

Complementi di Matematica
Ing. Energetica-Elettrica-Sicurezza
Versione A.A. 2007-08

Claudio Saccon

6 novembre 2007

Capitolo 1

Preliminari

1.1 Funzioni, successioni, limiti

In tutto quanto segue \mathbb{R} indica l'insieme dei numeri reali, \mathbb{N} l'insieme dei numeri naturali, cioè gli interi da zero in avanti, e \mathbb{Z} l'insieme dei numeri interi relativi.

Ricordiamo che la scrittura $f : A \rightarrow B$ indica che f è una *funzione* definita sull'insieme A a valori nell'insieme B (*f va da/ manda A in B*). Per ogni a in A è definito univocamente un b in B : si scrive allora $f(a) = b$; si dice che a è la *variabile* che si mette ad *argomento* di f e che $b = f(a)$ è il *valore* che f assume in a .

Per esempio si può introdurre la funzione $q : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ dicendo che $q(x) = x^2$. Notiamo che sarebbe stato lo stesso scrivere $q(a) = a^2$, l'importante è chiarire quale sia la regola che fa passare dall'argomento al valore, in questo caso l'elevazione al quadrato. Quindi nella definizione $q(x) = x^2$ la lettera x è una “variabile muta”.

Da questa impostazione segue che la funzione si chiama f (q nell'esempio) mentre la scrittura $f(x)$ indica il valore che f assume in x (che deve essere noto quando lo si scrive). Nella pratica tale regola è spesso infranta e si scrive $f(x)$ per indicare la funzione (è più veloce dire “la funzione x^2 ” rispetto a “la funzione $q : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tale che $q(x) = x^2$ per ogni x ”), bisogna però essere consapevoli che si tratta di un piccolo abuso e tenere presente che parlando di una funzione si pensa al “complesso di tutti i suoi valori” (più precisamente alla regola che dato x “produce” $f(x)$). Questo sarà particolarmente vero nel seguito del corso in cui le funzioni saranno viste come oggetti singoli, su cui per esempio calcolare altre funzioni. Un modo utile di pensare a una funzione è attraverso il suo *grafico*, cioè all'insieme $\{(a, b) : a \in A, b \in B, b = f(a)\}$.

Si chiama *successione* una funzione che prende i suoi argomenti tra i numeri interi. Quindi una successione in B (o anche una successione di punti di B) è una f con $f : \mathbb{N} \rightarrow B$ - o più in generale $f : \{n_0, n_0 + 1, \dots\} \rightarrow B$. Tradizionalmente nel caso delle successioni si scrive f_n al posto di $f(n)$ e invece di f si scrive (f_n) (o $(f_n)_{n \geq n_0}$ quando serve indicare anche il punto iniziale in cui è definita la successione). Per esempio $(n^2)_{n \geq 0}$ è una successione, che differisce dalla funzione q di prima in quanto è definita solo per argomenti interi. Un altro esempio è $\left(\frac{1}{n-2}\right)_{n \geq 3}$ che è definita da 3 in poi.

Di solito le successioni si indicano con le prime lettere dell'alfabeto $((a_n), (b_n), (c_n), \dots)$ e spesso si assume implicitamente che n (o m) indichino delle variabili intere.

In tutta l'Analisi Matematica è fondamentale la nozione di **limite**. Rinviamo ai testi del primo anno la definizione di limite per funzioni reali di una variabile reale (che comprende anche quella per le successioni di numeri reali) e tutte le relative proprietà. che diamo quindi per note (ricorderemo invece, fra un momento, la definizione di limite in più variabili).

Ricordiamo solo che se A è un sottoinsieme di \mathbb{R} , x_0 è un punto di accumulazione per A (potendo anche essere $x_0 = \pm\infty$) e $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, il limite di $f(x)$ per x che tende a x_0 (quando esiste) si scrive $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x)$.

Analogamente (ma non ci sarebbe necessità di dirlo) nel caso di una successione $(a_n)_{n \geq n_0}$ si scrive $\lim_{n \rightarrow +\infty} a_n$ ($+\infty$ è l'unico punto di accumulazione per $\{n \in \mathbb{N} : n \geq n_0\}$). Per indicare che una funzione ammette un certo limite l per x tendente a x_0 (cioè che $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$) scriveremo spesso

$$f(x) \xrightarrow{x \rightarrow x_0} l \quad (f(x) \rightarrow l, \text{ se } x_0 \text{ è chiaro dal contesto})$$

(dove l può essere finito o infinito). Nello stesso modo, nel caso delle successioni scriveremo

$$a_n \rightarrow l$$

(in questo caso n non può tendere che a $+\infty$). Quindi le scritte:

$$\frac{1}{x^2} \xrightarrow{x \rightarrow 0} +\infty, \quad \frac{n}{n+1} \rightarrow 1, \quad n \rightarrow +\infty,$$

sono sinonimi di

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{1}{x^2} = +\infty, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{n}{n+1} = 1, \quad \lim_{n \rightarrow +\infty} n = +\infty.$$

Vediamo come si estende la nozione di limite al caso di più variabili.

1.1.1 Definizione. Dato N intero si indica con \mathbb{R}^N l'insieme delle N -uple ordinate (x_1, \dots, x_N) .

Si chiama *modulo* del punto $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$, il numero $|\mathbf{x}| := \sqrt{x_1^2 + \dots + x_N^2}$. Dati $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ e $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_N)$ chiameremo *distanza* tra \mathbf{x} e \mathbf{y} l'espressione

$$\text{dist}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) := |\mathbf{x} - \mathbf{y}| = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + \dots + (x_N - y_N)^2}.$$

Useremo (in questo paragrafo) la convenzione di scrivere i punti di \mathbb{R}^N in grassetto e in carattere normale le coordinate.

1.1.2 Proposizione. Vale la disuguaglianza triangolare:

$$|\mathbf{x} + \mathbf{y}| \leq |\mathbf{x}| + |\mathbf{y}| \quad \forall \mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^N.$$

1.1.3 Definizione. Se (\mathbf{a}_n) è una successione di punti di \mathbb{R}^N e se $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^N$ diremo che \mathbf{l} è il limite per n che tende all'infinito di (\mathbf{a}_n) , e scriveremo

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \mathbf{a}_n = \mathbf{l},$$

se

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} |\mathbf{a}_n - \mathbf{l}| = 0.$$

Diremo anche, in questo caso, che tende a \mathbf{l} e scriveremo spesso $\mathbf{a}_n \rightarrow \mathbf{l}$.

Per esempio $\mathbf{a}_n := \left(\frac{n}{n^2 + 1}, \frac{n}{n + 1} \right) \rightarrow (0, 1)$ (per $n \rightarrow +\infty$). Infatti

$$|\mathbf{a}_n - (0, 1)| = \sqrt{\frac{n^2}{(n^2 + 1)^2} + \frac{(-1)^2}{(n + 1)^2}} \rightarrow 0.$$

1.1.4 Definizione. Dato un insieme A contenuto in \mathbb{R}^N e un punto \mathbf{x}_0 di \mathbb{R}^N diremo che \mathbf{x}_0 è di *accumulazione* per A se esiste una successione (\mathbf{x}_n) di punti di A che tende a \mathbf{x}_0 ($\mathbf{x}_n \in A, \mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_0$).

Per esempio il punto $(1, 0)$ è di accumulazione per il cerchio aperto di centro $\mathbf{0}$ e raggio 1: $A := \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 : |\mathbf{x}| < 1\}$.

1.1.5 Definizione. Siano N ed M due interi maggiori o eguali a 1. Siano $A \subset \mathbb{R}^N$, \mathbf{x}_0 un punto di accumulazione per A e sia $\mathbf{f} : A \rightarrow \mathbb{R}^M$ (\mathbf{f} è una funzione di N variabili reali a valori in \mathbb{R}^M). Dato $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^M$ diremo che \mathbf{l} è il limite di \mathbf{f} per \mathbf{x} che tende a \mathbf{x}_0 , e scriveremo

$$\lim_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_0} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = \mathbf{l},$$

se per qualunque successione (\mathbf{x}_n) di punti di A , tale che $\mathbf{x}_n \rightarrow \mathbf{x}_0$ succede che

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_n) \rightarrow \mathbf{f}(\mathbf{x}_0).$$

Diremo, anche in questo caso, che $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ tende a \mathbf{l} e scriveremo spesso $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \xrightarrow{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_0} \mathbf{l}$ ($\mathbf{f}(\mathbf{x}) \rightarrow \mathbf{l}$ se \mathbf{x}_0 è chiaro dal contesto).

Per esempio $\left(\frac{x-y}{x^2+y^2}, \frac{x+y}{x^2+y^2} \right) \rightarrow (0, 1)$ se $(x, y) \rightarrow (1, 1)$ (si può verificarlo con un po' di pazienza).

Se $\mathbf{f} : A \rightarrow \mathbb{R}^M$ possiamo chiaramente scrivere $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = (f_1(\mathbf{x}), \dots, f_M(\mathbf{x}))$. In questo modo risultano definite $f_j : A \rightarrow \mathbb{R}$ per $j = 1, \dots, M$, che si chiamano le *componenti* di \mathbf{f} .

1.1.6 Proposizione. Se $\mathbf{f} : A \rightarrow \mathbb{R}^M$, $\mathbf{l} \in \mathbb{R}^M$ con $\mathbf{l} = (l_1, \dots, l_M)$, allora

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) \rightarrow \mathbf{l} \iff f_j(\mathbf{x}) \rightarrow l_j \quad j = 1, \dots, M.$$

1.1.7 Definizione (continuità). Sia $A \subset \mathbb{R}^N$ e sia $\mathbf{f} : A \rightarrow \mathbb{R}^M$. Dato un punto \mathbf{x}_0 in A si dice che \mathbf{f} è continua in \mathbf{x}_0 se

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}) \xrightarrow{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}_0} \mathbf{f}(\mathbf{x}_0)$$

nel caso in cui \mathbf{x}_0 sia punto di accumulazione per A . Nell'altro caso (\mathbf{x}_0 non è di accumulazione per A) la \mathbf{f} si dice continua senza altre condizioni.

Si dice che \mathbf{f} è continua su A se \mathbf{f} è continua in ogni \mathbf{x}_0 di A .

Si può notare che con la definizione sopra una successione è automaticamente continua in tutti i suoi punti (nessun intero è di accumulazione per \mathbb{N}). Nella pratica però i casi interessanti sono quelli in cui i punti di A sono di accumulazione per A e quindi la continuità si esprime mediante il limite.

Non ripetiamo qui le proprietà dei limiti e della continuità in più variabili (accenneremo a qualcosa nel prossimo paragrafo) per le quali rinviamo a un testo opportuno.

Ricordiamo però il Teorema di Weierstrass per funzioni più variabili, con cui faremo dei confronti nel seguito. Premettiamo due definizioni.

1.1.8 Definizione. Sia A un sottoinsieme di \mathbb{R}^N .

- A si dice *chiuso* se contiene tutti i suoi punti di accumulazione.
- A si dice *limitato* se esiste una costante M per cui $|\mathbf{x}| \leq M$ per tutti i punti \mathbf{x} di A .

1.1.9 Teorema (Weierstrass). Se A è limitato e chiuso in \mathbb{R}^N e se $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione continua, allora f ammette massimo e minimo su A , cioè esistono due punti \mathbf{x}_1 e \mathbf{x}_2 in A tali che

$$f(\mathbf{x}_1) \leq f(\mathbf{x}) \leq f(\mathbf{x}_2) \quad \forall \mathbf{x} \in A.$$

(\mathbf{x}_1 si dice allora punto di minimo e \mathbf{x}_2 punto di massimo).

