f(x)$ =fattore finito

2.  $g'(x)dx$ = fattore differenziale



L'ipotesi che le derivate di  $f$  e  $g$  siano continue assicura che gli integrali siano ben definiti.

### Dimostrazione

Consideriamo la formula di derivazione di un prodotto

$$[f(x)g(x)]' = f'(x)g(x) + f(x)g'(x)$$

Integrando membro a membro si ha

$$\int [f(x)g(x)]' dx = \int f'(x)g(x) dx + \int f(x)g'(x) dx$$

essendo  $f * g$  una primitiva della sua derivata  $[f * g]'$  si ottiene le tesi.

**Esercizio** Utilizzando il metodo di integrazione per parti calcolare

- $\int x \cos x dx = x \sin x - \int \sin x dx = x \sin x + \cos x + c$
- $\int \ln x dx = \int 1 * \ln x dx = x \ln x - \int x * \frac{1}{x} dx = x \ln x + c$
- $\int e^x \sin x dx = \int e^x \sin x - \int e^x \cos x dx = e^x \sin x - (e^x \cos x + \int e^x \sin x dx) \Rightarrow \int e^x \sin x dx = \frac{e^x \cos x + \int e^x \sin x dx}{2} = \frac{e^x (\sin x - \cos x)}{2} + c$
- $\int \cos^2 x dx = \int \cos x * \cos x dx = \cos x \sin x + \int \sin^2 x dx = \cos x \sin x + x - \int \cos^2 x dx \Rightarrow \cos x dx = \frac{\cos x \sin x + x}{2} + c$

Se l'integrale è definito:

$$\int_a^b f(x) dx \quad (2.9)$$

e si effettua la sostituzione  $x=g(t)$ . supponendo che

$$a) \quad x = a \Rightarrow c = g^{-1}(a)$$

$$b) \quad x = b \Rightarrow d = g^{-1}(b)$$

si ha

$$\int_a^b f(x) dx = \int_c^d f(g(t))g'(t) dt$$

Metodo di integrazione delle funzioni razionali fratte

$$\int \frac{N(x)}{D(x)} dx, N(x), D(x) \text{ polinomi di } x$$

**1° caso:**  $\text{grado}(N(x)) < \text{grado}(D(x))$

- a)  $D(x)$  ha radice radicale semplice: si determinano le radici del denominatore  $D(x)$  e lo si scompone in fattori

Esercizio

$$\int \frac{1}{x^2 - 3x + 2} \quad (2.10)$$

$$D(x) = x^2 - 3x + 2 = (x - 2)(x - 1)$$

Si devono cercare 2 costanti A e B (in quanto 2 sono i fattori semplici in cui è scomposto il polinomio  $D(x)$ ):

$$\frac{1}{x^2 - 3x + 2} = \frac{A}{x - 2} + \frac{B}{x - 1} = \frac{(A + B)x - A2B}{(x - 2)(x - 1)}$$

Per il principio di identità dei polinomi, i polinomi a numeratore del 1° e dell'ultimo membro, sono uguali se sono uguali i rispettivi i rispettivi coefficienti cioè

$$\begin{cases} A + B = 0 \\ -A - 2B = 1 \end{cases} \Rightarrow A = 1 \quad B = -1 \Rightarrow \frac{1}{x^2 - 3x + 2} = \frac{1}{x - 2} - \frac{1}{x - 1}$$

e quindi

$$\int \frac{1}{x^2 - 3x + 2} dx = \int \frac{1}{x - 2} dx - \int \frac{1}{x - 1} dx = \ln \left| \frac{x - 2}{x - 1} \right| + c$$

- b)  $D(x)$  ha radici reali multiple

Esercizio

$$\int \frac{1}{x^3 - x^2} dx$$

si ha  $D(x) = x^3 - x^2 = x^2(x - 1)$ :

una radice semplice ( $x=1$ ) e una radice multipla di molteplicità (radice doppia  $x=0$ ) si devono cercare 3 costanti:

$$\Rightarrow \frac{1}{x^3 - x^2} = \frac{A}{x} + \frac{B}{x^2} + \frac{C}{x - 1} = \frac{Ax(x - 1) + B(x - 1) + Cx^2}{x^2(x - 1)}$$

$$\Rightarrow \frac{1}{x^3 - x^2} = \frac{(A + C)x^2 + (-A + B)x - B}{x^2(x - 1)}$$

$$\begin{cases} A + C = 0 \\ -A + B = 0 \\ -B = 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{matrix} A = -1 \\ B = -1 \\ C = 1 \end{matrix}$$

$$\int \frac{1}{x^3 - x^2} dx = - \int \frac{1}{x} dx + \int -\frac{1}{x^2} dx + \int \frac{1}{x - 1} dx = \ln \left| \frac{x - 1}{x} \right| + \frac{1}{x} + c$$