Concludiamo questo paragrafo col richiamare una importante proprietà di \mathbb{R}^N , (la *completezza*, come vedremo poi). Ricordiamo la definizione di successione di Cauchy.

1.1.10 Definizione. Sia (\mathbf{a}_n) una successione in \mathbb{R}^N . Si dice che (\mathbf{a}_n) *verifica la proprietà di Cauchy* - o più brevemente che (\mathbf{a}_n) *è di Cauchy* - se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste \bar{n} in \mathbb{N} tale che

$$|\mathbf{a}_n - \mathbf{a}_m| \leq \varepsilon \quad \forall n, m \geq \bar{n}$$

(gli elementi di (\mathbf{a}_n) “diventano arbitrariamente vicini tra loro al crescere dell’indice”).

Non è difficile vedere che se (\mathbf{a}_n) ammette limite allora essa verifica la proprietà di Cauchy. Anche il viceversa è vero, ma non è per nulla ovvio.

1.1.11 Teorema. *Sia (\mathbf{a}_n) una successione in \mathbb{R}^N . Allora*

$$(\mathbf{a}_n) \text{ ammette limite} \Leftrightarrow (\mathbf{a}_n) \text{ è di Cauchy.}$$

Il teorema sopra riflette il fatto che \mathbb{R}^N “non ha buchi”: una successione di punti che si avvicinano tra loro non può sparire nel nulla. Questo non sarebbe vero se al posto di \mathbb{R} ci fosse \mathbb{Q} . È facile infatti prendere una successione di numeri razionali che in \mathbb{R} converge a $\sqrt{2}$ - tale successione è di Cauchy in \mathbb{Q} ma non converge a nulla in \mathbb{Q} .

1.2 Richiamo sulle serie numeriche

1.2.1 Definizione. Data una successione di numeri reali $(a_n)_{n \geq n_0}$ chiameremo *somma parziale n-esima* l’espressione

$$S_n := \sum_{k=n_0}^n a_k = a_{n_0} + \cdots + a_n$$

(che risulta definita per $n \geq n_0$). La (nuova) successione $(S_n)_{n \geq n_0}$ si chiama *serie* associata ad $(a_n)_{n \geq n_0}$ o più brevemente serie degli a_n .

Si dice che *la serie è convergente* se $(S_n)_{n \geq n_0}$ ammette limite finito S , si dice che *la serie è divergente* se $(S_n)_{n \geq n_0}$ tende a $\pm\infty$ e si dice che *la serie è indeterminata* se $(S_n)_{n \geq n_0}$ non ha limite. Nel primo caso chiamiamo il limite S *somma della serie* e lo indichiamo con

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n.$$

Molto spesso, con un leggero abuso, l’espressione $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ viene usata per indicare la serie oltre che la sua somma, per cui si usa dire: la “serie $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ ” è convergente / divergente / indeterminata.

Diremo che la serie è *assolutamente convergente* se la serie $\sum_{k=n_0}^{\infty} |a_n|$ è convergente.

Ricordiamo il comportamento di alcune serie importanti.

1.2.2 Proposizione. *La serie geometrica di ragione A :*

$$\sum_{n=0}^{\infty} A^n$$

- è convergente per $|A| < 1$ e in tal caso ha come somma $\sum_{n=0}^{\infty} = \frac{1}{1-A}$;
- è divergente positivamente per $A \geq 1$;
- è indeterminata per $A \leq -1$.

1.2.3 Proposizione. La serie armonica di esponente α

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^\alpha}$$

- è convergente se $\alpha > 1$;
- è divergente positivamente se $\alpha \leq 1$.

Ricordiamo i principali risultati sulle serie.

1.2.4 Proposizione. Se $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ converge, allora $a_n \rightarrow 0$.

1.2.5 Proposizione. Se una serie $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ ha tutti termini positivi ($a_n \geq 0$) allora non può essere indeterminata.

Il risultato sopra ci autorizza a considerare **sempre** la somma di una serie a termini positivi a patto di ammettere che possa essere $+\infty$. Potremo quindi scrivere $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n < +\infty$ per dire che la serie converge (visto che $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ ha senso). Questa scrittura non si può usare se gli a_n cambiano segno.

È chiaro che per quanto sopra basterebbe $a_n \geq 0$ per n grande (da un certo \bar{n} in poi).

1.2.6 Proposizione (criterio del confronto per serie a termini positivi). Siano (a_n) e (b_n) due successioni di numeri positivi.

Se $a_n \leq b_n$ per ogni n (per ogni n grande), allora

$$\begin{aligned} \sum_{n=n_0}^{\infty} b_n \text{ converge} &\quad \Rightarrow \quad \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge} \\ \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ diverge} &\quad \Rightarrow \quad \sum_{n=n_0}^{\infty} b_n \text{ diverge} \end{aligned}$$

1.2.7 Proposizione (criterio del confronto asintotico). Siano (a_n) e (b_n) due successioni di numeri positivi.

Supponiamo che

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

Allora, se $l \in]0, +\infty[$:

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge} \Leftrightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} b_n \text{ converge},$$

se $l = 0$

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} b_n \text{ converge} \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge},$$

mentre se $l = +\infty$

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge} \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} b_n \text{ converge.}$$

I due criteri che seguono sono scritti in termine del limite superiore e del limite inferiore di opportune espressioni; in prima istanza si può pensare che esista il limite delle quantità indicate cioè che $\liminf = \limsup$.

1.2.8 Proposizione (criterio della radice). *Sia (a_n) una successione di numeri positivi. Allora*

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{a_n} < 1 & \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge,} \\ \limsup_{n \rightarrow +\infty} \sqrt[n]{a_n} > 1 & \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ diverge.} \end{aligned}$$

1.2.9 Proposizione (criterio del rapporto). *Sia (a_n) una successione di numeri positivi. Allora*

$$\begin{aligned} \limsup_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} < 1 & \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge,} \\ \liminf_{n \rightarrow +\infty} \frac{a_{n+1}}{a_n} > 1 & \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ diverge.} \end{aligned}$$

1.2.10 Proposizione (criterio della convergenza assoluta). *Se una serie converge assolutamente essa converge. In altri termini, data una successione (a_n) si ha*

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} |a_n| \text{ converge} \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge.}$$

Notiamo che, essendo la successione dei valori assoluti una successione di numeri positivi, possiamo anche scrivere:

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} |a_n| < +\infty \Rightarrow \sum_{n=n_0}^{\infty} a_n \text{ converge.}$$

Il teorema seguente verrà utilizzato in seguito.

1.2.11 Teorema (prodotto alla Cauchy di due serie). *Siano $\sum_{n=1}^{\infty} a_n$ e $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ due serie assolutamente convergenti. Poniamo per ogni n :*

$$c_n := \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k}.$$

Allora $\sum_{n=1}^{\infty} c_n$ è assolutamente convergente e

$$\sum_{n=1}^{\infty} c_n = \left(\sum_{n=1}^{\infty} a_n \right) \left(\sum_{n=1}^{\infty} b_n \right)$$

Dimostrazione. Poniamo innanzitutto:

$$s'_n := \sum_{i=1}^n a_i, \quad t'_n := \sum_{i=1}^n |a_i|, \quad s''_n := \sum_{i=1}^n b_i, \quad t''_n := \sum_{i=1}^n |b_i|, \quad s_n := \sum_{i=1}^n c_i;$$

inoltre introduciamo

$$d_n := \sum_{k=1}^n |a_k| |b_{n-k}|, \quad t_n := \sum_{i=1}^n d_i$$

Sappiamo che $s'_n \rightarrow s'$ e $s''_n \rightarrow s''$ in \mathbb{C} per opportuni s' ed s'' in \mathbb{C} , mentre $t'_n \rightarrow t'$ e $t''_n \rightarrow t''$ per due numeri reali positivi t' e t'' .

Facciamo la dimostrazione per passi.

1. Mostriamo che $\sum_n d_n < +\infty$ (notiamo che $d_n \in \mathbb{R}$ e $d_n \geq 0$). Si ha:

$$\sum_{i=1}^n d_i = \sum_{i+j \leq n} |a_i| |b_j| \leq \sum_{i,j \leq n} |a_i| |b_j| = t'_n t''_n \leq t' t''$$

Ne segue che $\sum_n d_n < +\infty$.

2. Dato che

$$|c_n| = \left| \sum_{k=1}^n a_k b_{n-k} \right| \leq \sum_{k=1}^n |a_k| |b_{n-k}| = d_n$$

per il criterio del confronto otteniamo che $\sum_n |c_n| < +\infty$, cioè $\sum_n c_n$ è assolutamente convergente (dunque convergente). Quindi esiste un s in \mathbb{C} tale che $s_n \rightarrow s$.

3. Mostriamo che $s = s' s''$. Si ha

$$\begin{aligned} |s'_n s''_n - s_n| &= \left| \sum_{i,j \leq n} a_i b_j - \sum_{i+j \leq n} a_i b_j \right| = \left| \sum_{i,j \leq n, i+j > n} a_i b_j \right| \leq \\ &\sum_{i,j \leq n, i+j > n} |a_i| |b_j| \leq \sum_{n < i+j \leq 2n} |a_i| |b_j| = t_{2n} - t_n \leq \sum_{k=1}^{\infty} d_k - t_n \end{aligned}$$

Dato che $t_n \rightarrow \sum_k d_k$ si ha che $|s'_n s''_n - s_n| \rightarrow 0$ e dunque $s = s' s''$.

□

Concludiamo con una osservazione molto semplice, che però può essere utile.

1.2.12 Osservazione. Se $a : [1, +\infty[\rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione allora $([x])$ indica la *parte intera* del numero x)

$$\sum_{n=0}^{\infty} a(n) = \int_1^{\infty} a([x]) dx$$

1.3 Numeri complessi

Ricordiamo che i numeri complessi sono espressioni del tipo $x + iy$, con $x, y \in \mathbb{R}$. I numeri complessi si possono sommare e moltiplicare tra loro tenendo presente che $(i)^2 = -1$. Si ha cioè:

$$\begin{aligned} (x' + iy') + (x'' + iy'') &= (x' + x'') + i(y' + y''), \\ (x' + iy')(x'' + iy'') &= x'x'' + i(x'y'' + x''y') + (i)^2 y'y'' = \\ &= x'x'' - y'y'' + i(x'y'' + x''y'). \end{aligned}$$

L'insieme dei numeri complessi verrà indicato con \mathbb{C} . Se $z = x + iy$ si scrive

$$x = \Re(z) \text{ (parte reale di } z), \quad y = \Im(z) \text{ (parte immaginaria di } z),$$

(si noti che la parte immaginaria è un numero reale); si definisce il *coniugato* di z , indicato con \bar{z} , ponendo $\bar{z} := x - iy$. In questo modo

$$\Re(z) = \frac{z + \bar{z}}{2}, \quad \Im(z) = \frac{z - \bar{z}}{2i}.$$

Sempre se $z = x + iy$ si definisce il *modulo* di z , indicato con $|z|$, ponendo $|z| := \sqrt{x^2 + y^2}$. Si vede facilmente che

$$|z|^2 = z\bar{z}.$$

Si verifica facilmente che:

$$\overline{z' + z''} = \bar{z}' + \bar{z}'', \quad \overline{z'z''} = \bar{z}'\bar{z}'', \quad |z'z''| = |z'||z''|.$$

Come è ben noto si può stabilire una corrispondenza tra i numeri complessi e il piano cartesiano (cioè tra \mathbb{C} ed \mathbb{R}^2) identificando $x + iy$ con (x, y) . Questa identificazione permette di visualizzare l'operazione di somma tra numeri complessi mediante l'usuale somma di punti (o meglio di vettori) fatta con la regola del parallelogramma. Per capire come funziona il prodotto introduciamo la *forma polare* di un numero complesso. Se $z = x + iy$ allora $\left(\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}}, \frac{y}{\sqrt{x^2+y^2}}\right)$ appartiene alla circonferenza unitaria e quindi esiste unico un angolo θ in $[0, 2\pi[$ tale che

$$\cos(\theta) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad \sin(\theta) = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}.$$

Diremo che tale θ è l'*argomento principale* di z - in generale diremo che θ in \mathbb{R} è un argomento di z se verifica la formula sopra e cioè se differisce dall'argomento principale per un multiplo intero relativo di 2π . Scriveremo in ogni caso, con un po' di ambiguità, $\theta = \text{Arg}(z)$ (a rigore $\theta \in \text{Arg}(z)$).

Allora se $z', z'' \in \mathbb{C}$, e se $z = z'z''$ si ha

$$\text{Arg}(z) = \text{Arg}(z') + \text{Arg}(z'').$$

(ciò significa che θ è un argomento di z se e solo se $\theta = \theta' + \theta''$ per θ' argomento di z' e θ'' argomento di z'').

In sostanza, mentre il modulo del prodotto è la somma dei moduli, l'argomento del prodotto è la somma degli argomenti. Queste due proprietà giustificano la definizione di esponenziale complesso.

1.3.1 Definizione. Se $z = x + iy$ si definisce

$$e^z := e^x(\cos(y) + i \sin(y))$$

Si vede facilmente che l'esponenziale complesso coincide con quello tradizionale quando $z \in \mathbb{R}$ (cioè se $y = 0$) e che

$$e^{z'+z''} = e^{z'}e^{z''} \quad \forall z', z'' \in \mathbb{C}.$$

Con l'introduzione dell'esponenziale complesso si può scrivere

$$z = \rho e^{i\theta} \Leftrightarrow \rho = |z|, \theta = \text{Arg}(z).$$

Si può anche notare che $\overline{e^{i\theta}} = e^{-i\theta}$ e che

$$\cos(\theta) = \Re(e^{i\theta}) = \frac{e^{i\theta} + e^{-i\theta}}{2}, \quad \sin(\theta) = \Im(e^{i\theta}) = \frac{e^{i\theta} - e^{-i\theta}}{2i}$$

(formule che useremo spesso nel seguito).

Osserviamo infine che la corrispondenza tra \mathbb{C} ed \mathbb{R}^2 permette di definire le nozioni di limite e di continuità per funzioni definite su \mathbb{C} o a valori in \mathbb{C} . Si verifica facilmente che vale il fatto seguente.

1.3.2 Proposizione. *Se $\rho_n \rightarrow \rho$ e $\theta_n \rightarrow \theta$ allora $\rho_n e^{i\theta_n} \rightarrow \rho e^{i\theta}$.*

1.3.3 Esempio. Dato z in \mathbb{C} definiamo la successione (z_n) in \mathbb{C} ponendo

$$z_n := \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n.$$

Dimostriamo che $z_n \rightarrow e^z$. Scriviamo $z = x + iy$ Allora

$$\begin{aligned} |z_n|^2 = z_n \overline{z_n} &= \left(1 + \frac{x + iy}{n}\right)^n \left(1 + \frac{x - iy}{n}\right)^n = \left(1 + \frac{2x}{n} + \frac{x^2 + y^2}{n^2}\right)^n = \\ &= e^{n \ln\left(1 + \frac{2x}{n} + \frac{x^2 + y^2}{n^2}\right)} = e^{n\left(\frac{2x}{n} + \frac{x^2 + y^2}{n^2} + o\left(\frac{2x}{n} + \frac{x^2 + y^2}{n^2}\right)\right)} = \\ &= e^{n\left(\frac{2x}{n} + o\left(\frac{1}{n}\right)\right)} = e^{2x + o(1)} \rightarrow e^{2x}. \end{aligned}$$

(si è sfruttata la formula di Taylor $\ln(1 + t) = t + o(t)$). Quindi passando alla radice

$$|z_n| \rightarrow e^x.$$

Cerchiamo un argomento θ_n per z_n ; osserviamo che l'argomento principale di $1 + \frac{z}{n} = 1 + \frac{x}{n} + i\frac{y}{n}$ è pari a $\arctan\left(\frac{y/n}{1 + x/n}\right)$ e quindi, passando alla potenza n -esima, possiamo prendere

$$\begin{aligned} \theta_n = n \arctan\left(\frac{y/n}{1 + x/n}\right) &= n\left(\frac{y/n}{1 + x/n} + o\left(\frac{y/n}{1 + x/n}\right)\right) = \\ &= \frac{y}{1 + x/n} + o(1) \rightarrow y \end{aligned}$$

(perché $\arctan(t) = t + o(t)$). In definitiva:

$$z_n = |z_n| e_n^{i\theta} \rightarrow e^x e^{iy} = e^z.$$

Capitolo 2

Successioni e serie di funzioni

2.1 Convergenza puntuale e uniforme

Supponiamo che A sia un sottoinsieme di \mathbb{R}^N e supponiamo che per ogni intero n sia data una funzione $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}^M$. Diremo in questo caso che (f_n) è una successione di funzioni da A in \mathbb{R}^M . In quanto segue, per visualizzare le definizioni, si consiglia di pensare inizialmente al caso $N = M = 1$.

2.1.1 Definizione. Diciamo che la successione (f_n) converge puntualmente in un punto x_0 di A se esiste il limite $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$. Diciamo che (f_n) converge puntualmente su A se (f_n) converge puntualmente in ogni x_0 di A . È chiaro che in quest'ultimo caso siamo autorizzati a considerare la funzione $f : A \rightarrow \mathbb{R}^M$ definita da

$$f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$$

e potremo quindi dire che (f_n) converge puntualmente a f (in forma abbreviata scriveremo $f_n \rightarrow f$ puntualmente o anche $f_n \xrightarrow{\text{punct}} f$).

2.1.2 Definizione. Data la successione di funzioni (f_n) e una funzione $f : A \rightarrow \mathbb{R}^M$ diciamo che f_n converge uniformemente su A a f se si ha:

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \bar{n} : \forall n \geq \bar{n}, \forall x \in A \quad |f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon.$$

Se introduciamo la *norma uniforme* di una funzione f (sull'insieme A) mediante

$$\|f\|_\infty = \|f\|_{\infty, A} := \sup_{x \in A} |f(x)|$$

allora la convergenza uniforme si può esprimere dicendo che f_n converge uniformemente a f se e solo se

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0.$$

Per indicare che f_n converge uniformemente a f , useremo la notazione $f_n \rightarrow f$ uniformemente (su A), o anche $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$ (su A).

Notiamo che l'espressione introdotta sopra, che abbiamo chiamato norma, non è necessariamente finita (può essere $+\infty$). Essa è finita se e solo se f è limitata su A , per esempio se A è chiuso e limitato in \mathbb{R}^N e f è continua. Vedremo le motivazioni del termine "norma" nei prossimi paragrafi.

È comunque vero in ogni caso che se $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$ $\|f_n - f\|$ **deve** essere finito e tendere a zero.

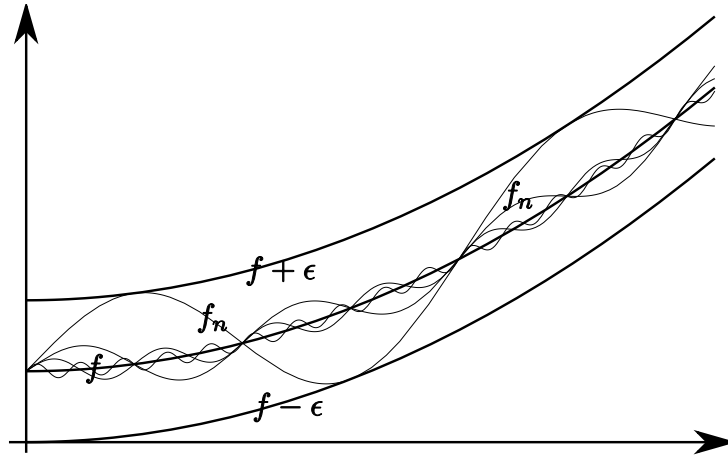


Figura 2.1: convergenza uniforme

2.1.3 Osservazione. Un modo di visualizzare la convergenza uniforme è di dire che, per ogni $\varepsilon > 0$, il grafico delle f_n è *definitivamente* compreso tra il grafico di $f - \varepsilon$ e quello di $f + \varepsilon$ (vedi figura 2.1).

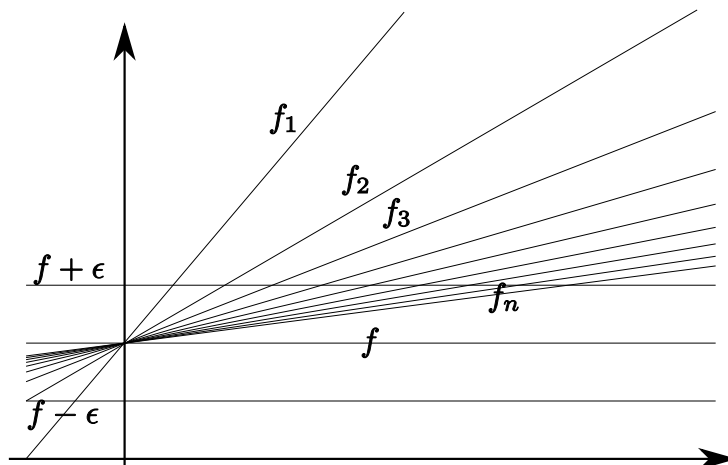
La seguente proprietà è una semplice conseguenza delle definizioni.

2.1.4 Proposizione. Se f_n converge uniformemente a f su A , allora f_n converge puntualmente su A .

La proposizione precedente dice che se f_n converge uniformemente a qualcosa, questo qualcosa deve essere il limite puntuale delle f_n : il limite puntuale **individua** il candidato limite uniforme.

La proposizione non è invertibile come mostrano i vari esempi che seguono.

2.1.5 Esempio. Consideriamo $f_n(x) = 1 + \frac{x}{n}$. Si vede subito che, dato x in \mathbb{R} , $f_n(x) \rightarrow 1$ e dunque f_n converge puntualmente su \mathbb{R} alla funzione f che vale costantemente 1. Si vede abbastanza facilmente però che f_n non converge uniformemente su \mathbb{R} a f . Si vede infatti che non c'è nessun intero n per cui il grafico di f_n è *tutto* tra il grafico di $f - \varepsilon$ e quello di $f + \varepsilon$ dato che ogni retta di equazione $y = 1 + \frac{x}{n}$ va all'infinito e quindi supera $1 + \varepsilon$ per x abbastanza grande (vedi figura 2.2).

Figura 2.2: $f_n(x) = 1 + \frac{x}{n}$

In particolare $\|f_n - f\|_\infty = +\infty$ e dunque non è possibile che $\|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0$. In sostanza, anche se a x fissato $f_n(x) \rightarrow 1$, la *velocità di convergenza* dipende da x (e peggiora tanto più x è grande) e non è quindi *uniforme* rispetto a x .

Notiamo che se invece di prendere le f_n su tutto \mathbb{R} consideriamo $A := [0, 1]$ (o un qualunque intervallo limitato), allora $f_n \xrightarrow{\text{unif}} 1$ su A . Infatti

$$\|f_n - 1\|_{\infty, [0,1]} = \sup_{0 \leq x \leq 1} |1 + x/n - 1| = \max_{0 \leq x \leq 1} x/n = \frac{1}{n} \rightarrow 0$$

Dunque le f_n non convergono uniformemente a 1 su \mathbb{R} ma convergono uniformemente a 1 su ogni intervallo $[a, b]$.