c)  $D(x)$  ha radici *complesse coniugate e semplici*

Esercizio

$$\int \frac{1}{x^3 + x^2 + x + 1} dx$$

$$D(x) = x^3 + x^2 + x + 1 = (x+1)(x^2+1)$$

3 radici:  $x = -1$  reale semplice

$x = \mp 1$  complesse coniugate

$$\Rightarrow \frac{1}{x^3 + x^2 + x + 1} = \frac{1}{(x+1)(x^2+1)} = \frac{A}{x+1} + \frac{Bx+C}{x^2+1} \Rightarrow \begin{cases} A+B=0 & a=\frac{1}{2} \\ B+C=0 & B=-\frac{1}{2} \\ A+C=1 & C=\frac{1}{2} \end{cases}$$

E quindi si ottiene

$$\int \frac{1}{x^3 + x^2 + x + 1} dx = \frac{1}{2} \int \frac{1}{x+1} dx - \frac{1}{2} \int \frac{x-1}{x^2+1} dx = \frac{1}{2} \int \frac{1}{4} \int \frac{2x}{x^2+1} dx + \frac{1}{2} \int \frac{1}{x^2+1} dx$$

**2° caso:** grado(N(x)) grado(D(x))

In questo caso si deve eseguire la divisione tra il polinomio a numeratore (N(x)) e polinomio a denominatore (D(x)):

$g(x)$  = quoziente della divisione

$r(x)$  = resto della divisione

$$\Rightarrow \frac{N(x)}{D(x)} = q(x) + \frac{r(x)}{D(x)}$$

con  $r(x)$  un polinomio di grado inferiore a quello di  $N(x)$ :

$$\int \frac{N(x)}{D(x)} dx = \int q(x) dx + \int \frac{r(x)}{D(x)} dx$$

Esercizio

$$\int \frac{x^5 - x + 1}{x^4 + x^2} dx \quad \text{grado}(N(x))=5 > \text{grado}(D(x))=4$$

Effettuando la divisione tra i due polinomi si ottiene  $g(x) = x$ ,  $r(x) = -x^3 - x + 1$

$$\Rightarrow \frac{x^5 - x + 1}{x^4 + x^2} = x - \frac{x^3 + x - 1}{x^4 + x^2}$$

$$\frac{x^3 + x - 1}{x^4 + x^2} = \frac{x^3 + x - 1}{x^2(x^2 + 1)} = \frac{A}{x} + \frac{B}{x^2} + \frac{Cx + D}{x^2 + 1} = \frac{(A+C)x^3 + (B+D)x^2 + Ax + B}{x^2(x+1)}$$

$$\begin{cases} A+C=1 \\ B+C=0 \\ A=1 \\ B=-1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A=1 \\ B=-1 \\ C=0 \\ D=1 \end{cases}$$

Si ha

$$\int \frac{x^5 - x + 1}{x^4 + x^2} dx = \int x dx - \int \frac{x^3 + x - 1}{x^4 + x^2} dx = \int x dx - \int \frac{1}{x} dx + \int \frac{1}{x^2} dx -$$

$$\int \frac{1}{x^2 + 1} dx = \frac{x^2}{2} - \ln|x| - \frac{1}{x} - \arctan x + c$$

*Calcolo dell'area di una figura piana*

Sia  $T = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq f(x)\}$

**2.15.16 Esercizio di esempio**

calcolare l'area tra  $f(x) = x$  e  $g(x) = x^2$ :

$$due = \int_a^b x - x^2$$

**2.16 Integrali impropri o generalizzati**

In analisi matematica, l'integrale improprio o generalizzato è il limite di un integrale definito al tendere di un estremo di integrazione (o entrambi) ad un numero reale oppure all'infinito; tale numero reale può appartenere all'insieme di definizione della funzione integranda (*e in tal caso si ottiene lo stesso risultato che si ha calcolando un integrale definito*), oppure può rappresentare un punto di discontinuità. Gli integrali impropri si utilizzano per rendere calcolabili integrali riguardanti intervalli illimitati e/o funzioni non limitate, che non sono trattabili con l'integrale di Riemann. Esso richiede infatti la limitatezza sia per l'intervallo di integrazione, sia per la funzione integranda.

By Wikipedia

L'operazione di integrazione può estendere al caso di funzioni non limitate e di intervalli non limitati

$$\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx \int_1^{+\infty} = \frac{1}{x^2} dx \quad (2.11)$$

Sia  $f : (a, b] \rightarrow \mathbb{R}$  tale che,  $\forall \delta > 0$ ,  $f$  è integrabile secondo Riemann in  $[a + \delta, b]$  cioè esiste l'integrale

$$I(\delta) = \int_{a+\delta}^b f(x) dx \quad (2.12)$$

**2.16.1 Definizione**

Se esiste finito il limite

$$\lim_{\delta \rightarrow 0^+} I(\delta)$$

allora si dice che  $f$  è integrabile in senso improprio, tale limite si chiama integrale improprio o generalizzato e si indica con

$$\lim_{\delta \rightarrow 0^+} I(\delta) = \int_a^b f(x) dx$$

Esercizio

$$\int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx$$

$$I(\delta) = \int_\delta^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx = 2 - 2\sqrt{\delta}, \quad \lim_{\delta \rightarrow 0^+} I(\delta) = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} 2 - 2\sqrt{\delta} = 2$$

$$\text{L'integrale converge e si può scrivere: } \int_0^1 \frac{1}{\sqrt{x}} dx = 2 \quad (2.13)$$

Esercizio

$$\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx$$

$$I(\delta) = \int_{-1+\delta}^{1-\delta} \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \arcsin(1-\delta) - \arcsin(-1+\delta), \quad \lim_{\delta \rightarrow 0^+} I(\delta) = \frac{\pi}{2} - (-\frac{\pi}{2}) = \pi$$

L'integrale converge e si può scrivere:  $\int_{-1}^1 \frac{1}{\sqrt{1-x^2}} dx = \pi$

Esercizio. Studiare la convergenza del seguente integrale

$$\int_0^1 x^{-\alpha} dx, \alpha > 0$$

$$\text{si ha } \int_0^1 x^{-\alpha} dx = \begin{cases} \frac{1}{1-\alpha} & \text{se } \alpha < 1 \\ \text{non converge} & \text{se } \alpha \geq 1 \end{cases}$$

Nel caso in cui  $f : [a, b) \rightarrow \mathbb{R}$  non è limitata in  $a$  ma è integrabile in  $[a, b - \delta] \forall \delta > 0$  allora si pone

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{\delta \rightarrow 0^+} \int_a^{b-\delta} f(x) dx$$

Se tale limite esiste finito. Se in oltre la funzione  $f$  non è limitata in  $c \in (a, b)$  allora si dice che  $f$  è integrabile in senso improprio se  $f$  è integrabile in senso improprio in  $[a, c]$  e in  $[c, b]$  e si pone

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

Consideriamo ora intervalli illimitati:

$$[a, +\infty) \quad (-\infty, b] \quad (+\infty, -\infty)$$

Sia  $f : [a, +\infty) \rightarrow \mathbb{R}$  integrabile su ogni intervallo  $[\alpha, \beta]$  con  $\beta > a$ , poniamo

$$J(\beta) = \int_a^\beta f(x) dx \quad (2.14)$$

Se esiste finito il  $\lim_{\beta \rightarrow +\infty} J(\beta)$  allora  $f$  si dice integrabile in senso improprio su  $[a, +\infty)$  e tale limite si chiama **integrale improprio o generalizzato** di  $f$  in  $[a, b)$ :

$$\int_a^{+\infty} f(x) dx = \lim_{\beta \rightarrow +\infty} \int_a^\beta f(x) dx$$

Analogamente definizione per  $\int_{-\infty}^b f(x) dx$  dove  $f : (-\infty, b] \rightarrow \mathbb{R}$  è integrabile su  $[-\beta, b]$ , per il quale riguarda integrabile  $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx$  con  $f$  integrabile su ogni intervallo limitato, si pone:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \int_{-\infty}^c f(x) dx + \int_c^{+\infty} f(x) dx, c \in \mathbb{R}$$

e i due integrali impropri convergenti.

Esercizio. Dire se converge o esiste in senso improprio in seguente

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1+x^2} dx$$

$$\text{Si ha: } J(\beta) = \int_{-\beta}^\beta \frac{1}{1+x^2} dx = \arctan x \Big|_{-\beta}^\beta$$

$$\lim_{\beta \rightarrow +\infty} J(\beta) = \frac{\pi}{2} - \left(-\frac{\pi}{2}\right) = \pi$$

Esercizio

$$\int_1^{+\infty} x^\alpha dx, \alpha > 0$$

$$\text{si ha } \int_1^{+\infty} x^\alpha dx = \begin{cases} \frac{1}{\alpha-1} & \text{se } \alpha > 1 \\ \text{non converge} & \text{se } \alpha \leq 1 \end{cases}$$

## 2.17 Equazioni differenziali ordinarie

- Equazione differenziali del 1° ordine a variabili separabili,
- Equazione differenziali lineari del 1° ordine
- Equazioni differenziali del 1° ordine non lineare
  - Equazione di Bernoulli
  - Equazione di Clairaut
- Problema di Cauchy le eq. diff. del 1° ordine in forma normale,
- Equazioni differenziali lineari di ordine  $n \geq 2$ .