2.1.6 Esempio. Consideriamo $f_n(x) := e^{-nx}$ definite su $A := [0, +\infty[$ (vedi la figura 2.3).

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x > 0 \\ 1 & \text{se } x = 0 \end{cases}$$

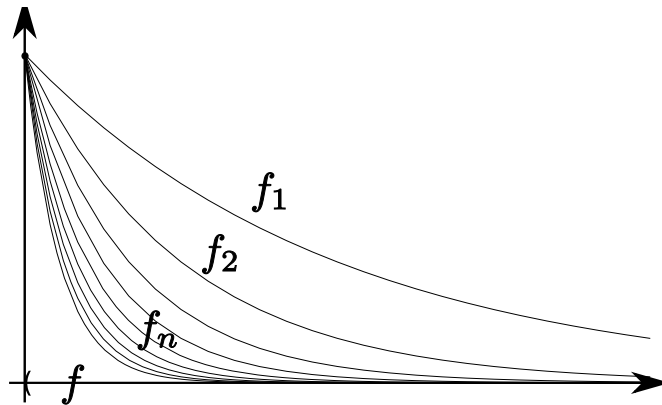


Figura 2.3: $f_n(x) = e^{-nx}$

cioè f_n converge puntualmente alla funzione f che vale zero su $]0, +\infty[$ e vale uno in zero. Però f_n non converge uniformemente a f in quanto, per ogni n

$$\|f_n - f\|_{\infty} = \sup_{x \geq 0} |e^{-nx} - f(x)| = \sup_{x > 0} |e^{-nx}| = 1$$

che non tende a zero. Notiamo che le f_n sono tutte funzioni continue mentre il loro limite puntuale f non è continua in 0 dato che $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = 0 \neq f(0) = 1$. Quindi

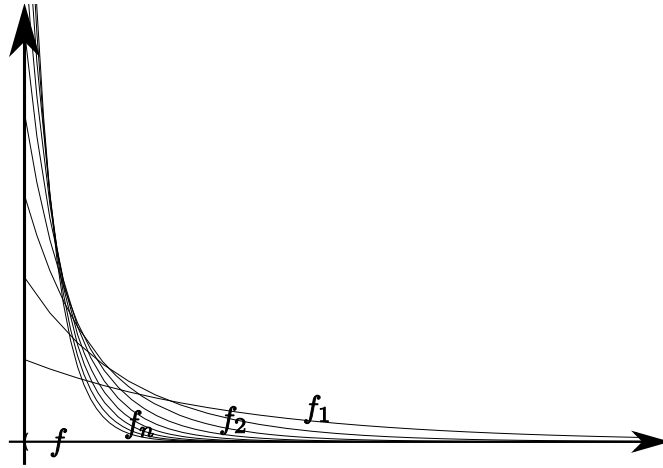
$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \lim_{n \rightarrow +\infty} f_n(x) = \lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) (= 0) \neq \lim_{n \rightarrow +\infty} \lim_{x \rightarrow 0^+} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} 1 (= 1)$$

2.1.7 Esempio. Consideriamo $f_n(x) := ne^{-nx}$ definite su $A :=]0, +\infty[$ (vedi la figura 2.4). Anche in questo caso $f_n(x) \rightarrow 0$ per ogni $x > 0$ (anche se c'è un n a moltiplicare l'esponenziale e^{-nx} "vince"); notiamo che non abbiamo messo lo zero in A (altrimenti $f_n(0) \rightarrow +\infty$). Quindi le f_n tendono puntualmente a zero su A . Anche stavolta la convergenza non è uniforme, si vede infatti che, per ogni n

$$\|f_n - 0\|_{\infty} = \sup_{x > 0} |ne^{-nx}| = n$$

che addirittura tende all'infinito. Notiamo che

$$\int_0^{+\infty} f_n(x) dx = \int_0^{+\infty} ne^{-nx} dx = \int_0^{+\infty} e^{-y} dy = 1$$

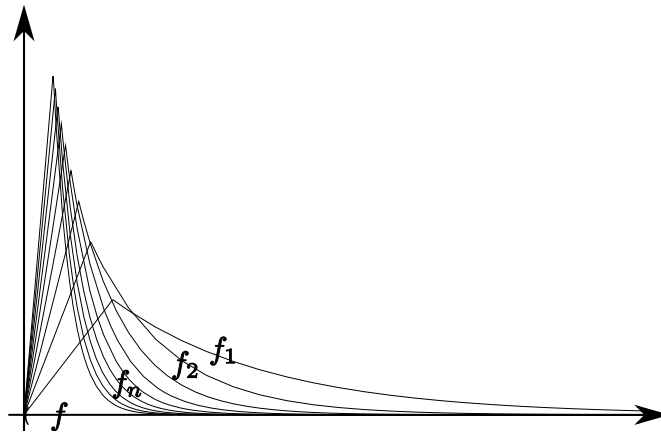
Figura 2.4: $f_n(x) = ne^{-nx}$

e quindi l'integrale delle f_n non tende all'integrale della funzione limite (che sarebbe zero).

Si potrebbe ritenere che questo dipenda dal fatto che A è un intervallo aperto, oppure che A non è limitato. In realtà, con un po' di pazienza, si può costruire un esempio analogo su $[0, 1]$; prendiamo infatti $g_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ definita da

$$g_n(x) := \begin{cases} ne^{-nx} & \text{se } x \in [\frac{1}{n}, 1] \\ \frac{n^2}{e}x & \text{se } x \in [0, \frac{1}{n}] \end{cases}$$

(vedi la figura 2.5).

Figura 2.5: $g_n(x)$

Come prima, per x fissato, $g_n(x) \rightarrow 0$. Infatti se $x = 0$ $g_n(0) = 0 \rightarrow 0$, mentre se $x > 0$ per n grande $g_n(x) = f_n(x) \rightarrow 0$. D'altra parte

$$\begin{aligned} \int_0^1 g_n(x) dx &= \int_0^{1/n} ne^{-nx} dx + \int_{1/n}^1 ne^{-nx} dx = \\ & \left[ne^{-1} \frac{x^2}{2} \right]_0^{1/n} + \left[n \frac{e^{-nx}}{-n} \right]_{1/n}^1 = \frac{e^{-1}}{2n} - e^{-n} + e^{-1} \rightarrow e^{-1} \neq 0 \end{aligned}$$

e quindi di nuovo l'integrale delle g_n non tende all'integrale del limite puntuale (che sarebbe zero).

Questi esempi mostrano che la convergenza puntuale *non va d'accordo* coi limiti e con gli integrali. Mostriamo ora che, al contrario, la convergenza uniforme si comporta bene.

2.1.8 Teorema. *Siano $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}^M$, $f : A \rightarrow \mathbb{R}^M$ e supponiamo che $f_n \rightarrow f$ uniformemente in A . Sia x_0 un punto di accumulazione per A e supponiamo che per ogni n esista $\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x)$ che indichiamo con l_n . Allora*

1. esiste $l = \lim_{n \rightarrow \infty} l_n$;
2. si ha che $\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = l$

In sostanza si può dire che

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x)$$

Dimostrazione. Per prima cosa dimostriamo che gli l_n hanno limite. Per questo mostreremo che la successione (l_n) verifica la proprietà di Cauchy. Fissiamo n e m ; dato che, per ogni x di A

$$|f_n(x) - f_m(x)| \leq \|f_n - f_m\|_\infty$$

facendo tendere x a x_0 si ottiene:

$$|l_n - l_m| \leq \|f_n - f_m\|_\infty.$$

Siccome $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$, cioè $\|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0$, è chiaro che per ogni $\varepsilon > 0$ esiste \bar{n} tale che, se $n, m \geq \bar{n}$, si ha $\|f_n - f_m\|_\infty \leq \|f_n - f\|_\infty + \|f - f_m\|_\infty \leq \varepsilon$. Dalla disuguaglianza sopra segue allora che (l_n) è di Cauchy.

Dunque possiamo trovare un l in \mathbb{R}^M tale che $l_n \rightarrow l$.

Mostriamo ora che $f(x) \rightarrow l$ per $x \rightarrow x_0$. Per questo prendiamo una successione (x_k) in A , con $x_k \rightarrow x_0$ e mostriamo che $f(x_k) \rightarrow l$ per $k \rightarrow \infty$. Dato $\varepsilon > 0$ possiamo trovare \bar{n} tale che per tutti gli $n \geq \bar{n}$ si ha:

$$\|f_n - f\|_\infty \leq \frac{\varepsilon}{3} \quad \text{e} \quad |l_n - l| \leq \frac{\varepsilon}{3}$$

Fissiamo ora un $n_0 \geq \bar{n}$ (per esempio lo stesso \bar{n}); dato che $f_{n_0}(x_k) \rightarrow l_{n_0}$, possiamo trovare \bar{k} tale che

$$|f_{n_0}(x_k) - l_{n_0}| \leq \frac{\varepsilon}{3} \quad \forall k \geq \bar{k}.$$

Prendiamo allora $k \geq \bar{k}$; si ha:

$$\begin{aligned} |f(x_k) - l| &\leq |f(x_k) - f_{n_0}(x_k)| + |f_{n_0}(x_k) - l_{n_0}| + |l_{n_0} - l| \leq \\ &\|f - f_{n_0}\| + |f_{n_0}(x_k) - l_{n_0}| + |l_{n_0} - l| \leq \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon. \end{aligned}$$

Essendo ε arbitrario abbiamo dimostrato che $f(x_k) \rightarrow l$, cioè la tesi. \square

Come conseguenza ricaviamo subito il seguente risultato

2.1.9 Teorema. *Siano (f_n) ed f tali che $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$ su A e sia $x_0 \in A$. Se tutte le f_n sono continue in x_0 , allora f è continua in x_0 . Se ne ricava che se le f_n sono continue su A , anche la f è continua su A .*

Dimostrazione. Basta notare che per ogni n $\lim_{x \rightarrow x_0} f_n(x) = f_n(x_0)$ e applicare il teorema precedente con $l_n = f_n(x_0)$. \square

2.1.10 Teorema. Siano (f_n) ed f tali che $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$ su A , supponiamo che le f_n e la f siano integrabili su A e che la misura (o volume) di A (che indichiamo con $|A|$) sia finita. Allora

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_A f_n(x) dx = \int_A f(x) dx$$

Dimostrazione. Si ha:

$$\begin{aligned} \left| \int_A f_n(x) dx - \int_A f(x) dx \right| &= \left| \int_A (f_n(x) - f(x)) dx \right| \leq \\ &\int_A |f_n(x) - f(x)| dx \leq \int_A \|f_n - f\|_\infty dx = |A| \|f_n - f\|_\infty \rightarrow 0 \end{aligned}$$

□

2.1.11 Esempio. Contrariamente all'integrazione l'operazione di derivata *non va d'accordo* con la convergenza uniforme. Per esempio se consideriamo le funzioni $f_n : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ definite da:

$$f_n(x) = \begin{cases} |x| & \text{se } |x| \geq \frac{1}{n} \\ \frac{n}{2}x^2 + \frac{1}{2n} & \text{se } |x| \leq \frac{1}{n} \end{cases}$$

(vedi la figura 2.6)

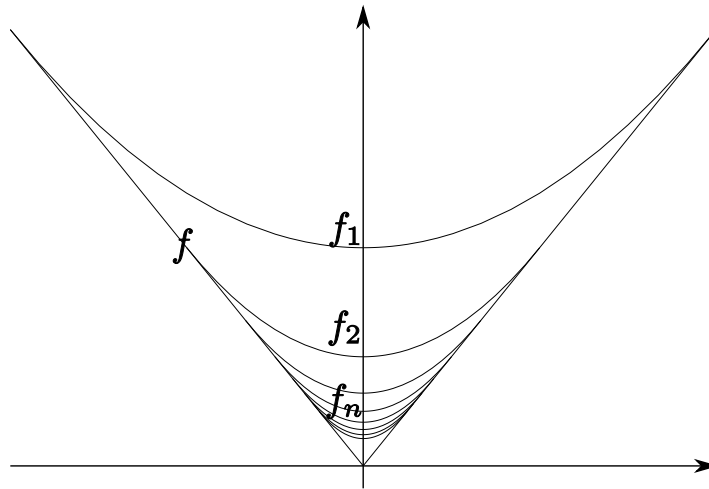


Figura 2.6: approssimazioni derivabili di $|x|$

si vede che f_n è derivabile e che

$$f'_n(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \geq \frac{1}{n} \\ n & \text{se } |x| \leq \frac{1}{n} \\ -1 & \text{se } x \leq -\frac{1}{n} \end{cases}$$

Non è difficile verificare che $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$, dove $f(x) = |x|$ ed è chiaro che f non è derivabile in zero. Quindi è possibile che funzioni derivabili convergano ad una non derivabile. Vale però il seguente risultato.

2.1.12 Teorema. *Supponiamo che I sia un intervallo in \mathbb{R} e che $f_n : I \rightarrow \mathbb{R}$ sia una successione di funzioni derivabili su I con derivata f'_n continua su I . Supponiamo che ci siano due funzioni $f, g : I \rightarrow \mathbb{R}$ per cui:*

$$f_n \rightarrow f \quad \text{puntualmente} \quad f'_n \rightarrow g \quad \text{uniformemente}$$

(ne segue che g è continua). Allora f è derivabile e $f' = g$.

Dimostrazione. Siano x_0 e x due punti in I . Allora per il teorema del calcolo integrale:

$$f_n(x) - f_n(x_0) = \int_{x_0}^x f'_n(t) dt$$

Se facciamo tendere n all'infinito $f_n(x_0) \rightarrow f(x_0)$ e $f_n(x) \rightarrow f(x)$, per la convergenza puntuale di f_n a f . D'altra parte per la convergenza uniforme delle f'_n a g e per il teorema (2.1.10) si ha che:

$$\int_{x_0}^x f'_n(t) dt \rightarrow \int_{x_0}^x g(t) dt$$

e quindi l'eguaglianza sopra passa al limite:

$$f(x) - f(x_0) = \int_{x_0}^x g(t) dt \quad \forall x \text{ in } I$$

Di nuovo per il teorema fondamentale del calcolo questo implica $f' = g$. □

2.2 Spazi vettoriali, convergenza e completezza

2.2.1 Definizione. Un insieme \mathbb{X} si dice uno spazio vettoriale su \mathbb{R} (rispettivamente su \mathbb{C}) se per ogni x_1 e x_2 in \mathbb{X} risulta definita in \mathbb{X} la *somma* $x_1 + x_2$ dei due *vettori* x_1 e x_2 , per ogni x in \mathbb{X} e ogni c in \mathbb{R} (risp. in \mathbb{C}) risulta definito cx in \mathbb{X} , detto *prodotto* del vettore x per lo *scalare* c , di modo che le due operazioni così introdotte verificano le usuali proprietà:¹

2.2.2 Definizione. Dati x_1, \dots, x_n in \mathbb{X} si chiama *combinazione lineare* di x_1, \dots, x_n un'espressione del tipo $c_1x_1 + \dots + c_Nx_n$ dove i *coefficienti* c_1, \dots, c_N sono in \mathbb{R} (risp. in \mathbb{C}). Si dice che x_1, \dots, x_n sono *linearmente dipendenti* se esiste una combinazione lineare nulla fatta con dei coefficienti non identicamente nulli (cioè se $\exists(c_1, \dots, c_n) \neq (0, \dots, 0)$ tali che $c_1x_1 + \dots + c_Nx_n = 0$). Si dice che x_1, \dots, x_n sono *linearmente indipendenti* se ciò non è vero, cioè se ogni combinazione lineare nulla deve avere tutti i coefficienti eguali a zero.

Si dice che x_1, \dots, x_n è una base per \mathbb{X} se x_1, \dots, x_n sono linearmente indipendenti e *generano* \mathbb{X} ; con quest'ultima espressione intendiamo che ogni x di \mathbb{X} si può scrivere come combinazione lineare di x_1, \dots, x_n , in altri termini $x = c_1x_1 + \dots + c_Nx_n$ per opportuni c_1, \dots, c_N .

2.2.3 Osservazione. È semplice verificare che se esiste una base per \mathbb{X} fatta di N vettori, allora

- se $M > N$ presi comunque x_1, \dots, x_M in \mathbb{X} , essi sono linearmente dipendenti;
- per ogni x in \mathbb{X} c'è un'*unica* combinazione lineare dei vettori della base che genera x .

2.2.4 Definizione. Diciamo che \mathbb{X} ha dimensione N se esiste una base per \mathbb{X} fatta di N vettori. Diciamo che \mathbb{X} ha dimensione infinita se ciò non è vero per nessun N , cioè se non è possibile trovare una base formata da un numero finito di vettori di \mathbb{X} .

L'esempio tipico di spazio vettoriale di dimensione N è lo spazio \mathbb{R}^N , che può essere assunto come "prototipo" di tutti. Si vede facilmente che \mathbb{R}^N è uno spazio vettoriale di dimensione N e che una sua base si ottiene per esempio prendendo i *versori* $\hat{e}_1, \dots, \hat{e}_N$ definiti da $\hat{e}_1 := (1, 0, \dots, 0)$, $\hat{e}_2 := (0, 1, \dots, 0)$, \dots , $\hat{e}_N := (0, 0, \dots, 1)$. In questo modo il vettore $x = (x_1, \dots, x_N)$ si rappresenta univocamente come $x = x_1\hat{e}_1 + \dots + x_N\hat{e}_N$.

Vediamo ora che si possono considerare spazi vettoriali i cui elementi sono delle funzioni. Dato A sottoinsieme di \mathbb{R}^N poniamo

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(A, \mathbb{R}^M) &:= \{f : A \rightarrow \mathbb{R}^M\}, \\ \mathcal{B}(A, \mathbb{R}^M) &:= \{f : A \rightarrow \mathbb{R}^M : |f| \text{ è limitata su } A\}, \\ \mathcal{C}^0(A, \mathbb{R}^M) &:= \{f : A \rightarrow \mathbb{R}^M : f \text{ è continua su } A\}\end{aligned}$$

¹tali proprietà sono

la commutativa: per ogni x_1 e x_2 in \mathbb{X} $x_1 + x_2 = x_2 + x_1$;

l'associativa: per ogni x_1, x_2 e x_3 in \mathbb{X} $(x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3)$;

l'esistenza dell'elemento neutro: esiste $\mathbf{0}$ tale che per ogni x in \mathbb{X} $x + \mathbf{0} = x$;

l'esistenza dell'opposto: per ogni x in \mathbb{X} esiste $-x$ in \mathbb{X} per cui $x + (-x) = \mathbf{0}$;

la distributiva: per ogni c in \mathbb{R} (risp. in \mathbb{C}) e ogni x_1, x_2 in \mathbb{X} $c(x_1 + x_2) = cx_1 + cx_2$;

la neutralità di 1: per ogni x in \mathbb{X} $1x = x$

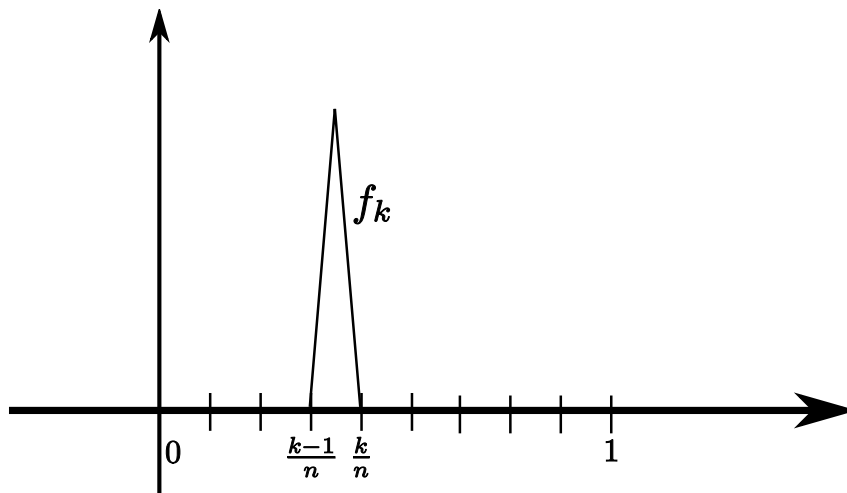


Figura 2.7: funzioni linearmente indipendenti in C^0

Nel caso in cui $M = 1$, scriviamo più semplicemente $\mathcal{F}(A)$, $\mathcal{B}(A)$ e $C^0(A)$. Chiaramente $\mathcal{B}(A, \mathbb{R}^M) \subset \mathcal{F}(A, \mathbb{R}^M)$; se poi A è limitato e chiuso allora, per il teorema di Weierstrass, $C^0(A, \mathbb{R}^M) \subset \mathcal{B}(A, \mathbb{R}^M)$.

È evidente che si tratta di spazi vettoriali su \mathbb{R} , dato che, se $f_1, f_2 : A \rightarrow \mathbb{R}^M$ è ben definita $f_1 + f_2$ ponendo $(f_1 + f_2)(x) := f_1(x) + f_2(x)$ per ogni x in A e analogamente se $f : A \rightarrow \mathbb{R}^M$, $c \in \mathbb{R}$ è ben definita cf ponendo $(cf)(x) := cf(x)$. Inoltre è chiaro che la combinazione lineare di funzioni limitate (risp. continue) è una funzione limitata (risp. continua). Notiamo che in tutti questi spazi l'elemento zero è la funzione identicamente nulla, cioè $\mathbf{0}(x) = 0$ per ogni x in A .

Analogamente si potrebbero definire degli analoghi spazi di funzioni a valori in \mathbb{C}^M , che risultano evidentemente spazi vettoriali su \mathbb{C} .

Gli spazi di funzione sopra introdotti hanno tutti **dimensione infinita**.

2.2.5 Esempio. Mostriamo un esempio che $C^0([0, 1])$ ha dimensione infinita. Per questo facciamo vedere che preso comunque n intero si possono trovare n elementi di $C^0([0, 1])$ che sono linearmente indipendenti. A questo scopo dividiamo l'intervallo $[0, 1]$ in n sottointervalli I_1, \dots, I_n ponendo $I_k := [\frac{k-1}{n}, \frac{k}{n}]$, per $k = 1, \dots, n$ e consideriamo delle funzioni continue f_1, \dots, f_n tali che $f_k(x) = 0$ se $x \notin I_k$, mentre $f_k(x_k) = 1$, dove x_k è il punto medio di I_k ($x_k = \frac{k-1}{n} + \frac{1}{2n}$). Un esempio di funzioni del genere è rappresentato nelle figura 2.7.

Se ora c_1, \dots, c_n sono dei coefficienti reali tali che $c_1 f_1 + \dots + c_n f_n = \mathbf{0}$ allora $c_1 f_1(x) + \dots + c_n f_n(x) = 0$ per ogni x in $[0, 1]$. Scegliendo $x = x_1$ si trova $c_1 \cdot 1 + c_2 \cdot 0 + \dots + c_n \cdot 0 = 0$, da cui $c_1 = 0$. Analogamente prendendo $x = x_k$ si deduce $c_k = 0$ per ogni $k = 1, \dots, n$ e dunque f_1, \dots, f_n sono linearmente indipendenti.