### 2.17.1 Definizione

Sia  $I \subseteq \mathbb{R}$  si definisce **equazione differenziale ordinaria di ordine n**,

$$g(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0$$

Con  $y' = y'(x)$ ,  $y'' = y''(x)$ ,  $\dots$ ,  $y^{(n)} = \dots, y^{(n)}$  e  $g$  funzione reale. Se  $g$  è un polinomio in cui  $y, y', y'', y^{(n)}$  sono di primo grado, allora l'equazione si dice: equazione differenziale lineare (*l'ordine dell'equazione è dato dall'ordine massimo di derivazione che compare*) -  $y = y(x)$  è soluzione dell'equazione differenziale di ordine n se,  $y(x)$  insieme alle sue derivate soddisfa l'equazione, cioè

$$g(y(x), y', y'', \dots, y^{(n)}(x)) = 0, \forall x \in I$$

Un'equazione differenziale è in forma normale se è esplicitata rispetto alla derivata di ordine massimo:

$$y^{(n)} = f(x, y, y', y'', \dots, y^{(n-1)}),$$

altrimenti si dice in forma non-normale. Integrare un'equazione differenziale significa trovare tutte le soluzioni. L'insieme delle soluzioni di un'equazione differenziale di ordine n dipende da n parametri reali: le costanti  $c_1, c_2, \dots, c_n$ :

$$y = y(x, c_1, c_2, \dots, c_n) \text{ INTEGRALE GENERALE} \quad (2.15)$$

Fissando i parametri  $c_1, c_2, \dots, c_n$  si ottiene una soluzione particolare dell'equazione differenziale e viene chiamata INTEGRALE PARTICOLARE. Nel caso di un'equazione differenziale del 1° ordine:  $g(x, y, y') = 0$   $y = y(x, c)$ .

*Nel caso di un'equazione differenziale del 1° ordine:*

$$g(x, y, y') = 0 \text{ forma non normale}$$

$$y' = f(x, y) \text{ forma normale o splicita}$$

$$y = y(x, c) \text{ integrale generale}$$

**Note** Non è sempre ogni soluzione dell'equazione differenziale data è anche un integrale particolare: ci sono casi di equazioni differenziali che ammettono anche **INTEGRALI SINGOLARI**, cioè integrali non ottenibili per nessun valore della costante c.

### 2.17.2 Equazioni differenziali a variabili separabili

$$y' = f(x) * g(y) \quad (2.16)$$

Con  $f(x)$  e  $g(y)$  funzioni continue se  $\exists y_0 : g(y_0) = 0 \Rightarrow y = y_0$  soluzione

Se  $g(y) \neq 0 \forall y$ , allora si divide l'equazione per  $g(y)$  e si integra:

$$\frac{y'}{g(y)} = f(x), \text{ ma } y' = \frac{dy}{dx}, \Rightarrow \int \frac{1}{g(y)} dy = \int f(x) dx \quad (2.17)$$

$G(y) = F(x) + c$ ,  $c$ =costante.

**Esempio.** Integrare la seguente equazione differenziale

$$y' = 2x + 2xy^2$$

$$\arctan y = x^2 + c$$

$$\Rightarrow y' = 2x(1 + y^2)$$

$$y = \tan(x^2 + c) \text{ Integrale generale}$$

$$\Rightarrow \int \frac{dy}{1 + y^2} = \int 2x dx$$

$$g(y) = 1 + y^2 \neq 0 \forall y$$

**Esempio** Risolvere  $y' = xy^2$

$y = 0$  è soluzione

se  $y \neq 0$ :

$$\int \frac{1}{y^2} dy = \int x dx \Rightarrow -\frac{1}{y} = \frac{x^2}{2} + c \Rightarrow y = -\frac{2}{x^2 + 2c} \text{ integrale generico}$$

$y = 0$  integrale singolare

$$y' + a(x)y = b(x)$$

con  $a(x)$  e  $b(x)$  funzioni continue in  $I$ .