2.2.6 Definizione. Sia dato uno spazio vettoriale \mathbb{X} . Chiameremo *norma* (o modulo) in \mathbb{X} una applicazione da \mathbb{X} in \mathbb{R} con le proprietà seguenti: se indichiamo con $\|x\|$ la norma del vettore x , allora deve essere

1. $\|x\| \geq 0$ per ogni x e $\|x\| = 0$ se e solo se $x = 0$;
2. $\|cx\| = |c|\|x\|$ per ogni vettore x e ogni scalare c ;
3. $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$ per ogni coppia di vettori x e y .

Se in \mathbb{X} è definita una norma si dice che \mathbb{X} è una *spazio normato*. A volte, quando sia necessario distinguere tra norme in spazi diversi, indicheremo la norma di un vettore x di

\mathbb{X} con $\|x\|_{\mathbb{X}}$.

Notiamo che la seconda proprietà implica $\| -x \| = \|x\|$.

Per il resto del capitolo supponiamo che \mathbb{X} sia uno spazio normato, dotato di una norma $\| \cdot \|$. Possiamo allora considerare in \mathbb{X} la nozione di limite. Come vedremo, una volta introdotta una norma, le definizioni sono le stesse che si usano in \mathbb{R}^N . Per semplicità ci limiteremo ai limiti di successioni, ma si potrebbe fare lo stesso per i limiti di funzioni.

2.2.7 Definizione. Data una successione (a_n) di punti di \mathbb{X} e dato l in \mathbb{X} diremo che l è il limite di (a_n) per n che tende all'infinito (o anche che (a_n) tende ad l) se

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|a_n - l\| = 0$$

Scriveremo in questo caso

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

o anche in modo più conciso, $a_n \rightarrow a$ ($n \rightarrow +\infty$ viene sottinteso).

2.2.8 Proposizione. *La definizione di limite introdotta sopra verifica le usuali proprietà del limite di successioni di numeri reali. Valgono ad esempio i fatti seguenti che non è difficile dedurre dalla definizione.*

1. Il limite, se esiste, è unico: $a_n \rightarrow l_1, a_n \rightarrow l_2 \Rightarrow l_1 = l_2$.
2. Se (a_n) ha limite allora (a_n) è limitata, cioè $\exists M : \|a_n\| \leq M \forall n$.
3. Se $a_n \rightarrow a, b_n \rightarrow b$ in \mathbb{X} e se $\alpha_n \rightarrow \alpha, \beta_n \rightarrow \beta$ in \mathbb{R} (risp. in \mathbb{C}) allora $\alpha_n a_n + \beta_n b_n \rightarrow \alpha a + \beta b$.

Le proprietà che non si possono trasferire al caso generale sono quelle che dipendono dal \geq (la relazione d'ordine è un concetto essenzialmente unidimensionale). Per esempio i limiti infiniti si fanno solo per le successioni a valori reali.

2.2.9 Esempio. In \mathbb{R}^N il modulo che abbiamo ricordato nel primo paragrafo: $|\mathbf{x}| := \sqrt{x_1^2 + \dots + x_N^2}$, dove $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$, verifica come si vede facilmente le proprietà di una norma. Continueremo a usare la notazione con una barra sola per la modulo (o norma) dei punti di \mathbb{R}^N (imitando il simbolo del *valore assoluto*, che corrisponde alla norma quando $N = 1$) per riservare le due barre a norme in spazi più generali.

La norma appena introdotta non è però l'unica possibile in \mathbb{R}^N . Potremmo ad esempio considerare

$$|\mathbf{x}|_1 := |x_1| + \dots + |x_N|$$

Vediamo che $|\cdot|_1$ è una norma.

1. È evidente che $|\mathbf{x}|_1 \geq 0$. Inoltre $|\mathbf{x}|_1 = 0$ significa $|x_1| + \dots + |x_N| = 0$ che è possibile se e solo se $|x_1| = \dots = |x_N| = 0$, cioè se $\mathbf{x} = 0$.
2. $|c\mathbf{x}|_1 = |cx_1| + \dots + |cx_N| = |c|(|x_1| + \dots + |x_N|) = |c||\mathbf{x}|_1$.
3. $|\mathbf{x} + \mathbf{y}|_1 = |x_1 + y_1| + \dots + |x_N + y_N| \leq |x_1| + |y_1| + \dots + |x_N| + |y_N| = |\mathbf{x}|_1 + |\mathbf{y}|_1$

Dunque anche $|\cdot|_1$ è una norma. Un'altra possibilità è:

$$|\mathbf{x}|_{\infty} := \max\{|x_1|, \dots, |x_N|\}$$

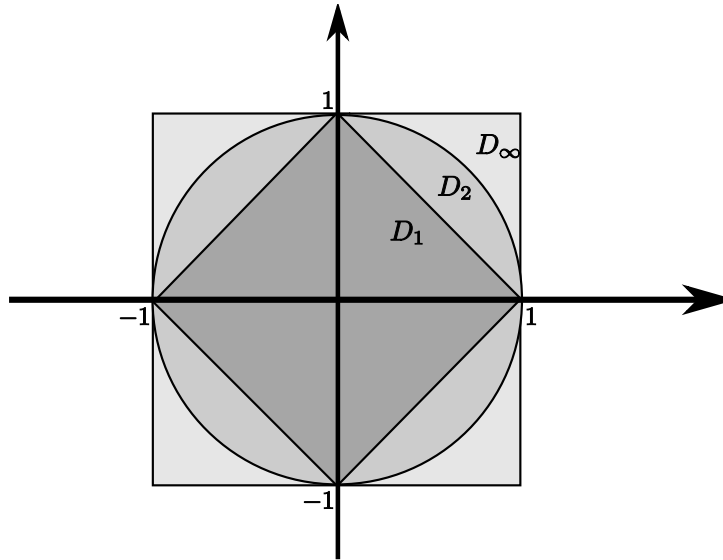


Figura 2.8: Le palle unitarie rispetto a norme diverse

(la notazione con ∞ sarà chiara in seguito). Non è difficile verificare che anche $|\cdot|_\infty$ è una norma.

Notiamo che le tre norme ora introdotte verificano la seguente relazione:

$$|\mathbf{x}|_\infty \leq |\mathbf{x}| \leq |\mathbf{x}|_1 \leq N|\mathbf{x}|_\infty \quad (2.1)$$

come è facile verificare. Ne segue che le *palle* di centro $\mathbf{0}$ e raggio r nelle rispettive norme:

$$D_\infty(r) := \{\mathbf{x} : |\mathbf{x}|_\infty \leq r\}, \quad D(r) := \{\mathbf{x} : |\mathbf{x}| \leq r\}, \quad D_1(r) := \{\mathbf{x} : |\mathbf{x}|_1 \leq r\}$$

verificano le seguenti inclusioni (vedi la figura 2.8):

$$D_1(r) \subset D(r) \subset D_\infty(r) \subset D_1(Nr)$$

La relazione (2.1) implica che la nozione di limite introdotta a partire da una qualunque delle tre norme considerate sopra è *la stessa*. Ciò vuol dire che data una successione (\mathbf{a}_n) di punti di \mathbb{R}^N e un punto \mathbf{a} di \mathbb{R}^N si ha

$$|\mathbf{a}_n - \mathbf{a}| \rightarrow 0 \Leftrightarrow |\mathbf{a}_n - \mathbf{a}|_1 \rightarrow 0 \Leftrightarrow |\mathbf{a}_n - \mathbf{a}|_\infty \rightarrow 0$$

Per esempio il fatto che $|\mathbf{a}_n - \mathbf{a}|_1 \rightarrow 0$ implichi $|\mathbf{a}_n - \mathbf{a}|_\infty \rightarrow 0$ è conseguenza della disuguaglianza $|\mathbf{a}_n - \mathbf{a}|_\infty \leq |\mathbf{a}_n - \mathbf{a}|_1$ e le altre implicazioni seguono in modo analogo.

L'esempio sopra suggerisce la seguente definizione.

2.2.10 Definizione. Due norme $\|\cdot\|_1$ e $\|\cdot\|_2$ su uno stesso spazio vettoriale \mathbb{X} si dicono *equivalenti* se esistono due costanti $0 < M_1 \leq M_2$ tali che

$$M_1\|x\|_1 \leq \|x\|_2 \leq M_2\|x\|_1 \quad \forall x \in \mathbb{X} \quad (2.2)$$

È facile vedere (come fatto sopra) che due norme equivalenti producono la *stessa nozione di limite*.

Si potrebbe dimostrare (con strumenti assai avanzati) il seguente risultato.

2.2.11 Teorema. *Se \mathbb{X} ha dimensione finita **tutte** le norme sono tra loro equivalenti. Quindi negli spazi vettoriali di dimensione finita c'è un' unica possibile nozione di limite (proveniente da una norma).*

Come fatto in \mathbb{R}^N possiamo introdurre la proprietà di Cauchy per successioni in uno spazio vettoriale normato.

2.2.12 Definizione. Sia \mathbb{X} uno spazio vettoriale normato e sia $\|\cdot\|$ la norma. Si dice che una successione (a_n) di punti di \mathbb{X} verifica la proprietà di Cauchy (brevemente (a_n) è di Cauchy) se:

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \bar{n} \in \mathbb{N} \quad \text{tale che } \forall n, m \geq \bar{n} \quad \|a_n - a_m\| \leq \varepsilon.$$

È di nuovo assai facile vedere che se (a_n) ammette limite allora è di Cauchy. A differenza di \mathbb{R}^N il viceversa può non essere vero se si considerano spazi di dimensione infinita. Questo fatto motiva la seguente definizione.

2.2.13 Definizione. Uno spazio vettoriale normato \mathbb{X} si dice *completo* se ogni successione di Cauchy ammette limite.

Con la definizione precedente il teorema 1.1.11 si può enunciare dicendo:

“Gli spazi \mathbb{R}^N sono completi”

Vediamo che in effetti tale proprietà può non essere vera per uno spazio normato arbitrario.

2.2.14 Esempio. Consideriamo $\mathbb{X} = C^0([-1, 1])$ e per ogni f in \mathbb{X} definiamo

$$\|f\|_1 := \int_{-1}^1 |f(t)| dt$$

Mostriamo che $\|\cdot\|_1$ è una norma.

1. Evidentemente $\|f\|_1 \geq 0$ per ogni f in \mathbb{X} ; se poi $\|f\|_1 = 0$ si ha $\int_{-1}^1 |f(t)| dt = 0$ ed essendo $|f| \geq 0$ l'unico modo di rendere nullo l'integrale è di avere $|f(t)| = 0$ per ogni t in $[-1, 1]$, cioè di avere $f = 0$.
2. Se c è uno scalare si ha

$$\|cf\|_1 = \int_{-1}^1 |cf(t)| dt = |c| \int_{-1}^1 |f(t)| dt = |c| \|f\|_1$$

3. Date f e g in \mathbb{X}

$$\|f + g\|_1 = \int_{-1}^1 |f(t) + g(t)| dt \leq \int_{-1}^1 |f(t)| dt + \int_{-1}^1 |g(t)| dt = \|f\|_1 + \|g\|_1$$

Con tale norma abbiamo introdotto una nozione di convergenza tra le funzioni continue: data una successione (f_n) di funzioni continue su $[-1, 1]$ e una f continua su $[-1, 1]$, (f_n) tenderà a f (nel senso della norma $\|\cdot\|_1$) se

$$\int_{-1}^1 |f_n(t) - f(t)| dt \rightarrow 0$$

(cioè se l'area tra il grafico di f_n e quello di f tende a zero). Questa nozione di limite è accettabile ma ha un grave difetto: Lo spazio \mathbb{X} **non è completo** rispetto a questa norma. Per vedere ciò prendiamo la seguente successione:

$$f_n(t) := \begin{cases} -1 & \text{se } -1 \leq t \leq -\frac{1}{n}, \\ nt & \text{se } -\frac{1}{n} \leq t \leq \frac{1}{n}, \\ 1 & \text{se } \frac{1}{n} \leq t \leq 1 \end{cases}$$

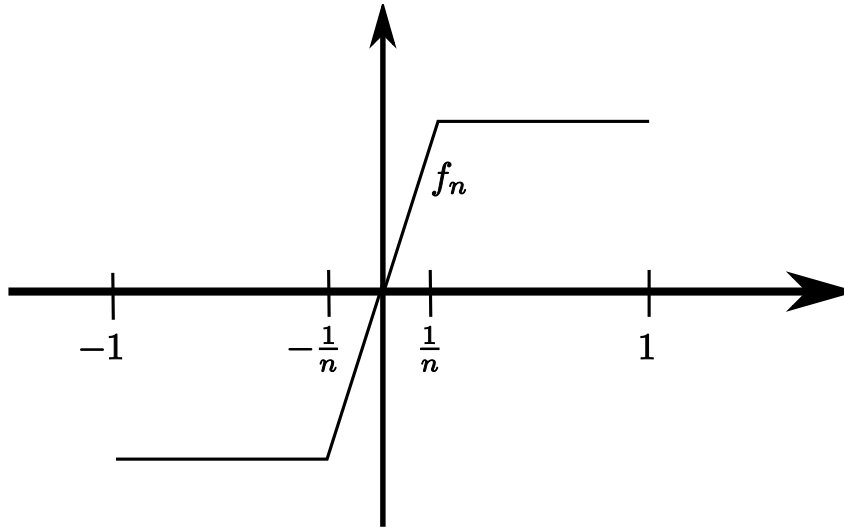


Figura 2.9: incompletezza delle continue con la norma integrale

(vedi la figura 2.2.14).

Dico che (f_n) è di Cauchy, infatti presi due interi $n \geq m$ si ha

$$\|f_n - f_m\| = \int_{-1}^1 |f_n(t) - f_m(t)| dt \leq \int_{-\frac{1}{m}}^{\frac{1}{m}} 1 dt = \frac{2}{m}$$

e dunque per n, m grandi tale espressione può essere resa arbitrariamente piccola. Se mostriamo che (f_n) non ammette limite abbiamo trovato che \mathbb{X} non è completo. Per questo consideriamo prima la funzione g definita da

$$g(t) := \begin{cases} -1 & \text{se } -1 \leq t < 0 \\ 0 & \text{se } t = 0 \\ 1 & \text{se } 0 < t \leq 1 \end{cases}$$

e notiamo che

$$\int_{-1}^1 |f_n(t) - g(t)| dt = \int_{-\frac{1}{n}}^{\frac{1}{n}} 1 dt = \frac{2}{n} \rightarrow 0$$

ma g **non** è una funzione continua. A questo punto supponiamo per assurdo che esista una f in \mathbb{X} tale che $f_n \rightarrow f$. Ne seguirebbe:

$$\int_{-1}^1 |f(t) - g(t)| dt \leq \int_{-1}^1 |f(t) - f_n(t)| dt + \int_{-1}^1 |f_n(t) - g(t)| dt \rightarrow 0$$

da cui $\int_{-1}^1 |f(t) - g(t)| dt = 0$. Ma ciò implicherebbe $f(t) = g(t)$ e questo è assurdo perché f deve essere continua mentre g non lo è.

La completezza dello spazio gioca un ruolo importante nei problemi di convergenza di una serie. Analogamente a quanto fatto nel caso dei numeri reali si possono infatti considerare le serie di elementi di uno spazio vettoriale generico.

2.2.15 Definizione. Sia \mathbb{X} uno spazio vettoriale normato sia $\|\cdot\|$ la sua norma. Data una successione $(a_n)_{n \geq n_0}$ di punti di \mathbb{X} chiamiamo *somma parziale* n -esima l'espressione

$$S_n := \sum_{k=n_0}^n a_k = a_{n_0} + \cdots + a_n$$

(che risulta definita per $n \geq n_0$). La successione $(S_n)_{n \geq n_0}$ si chiama *serie* associata ad $(a_n)_{n \geq n_0}$ o più brevemente serie degli a_n .

Si dice che *la serie è convergente* se $(S_n)_{n \geq n_0}$ ammette limite S in \mathbb{X} . In tal caso diciamo che S è la *somma della serie* e lo indichiamo con

$$\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n.$$

Molto spesso, con un leggero abuso, l'espressione $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ viene usata per indicare la serie oltre che la sua somma, per cui si usa dire: *la serie $\sum_{n=n_0}^{\infty} a_n$ è/ non è convergente*.

Diremo che la serie è *assolutamente convergente* se la serie $\sum_{k=n_0}^{\infty} \|a_k\|$ è convergente.

Notiamo che nel caso delle serie a valori vettoriali non ha senso dire che la serie è divergente.

2.2.16 Teorema (convergenza e convergenza assoluta). *Se \mathbb{X} è completo ogni serie assolutamente convergente è convergente.*

Dimostrazione. Poniamo, per n intero:

$$S_n := \sum_{k=1}^n a_k, \quad T_n := \sum_{k=1}^n \|a_k\|$$

Allora presi due interi qualunque $n \geq m$ si ha:

$$\begin{aligned} \|S_n - S_m\| &= \left\| \sum_{k=1}^m a_k - \sum_{k=1}^m a_k \right\| = \left\| \sum_{k=m+1}^n a_k \right\| \leq \\ & \sum_{k=m+1}^n \|a_k\| = \sum_{k=1}^n \|a_k\| - \sum_{k=1}^m \|a_k\| = |T_n - T_m| \end{aligned}$$

Se ne deduce facilmente che se (T_n) è di Cauchy (in \mathbb{R}), allora (S_n) è di Cauchy (in \mathbb{X}). Infatti dato $\varepsilon > 0$ sia \bar{n} tale che

$$|T_n - T_m| < \varepsilon \quad \forall n, m \geq \bar{n};$$

allora

$$\|S_n - S_m\| \leq |T_n - T_m| < \varepsilon \quad \forall n, m \geq \bar{n}.$$

Possiamo allora concludere la dimostrazione osservando che

$$\sum_{n=1}^{\infty} \|a_n\| \text{ converge in } \mathbb{R} \Rightarrow (T_n) \text{ è di Cauchy in } \mathbb{R} \Rightarrow$$

$$(S_n) \text{ è di Cauchy in } \mathbb{X} \Rightarrow \sum_{n=1}^{\infty} a_n \text{ converge in } \mathbb{X}$$

dove l'ultima implicazione discende dalla completezza di \mathbb{X} . \square

Ricordiamo che in generale non è detto che una serie convergente sia assolutamente convergente (cioè che valga il viceversa del teorema precedente); ciò si può vedere già tra le serie di numeri reali considerando la serie (a segni alterni) $\sum_{n=2}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$ che converge ma non converge assolutamente.

Il criterio della convergenza assoluta è comunque assai utile (se funziona) in quanto permette di ricondursi a studiare la convergenza di una serie di numeri positivi.

2.3 Spazi di funzioni con la norma uniforme

Ricordiamo che abbiamo indicato con $\mathcal{B}(A)$ le funzioni limitate su A e con $\mathcal{C}^0(A)$ le funzioni continue su A (a valori reali) e che, se A è compatto (cioè A è chiuso e limitato in \mathbb{R}^N), allora $\mathcal{C}^0(A) \subset \mathcal{B}(A)$ (per il teorema di Weierstrass). È anche chiaro che per f in $\mathcal{B}(A)$ la norma uniforme di f è finita.

2.3.1 Proposizione. *La norma uniforme $\|\cdot\|_\infty = \|\cdot\|_{\infty,A}$, introdotta in 2.1.2, è una norma su $\mathcal{B}(A)$ (e quindi su $\mathcal{C}^0(A)$). Di conseguenza dire che una successione (f_n) in $\mathcal{B}(A)$ converge a f in $\mathcal{B}(A)$ significa che f_n sono funzioni limitate che convergono uniformemente a una funzione limitata f .*

Inoltre, se A è compatto, $\mathcal{C}^0(A)$ è (un sottospazio) chiuso in $\mathcal{B}(A)$.

Dimostrazione. Il fatto che $\|\cdot\|_\infty$ verifichi le proprietà della norma è una semplice conseguenza delle definizioni. Il fatto che $\mathcal{C}^0(A)$ sia chiuso significa che se (f_n) è una successione di funzioni continue che converge uniformemente a una f , allora f deve essere continua. Questo è esattamente il contenuto del teorema 2.1.9 \square

L'aver introdotto la struttura di spazio normato sulle funzioni limitate/continue permette di inquadrare varie proprietà della convergenza uniforme e di fare altre considerazioni in base alla teoria svolta nel caso astratto, come vedremo meglio nel prossimo paragrafo.

La norma uniforme è la “norma giusta” in $\mathcal{B}(A)$. Vale il seguente risultato (importantissimo).

2.3.2 Teorema. *Lo spazio $\mathcal{B}(A)$ dotato della norma uniforme è completo. Se A è compatto, allora lo spazio $\mathcal{C}^0(A)$ è completo.*

Dimostrazione. Vediamo al dimostrazione per $\mathcal{B}(A)$ (per $\mathcal{C}^0(A)$ si ragiona in modo analogo). Sia (f_n) una successione di Cauchy in $\mathcal{C}^0(A)$. Fissiamo un qualunque x in A ; dato che:

$$|f_n(x) - f_m(x)| \leq \|f_n - f_m\|_\infty \quad (2.3)$$

si vede subito che $(f_n(x))$ è una successione di Cauchy in \mathbb{R} e dunque ammette limite per la completezza di \mathbb{R} . Possiamo indicare con $f(x)$ il limite di $(f_n(x))$. Abbiamo quindi trovato una funzione f a cui (f_n) converge puntualmente: cerchiamo di far vedere che $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$.

Sia $\varepsilon > 0$ e sia \bar{n} tale che per ogni $n \geq \bar{n}$ si abbia $\|f_n - f_m\| \leq \varepsilon$. Allora preso un qualunque x in A e $n \geq \bar{n}$ si ha:

$$|f_n(x) - f(x)| = \lim_{m \rightarrow \infty} |f_n(x) - f_m(x)|$$

che a causa di (2.3) implica

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon$$

ed essendo x arbitrario

$$\|f_n - f\|_\infty \leq \varepsilon.$$

Abbiamo in questo modo verificato la definizione di $f_n \xrightarrow{\text{unif}} f$. \square

2.3.3 Osservazione. Tutto quanto fatto fino ad ora si può ripetere per funzioni a valori in \mathbb{R}^M o anche in \mathbb{C}^M .

2.4 Serie di funzioni

Come abbiamo considerato le successioni di funzioni possiamo considerare le serie. Per questo basterebbe applicare la definizione generale di serie a valori in spazi vettoriali - ripetiamo però tale definizione nel caso in cui gli elementi da sommare siano delle funzioni.

2.4.1 Definizione. Supponiamo che $f_n : A \rightarrow \mathbb{R}$ formino una successione di funzioni. Per ogni intero n chiamiamo somma parziale n -esima relativa a (f_n) la funzione $F_n : A \rightarrow \mathbb{R}$ definita da:

$$F_n(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x)$$

Chiamiamo *serie* di funzioni associata a (f_n) la successione delle somme parziali (F_n) . Diciamo che la serie delle f_n è uniformemente convergente su A se esiste una funzione $F : A \rightarrow \mathbb{R}$ a cui le F_n convergono uniformemente: $F_n \xrightarrow{\text{unif}} F$. In questo caso chiamiamo F *somma* della serie e la indichiamo con

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n \quad \left(\text{e quindi } F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) \quad \forall x \in A \right).$$

Molto spesso si indica con $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ la serie (cioè la successione) oltre che la sua somma.