Se  $b(x) = 0$  allora  $y' + a(x)y = 0$  si dice omogenea

### 2.17.3 Teorema

Tutte le soluzioni dell'equazioni differenziale lineare del 1°ordine non omogenea

$$y' + a(x)y = b(x) \quad (2.18)$$

sono date da

$$y(x) = e^{-A(x)} \left( \int e^{A(x)} b(x) dx + c \right)$$

con  $A(x)$  primitiva di  $a(x)$

### 2.17.4 Dimostrazione

Sia  $A(x)$  una primitiva di  $a(x)$ , cioè  $A' = a(x)$ , Moltiplicando entrambi i membri dell'equazione differenziale per fattore  $e^{A(x)}$  si ha

$$e^{A(x)} y'(x) + e^{A(x)} a(x) y(x) = e^{A(x)} b(x) \quad (2.19)$$

cioè

$$\frac{d}{dx} (e^{A(x)} y(x)) = e^{A(x)} b(x) \quad (2.20)$$

Integrando membro a membro si ha

$$e^{A(x)} y(x) = \int e^{A(x)} b(x) dx + c \Rightarrow y(x) = e^{-A(x)} \left( \int e^{A(x)} b(x) dx + c \right)$$

Se  $b(x) = 0$  allora  $y(x) = ce^{-A(x)}$

**Esempio** Integrare la seguente equazione differenziale

$$y' + 2xy = xe^{-x^2} \quad (2.21)$$

$$a(x) = 2x \Rightarrow A(x) = x^2, b(x) = xe^{-x^2}$$

$$\Rightarrow y(x) = e^{-x^2} \left( \int e^{x^2} xe^{-x^2} dx + c \right)$$

$$\Rightarrow e^{-x^2} \left( \frac{x^2}{2} + c \right) \text{ Integrale generale}$$

**Esercizi** Integrare le seguenti equazioni differenziali

$$(1 + x^2)y' + y = \arctan x$$

$$y' + \cos x * y = 0$$

### 2.17.5 Equazione di Bernoulli

$$y' + a(x)y = b(x)y^\alpha, \alpha \in R, \text{ con } \alpha \neq 0, 1$$

$a(x)$ ,  $b(x)$  funzioni continue,  $\alpha \neq 0, 1$  altrimenti si ricade nelle equazione lineari. (Se  $\alpha > 0$  è una soluzione: *integrale singolare*) Se  $y$  è diverso da zero, si divide tutto per  $y'$ :

$$y'y^{-\alpha} + a(x)y^{1-\alpha} = b(x)$$

Posto:

$$z(x) = y^{1-\alpha}$$

Si ha:  $z'(x) = (1 - \alpha)y^{-\alpha}y'$  e sostituendo nella equazione precedente si ottiene un'equazione differenziale lineare del primo ordine rispetto a  $z$ .

$$\boxed{z'(x) + (1 - \alpha)a(x)z(x) = (1 - \alpha)b(x)}$$

**Esercizio.** Integrare la seguente equazione differenziale

$$y' - y = xy^2 \quad (2.22)$$

$y=0$  è la soluzione

se  $y \neq 0$ :

$$y'y^{-2} - y^{-1} = x \Rightarrow z(x) = y^{-1}, z' = -y^{-2}y'$$

$z' + z = -x$ , Equazione differenziale lineare in  $z(x)$ .

$$\Rightarrow z(x) = e^{-x} \left( - \int xe^x dx + c \right)$$

Quindi  $z(x) = e^{-x}(-xe^x + e^x + c) \Rightarrow z = -x + 1 + ce^{-x}$  Ed essendo  $z(z) = y^{-1}$  se ha

$$y(x) = z^{-1} \Rightarrow y = \frac{1}{-x + 1 + ce^{-x}}$$

$y = 0$  Integrale singolare

$$y = \frac{1}{-x + 1 + ce^{-x}} \text{ Integrale generale}$$



### 2.17.6 Equazione di Clairaut

$$y = xy' + g(y')$$

con  $g$  funzione derivabile.

Si tratta di un'equazione differenziale del primo ordine in forma non normale. Derivando rispetto a  $x$  primo e secondo membro dell'equazione differenziale si ha:

$$y' = y' + xy'' + g'(y')y''$$

$$y''[x + g'(y')] = 0$$

1.  $y'' = 0 \rightarrow y' = c$

sostituendo nell'equazione differenziale di partenza

i)  $y = cx + g(x)$

ottengo una **famiglia di rette** al variare di  $c$

2.  $x + g'(y') = 0$

Posto  $t = y'$  dalla precedente si ricava:

ii)

$$\begin{cases} x(t) = -g'(t) \\ y(t) = -tg'(t) + g(t) \end{cases}$$

Tale soluzione è un *integrale singolare singolare* ed è l'involuppo della famiglia di rette (i)

#### Esercizio

$$y = \frac{x(y')^3 - 1}{(y')^2}$$

Si ha  $y = xy' - (y')^{-2}$

$$y' = y' + xy'' + 2(y')^{-3}y'' \Rightarrow y''(x + 2(y')^{-3}) = 0$$

$$y'' = 0 \quad x + 2(y')^{-3} = 0$$

da  $y'' = 0$  si ottiene  $y' = c \Rightarrow y = cx - \frac{1}{c^2}$  famiglia di rette da  $x + 2(y')^{-3} = 0$  ponendo  $y' = t$  si ottiene

$$\begin{cases} x = -2t^{-3} \\ y = tx - 2t^{-2} \Rightarrow y = -4t^{-2} \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Integrale singolare o curva involuppo del fascio di} \\ \text{rette} \end{array}$$

Equazione di Clairaut

$$y = xy' - \sin y'$$

La soluzione è  $cx - \sin x$  fascio di rette

$$\begin{cases} x = \cos t \\ y = t \cos t - \sin t \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{Integrale singolare o curva involuppo del fascio di} \\ \text{rette} \end{array}$$

## 2.18 Equazioni differenziali lineari di ordine n

$$y^{(n)} + a_1(x)y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}(x)y' + a_n(x)y = b(x) \quad (2.23)$$

$$\left. \begin{array}{l} a_i(x) = \text{coefficienti} \\ b(x) = \text{termine noto} \end{array} \right\} \text{Definizione in } I \subseteq \mathfrak{R}$$

Se  $b(x) = 0$  l'equazione si dice *omogenea*, altrimenti *non omogenea*

### 2.18.1 Teorema

Se  $y_1(x), \dots, y_n(x)$ ,  $x \in I \subseteq R$ , sono soluzioni particolari dell'equazione differenziale lineare omogenea di ordine  $n$  allora  $c_1 y_1 + \dots + c_n y_n$  è soluzione.

L'integrale generale dell'equazione differenziale lineare omogenea di ordine  $n$  è

$$y_0(x) = c_1 y_1(x) + \dots + c_n y_n(x)$$

$y_1(x), \dots, y_n(x)$ , sono  $n$  soluzioni linearmente indipendenti,  $c_1, \dots, c_n$ , sono  $n$  costanti arbitrarie.

### 2.18.2 Definizione di funzione linearmente indipendente

$y_1(x), \dots, y_n(x)$ , sono funzioni linearmente indipendenti se

$$c_1 y_1 + \dots + c_n y_n = 0 \Rightarrow c_1 = c_2 = \dots = c_n = 0$$

*Condizione necessaria e sufficiente affinché  $n$  soluzioni, di un'equazione differenziale di ordine  $n$ , siano linearmente indipendenti è che il determinante Wronskiano:*

$$\begin{vmatrix} y_1 & \dots & y_n \\ y_1' & \dots & y_n' \\ \vdots & & \vdots \\ y_1^{(n-1)} & \dots & y_n^{(n-1)} \end{vmatrix} \neq 0$$

Data l'equazione non omogenea

$$(1) \quad y^{(n)} + a_1(x)y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}(x)y' + a_n(x)y = b(x)$$

e la sua omogenea associata:

$$(2) \quad y^{(n)} + a_1(x)y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}(x)y' + a_n(x)y = 0$$

l'integrale generale di (1) è:

$$y(x) = y_0(x) + \bar{y}(x)$$

dove  $y_0(x)$  è l'integrale generale di (2) e  $\bar{y}(x)$  è un integrale particolare di (1).

#### omogenee a coefficiente costanti

$$y^{(n)} + a_1(x)y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}(x)y' + a_n(x)y = 0 \quad (2.24)$$

$a_1, \dots, a_n \in \mathfrak{R}$

A tale equazione si associa l'equazione caratteristica:

$$\lambda^n + a_1 \lambda^{n-1} + \dots + a_{n-1} \lambda + a_n = 0$$

che, per il teorema fondamentale dell'algebra, ha in  $\mathbb{C}$   $n$  radici ciascuna ciascuna contata con la propria molteplicità.  $y = e^{\alpha x}$  è soluzione dell'equazione differenziale lineare omogenea se  $\alpha$  è soluzione dell'equazione caratteristica

$$\text{Infatti se } y = e^{\alpha x}, y' = \alpha x, \dots, y^{(n)} = \alpha^n e^{\alpha x} \quad (2.25)$$

sostituendo nell'equazione differenziale si ha

$$e^{\alpha x} (a^n + a_1 \alpha^{n-1} + \dots + a_{n-1} \alpha + a_n) = 0 \quad (2.26)$$

$\Rightarrow e^{\alpha x}$  è soluzione dell'equazione omogenea se  $\alpha$  è soluzione dell'equazione caratteristica

**1° Caso)** L'equazione caratteristica ammette n radici reali e distinte  $\lambda, \dots, \lambda_n$ , allora gli n integrali linearmente indipendenti (*dell'equazione omogenea*) sono:

$$y_1 = e^{\lambda_1 x}, y_2 = e^{\lambda_2 x}, \dots, y_n = e^{\lambda_n x}$$

e l'integrale generale è

$$y_0 = c_1 e^{\lambda_1 x} + \dots + c_n e^{\lambda_n x}$$

Esempio  $y'' - 5y' + 6y = 0$

**2° Caso)** L'equazione caratteristica ammette radici reali e multiple, per esempio se  $\lambda_1$  è di molteplicità m, allora m integrali particolari (*dell'equazione omogenea*) sono:

$$y = e^{\lambda_1 x}, y_2 = x e^{\lambda_1 x}, \dots, y_m = x^{m-1} e^{\lambda_1 x}$$

in generale per ogni radice  $\lambda_k$  di molteplicità  $m_k$ , gli n integrali linearmente indipendenti sono

$$e^{\lambda_k x}, x e^{\lambda_k x}, x^2 e^{\lambda_k x}, \dots, x^{m_k-1} e^{\lambda_k x} \quad k = 1, \dots, r, \quad m_1 + m_2 + \dots + m_r = n \quad (2.27)$$

Es.  $y''' + y'' = 0$

**3° Caso)** L'equazione caratteristica ammette radici complesse coniugate:

$$\lambda = \alpha + i\beta \quad \text{di molteplicità } m$$

$$\bar{\lambda} = \alpha - i\beta \quad \text{di molteplicità } m$$

allora:

$$e^{\alpha x} \cos \beta x, \quad x e^{\alpha x} \cos \beta x, \dots, x^{m-1} e^{\alpha x} \cos \beta x$$

$$e^{\alpha x} \sin \beta x, \quad x e^{\alpha x} \sin \beta x, \dots, x^{m-1} e^{\alpha x} \sin \beta x$$

sono soluzioni dell'equazione omogenea (2m). Si arriva a tali soluzioni considerando gli integrali.

Si arriva a tali soluzioni considerando gli integrali

$$x^k e^{(\alpha+i\beta)x}, \quad x^k e^{(\alpha-i\beta)x}, \quad k = 0, 1, \dots, m-1$$

a cui vengono applicate le formule di Eulero

Esempio  $y^{(4)} + 2y'' + y = 0$

**Ricerca di un integrale particolare per un'equazione differenziale lineare di ordine n non omogenea**

$$y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} y' + a_n y = b(x)$$

**Eq. diff. lineari a coefficienti costanti**

L'integrale generale dell'equazione non omogenea è

$$y(x) = y_0(x) + \bar{y}(x)$$

Dove:

- $y_0(x)$  è la soluzione dell'omogenea associata;
- $\bar{y}_0(x)$  è un integrale particolare della non omogenea;

**Calcolo di  $\bar{y}(x)$ : Metodo della somiglianza**

1.  $b(x) = P_m(x)e^{\gamma x}$  polinomio di grado  $m$

(a)  $\sigma$  non è radice dell'equazione caratteristica

$$\bar{y}(x) = Q_m(x)e^{\gamma x} \quad (2.28)$$

(b)  $\sigma$  è radice dell'equazione caratteristica con molteplicità  $k$

$$\bar{y}(x) = x^k Q_m(x)e^{\gamma x}$$

2.  $b(x) = P_m(x)e^{\gamma x} \cos(\mu x)$  o  $b(x) = P_m(x)e^{\gamma x} \sin(\mu x)$

(a)  $\gamma \pm i\mu$  non sono radici dell'equazione caratteristica

$$\bar{y}(x) = [Q_m(x) \cos(\mu x) + R_m(x) \sin(\mu x)]e^{\mu x}$$

(b)  $\gamma \pm i\mu$  è radice dell'equazione caratteristica con molteplicità  $k$

$$\bar{y}(x) = x^k [Q_m(x) \cos(\mu x) + R_m(x) \sin(\mu x)]e^{\mu x}$$

Esempio  $y'' - 2y' + 2y = x^2$

L'integrale generale dell'equazione non omogenea è

$$\boxed{y(x) = y - 0(x) + \bar{y}(x)}$$

$$y'' - 2y' + 2y = 0 \Rightarrow \lambda^2 - 2\lambda + 2 = 0 \Rightarrow \lambda = 1 \pm i$$

$$y_0(x) = c_1 e^x \cos x + c_2 e^x \sin x$$

$$b(x) = x^2 \Rightarrow m = 2, \gamma = 0 \text{ non è soluzione dell'equazione caratteristica, } \bar{y}(x) = ax^2 + bx + c$$

Se  $\bar{y}(x)$  è soluzione della nostra equazione differenziale non omogenea, allora sostituendo  $\bar{y}(x), \bar{y}'(x), \bar{y}''(x)$  nell'equazione differenziale si deve avere un'identità.

Calcoliamo  $\bar{y}'(x), \bar{y}''(x)$

$$\bar{y}' = 2ax + b, \bar{y}'' = 2a$$

Sostituendo nell'eq diff si ha

$$2a - 4ax - 2b + 2ax^2 + 2bx + 2c = x^2 \quad (2.29)$$

$$\Rightarrow 2ax^2 + (2b - 4a)x + 2a - 2b + 2c = x^2$$

Per il principio di identità dei polinomi si ha

$$\begin{cases} 2a = 1 \\ 2b - 4a = 0 \\ 2a - 2b + 2c = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} a = \frac{1}{2} \\ b = 0 \\ c = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (2.30)$$

Perciò  $\bar{y}(x) = \frac{x^2}{2} + x + \frac{1}{2}$ . E quindi l'integrale generale dell'equazione completa è

$$y(x) = c_1 e^x \cos x + c_2 e^x \sin x + \frac{x^2 + 2x + 1}{2}$$

### 2.18.3 Metodo della variazione delle costanti arbitrarie (o di Lagrange)

(valido per un'equazione differenziale lineare a coefficiente variabili)

**Teorema** Siano  $y_1, \dots, y_n(x)$ ,  $x \in I \subseteq \mathbb{R}$ ,  $n$  integrali linearmente indipendenti dell'equazione omogenea. Siano  $c_1(x), \dots, c_n(x)$ ,  $n$  funzioni le cui derivate soddisfano in  $I$  il sistema di equazioni lineari in  $c_1(x), \dots, c'_n(x)$ :

$$\begin{cases} c'_1(x)y_1 + \dots + c'_n(x)y_n = 0 \\ c'_1(x)y'_1 + \dots + c'_n(x)y'_n = 0 \\ \dots \\ \dots \\ c'_1(x)y_1^{(n-1)} + \dots + c'_n(x)y_{(n-1)} = b(x) \end{cases}$$

Allora un integrale particolare dell'equazione differenziale lineare di ordine  $n$  è

$$\bar{y}(x) = c_1(x)y_1(x) + \dots + c_n(x)y_n(x)$$

### 2.18.4 Equazioni differenziali lineari, Metodo di Lagrange: esempio

$$y'' + y = \frac{1}{\cos x}$$

$$\lambda^2 + 1 = 0 \Rightarrow \gamma = \pm 1,$$

$$y_0(x) = c_1 \cos x + c_2 \sin x$$

$$c_1, c_2 \text{ costanti.}$$

$$y(x) = y_0(x) + \bar{y}(x)$$

$$\bar{y}(x) = c_1(x) \cos x + c_2(x) \sin x$$

$$c_1(x), c_2(x)$$

funzione da determinare

$$\begin{cases} c'_1(x) \cos x_1 + \dots + c'_n(x) \sin x_n = 0 \\ c'_1(x) \sin x'_1 + \dots + c'_n(x) \cos x'_n = \frac{1}{\cos x} \end{cases}$$

$$W(x) = \begin{vmatrix} y_1(x) & y_2(x) \\ y'_1(x) & y'_2(x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \cos x & \sin x \\ -\sin x & \cos x \end{vmatrix} = 1$$

$$c'_1(x) = \frac{\begin{vmatrix} 0 & y_2(x) \\ b(x) & y'_2(x) \end{vmatrix}}{W(x)} = \frac{\begin{vmatrix} 0 & \sin(x) \\ \frac{1}{\cos x} & \cos(x) \end{vmatrix}}{W(x)} = -\frac{\sin x}{\cos x} = -\tan x$$

$$c'_2(x) = \frac{\begin{vmatrix} 0 & y_1(x) \\ y'_1(x) & b(x) \end{vmatrix}}{W(x)} = \frac{\begin{vmatrix} \cos x & 0 \\ -\sin x & \frac{1}{\cos x} \end{vmatrix}}{W(x)} = 1$$

$$c_1 = \int \frac{-\sin x}{\cos x} dx = \ln |\cos x|,$$

$$c_2(x) = \int 1 dx = x$$

$$\bar{y}(x) = c_1(x) \cos x + c_2(x) \sin x = \cos x \ln |\cos x| + x \sin x$$

$$\text{l'integrale generale è } y(x) = c_1 \cos x + c_2 \sin x + \cos x \ln |\cos x| + x \sin x$$

$$y''' - 2y'' + y' = e^x \quad (2.31)$$

$$\lambda^3 - 2\lambda^2 + \lambda = 0 \Rightarrow \lambda(\lambda^2 - 2\lambda + 1) = 0$$

$$\lambda = 0(\lambda - 1)^2 = 0 \quad \lambda = 1 \quad m = 2$$

$$y_0 = c_1 e^2 x$$