Quindi si usa dire, con un leggero abuso, che la “serie $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ ” è (o non è) uniformemente convergente.

Rimarchiamo anche in questo caso che se la serie converge uniformemente ($F_n \xrightarrow{\text{unif}} F$), allora essa converge puntualmente ($F_n \xrightarrow{\text{punct}} F$), cioè per ogni x di A la serie numerica $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ è convergente. Si può dire in questo caso che la serie converge puntualmente.

Se le f_n sono funzioni limitate allora la convergenza uniforme della serie di funzioni $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$ non è altro che la convergenza della serie nello spazio normato $\mathcal{B}(A)$. Dato che tale spazio è completo, utilizzando il teorema 2.2.16 si deduce il seguente risultato.

2.4.2 Teorema. *Sia (f_n) una successione di funzioni limitate su A . Se la serie numerica $\sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_{\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \sup_{x \in A} |f_n(x)|$ è convergente, allora la serie delle f_n converge uniformemente su A ad una funzione limitata.*

2.4.3 Osservazione. La proprietà

$$\sum_{n=1}^{\infty} \sup_{x \in A} |f_n(x)| < +\infty$$

(cioè la convergenza assoluta rispetto alla norma uniforme) viene anche chiamata *convergenza totale* della serie di funzioni $\sum_{n=1}^{\infty} f_n$. Il teorema precedente afferma quindi che una serie di funzioni limitate che sia totalmente convergente è uniformemente convergente.

Se poi le f_n sono continue su un insieme compatto, anche la somma della serie è continua e valgono altre conseguenze del tipo di quelle già viste nel paragrafo 2.1.

2.4.4 Corollario. *Sia (f_n) una successione di funzioni in $\mathcal{C}^0(A)$, con A compatto e supponiamo che la serie numerica $\sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_{\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \max_{x \in A} |f_n(x)|$ sia convergente. Allora*

1. $F = \sum_{n=1}^{\infty} f_n$ è una funzione continua.

2. Si ha

$$\int_A F(x) dx = \int_A \left(\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x) \right) dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_A f_n(x) dx$$

3. Se $A = I$ è un intervallo, se le f_n sono tutte derivabili con derivata continua e se anche la serie $\sum_{n=1}^{\infty} \|f'_n\|_{\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} \max_{x \in A} |f'_n(x)|$ è convergente allora F è derivabile e si ha

$$F'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} f'_n(x) \quad \forall x \text{ in } I.$$

Dimostrazione. Per il teorema (2.4.2) la successione delle somme parziali (F_n) converge uniformemente a F e dunque il limite F è una funzione continua (dal teorema (2.1.8)). Inoltre, per il teorema (2.1.10)

$$\begin{aligned} \int_A F(x) dx &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A F_n(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A \left(\sum_{k=1}^n f_k(x) \right) dx = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n \int_A f_k(x) dx = \sum_{k=1}^{\infty} \int_A f_k(x) dx \end{aligned}$$

(l'ultima eguaglianza è solo la definizione della convergenza della serie degli integrali).

Infine l'ipotesi di convergenza della serie $\sum_{n=1}^{\infty} \|f'_n\|_{\infty}$ implica, sempre per il teorema (2.4.2), che la serie delle f'_n è uniformemente convergente. Questo significa che le sue somme parziali $\sum_{k=1}^n f'_k$ convergono uniformemente ad una funzione continua G . Dato che $\sum_{k=1}^n f'_k = F'_n$ abbiamo che $F'_n \xrightarrow{\text{unif}} G$. Per il teorema (2.1.12), ciò implica che F è derivabile e $F' = G$, cioè vale l'ultima affermazione. \square

2.4.5 Esempio. Consideriamo la seguente successione di funzioni $f_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, definite da

$$f_n(x) := \frac{x}{1 + n^2 x^2}.$$

Si vede facilmente che

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f_n(x) = \lim_{x \rightarrow -\infty} f_n(x) = 0, \quad f'_n(x) = \frac{1 - n^2 x^2}{(1 + n^2 x^2)^2}.$$

Quindi il grafico di ogni f_n è quello rappresentato in figura 2.10.

In particolare f_n raggiunge il suo massimo in $x = \frac{1}{n}$ e il massimo di f_n vale $f_n(1/n) = 1/2n$. Dunque

$$\|f_n\|_{\infty, \mathbb{R}} = \sup_{x \in \mathbb{R}} |f_n(x)| = \frac{1}{2n}.$$

e quindi $f_n \xrightarrow{\text{unif}} 0$ (su tutto \mathbb{R}). Consideriamo ora la serie

$$\sum_{n=1}^{\infty} f_n.$$

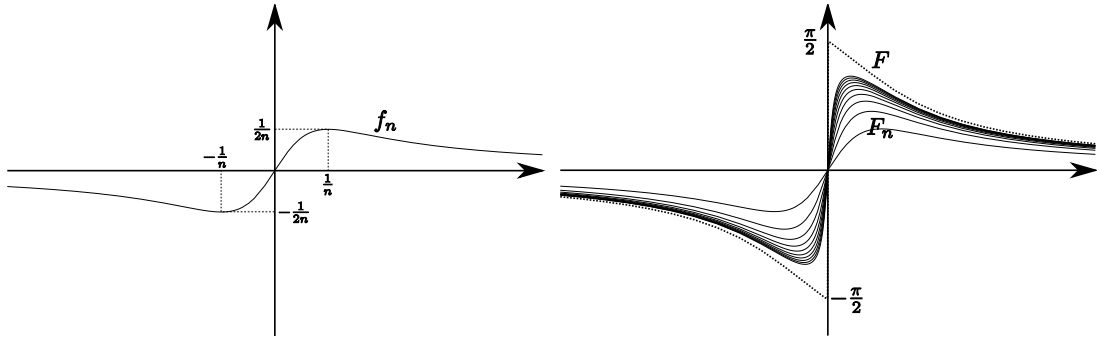


Figura 2.10: $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1+n^2x^2}$

Studiamone la convergenza puntuale: fissato x in \mathbb{R} vediamo se la serie

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1+n^2x^2}$$

è convergente. Questo è vero per ogni x dato che, se $x = 0$ la serie ha tutti i suoi termini nulli, mentre se $x \neq 0$

$$\left| \frac{x}{1+n^2x^2} \right| \leq \frac{|x|}{n^2x^2} \leq \frac{1}{n^2|x|}$$

e quindi la serie converge (dato che la serie $\frac{1}{|x|} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2}$ converge). Dunque ha senso scrivere

$$F(x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1+n^2x^2}$$

(x per x). Notiamo che $F(0) = 0$. Ci possiamo chiedere se F sia continua su tutto \mathbb{R} . Ciò sarebbe sicuramente vero se $\sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_{\infty, \mathbb{R}} < +\infty$; sfortunatamente tale serie diverge essendo eguale a $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n} = +\infty$ e quindi con questo ragionamento non si perviene a nulla. Se però fissiamo un qualunque $a > 0$ e consideriamo $A := [a, +\infty[$, si ha

$$\|f_n\|_{\infty, A} = \sup_{x \geq a} f_n(x) = f_n(a) \quad \text{se } n \geq 1/a.$$

Allora

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_{\infty, A} &= \sum_{n \leq 1/a} \|f_n\|_{\infty, A} + \sum_{n > 1/a} f_n(a) = \\ &= \sum_{n \leq 1/a} \|f_n\|_{\infty, A} + \sum_{n > 1/a} \frac{a}{1+n^2a^2} \leq \sum_{n \leq 1/a} \|f_n\|_{\infty, A} + \frac{1}{a} \sum_{n > 1/a} \frac{1}{n^2} < +\infty. \end{aligned}$$

Applicando il corollario 2.4.4 (in A) otteniamo che la serie converge uniformemente su A e la sua somma F risulta continua su A . Dato che il numero $a > 0$ è arbitrario ne deduciamo che f è continua su $]0, +\infty[$. Analogamente si dimostra che F è continua su $] -\infty, 0[$.

In maniera analoga possiamo dimostrare che F è derivabile su A e quindi è derivabile in ogni $x \neq 0$. Infatti consideriamo la serie delle derivate

$$\sum_{n=1}^{\infty} f'_n, \quad \text{dove } f'_n(x) = \frac{1-n^2x^2}{(1+n^2x^2)^2}.$$

Si ha

$$\|f'_n\|_{\infty, A} = \sup_{x \geq a} \left| \frac{1 - n^2 x^2}{(1 + n^2 x^2)^2} \right| \leq \sup_{x \geq a} \frac{1 + n^2 x^2}{n^4 x^4} \leq \frac{1}{n^4 a^4} + \frac{1}{n^2 a^2}.$$

Dato che $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4 a^4} + \frac{1}{n^2 a^2} < +\infty$ la serie delle derivate è uniformemente convergente su A e quindi tale serie è la derivata di F .

Vediamo che invece F non è continua in zero. Infatti se $0 < x < 1$ si ha ²

$$F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x}{1 + n^2 x^2} \geq \sum_{n=1}^{[1/x]} \frac{x}{1 + n^2 x^2} \geq \sum_{n=1}^{[1/x]} \frac{x}{1 + 1} = \frac{1}{2} x [1/x] \xrightarrow{x \rightarrow 0^+} \frac{1}{2}.$$

Questa disuguaglianza rende impossibile che $F(x) \rightarrow 0 = F(0)$ per $x \rightarrow 0^+$ e quindi F non è continua in zero (almeno da destra - si può anche ripetere lo stesso ragionamento per $x \rightarrow 0^-$).

In verità possiamo essere più precisi. Usando l'osservazione 1.2.12 possiamo scrivere

$$F(x) = \int_1^{+\infty} \frac{x}{1 + [y]^2 x^2} dy \text{ da cui}$$

$$\int_1^{+\infty} \frac{x}{1 + y^2 x^2} dy \leq F(x) \leq \int_1^{+\infty} \frac{x}{1 + (y-1)^2 x^2} dy = \int_0^{+\infty} \frac{x}{1 + y^2 x^2} dy.$$

Sostituendo $t = xy$ si ricava

$$\int_x^{+\infty} \frac{1}{1 + t^2} dt \leq F(x) \leq \int_0^{+\infty} \frac{t}{1 + t^2} dt$$

e facendo tendere x a zero si ricava

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} F(x) = \int_0^{+\infty} \frac{1}{1 + t^2} dt = \frac{\pi}{2}.$$

La figura 2.10 rappresenta le somme parziali fino all'ordine 10 delle f_n e, con linea tratteggiata, la somma della serie (in realtà la somma di ordine $n = 5000$).

2.5 Applicazioni lineari continue

2.5.1 Definizione. Siano \mathbb{X}_1 e \mathbb{X}_2 due spazi vettoriali normati e indichiamo le loro norme con $\|\cdot\|_1$ e $\|\cdot\|_2$ rispettivamente. Siano A un sottoinsieme di \mathbb{X}_1 e x_0 un punto di A e sia F una funzione (o applicazione) da A in \mathbb{X}_2 , (in breve $f : A \rightarrow \mathbb{X}_2$).

Diremo che F è continua in x_0 se per ogni successione (a_n) di punti di A tale che $a_n \rightarrow x_0$ (in \mathbb{X}_1) succede che $F(a_n) \rightarrow F(x_0)$ (in \mathbb{X}_2). Diremo che F è continua in A se F è continua in tutti i punti di A .

È facile vedere che valgono le seguenti proprietà (standard).

2.5.2 Proposizione. 1. Se F è continua in x_0 allora F è limitata in un intorno di x_0 , cioè esistono un raggio $r > 0$ ed un numero M tali che

$$\|F(x)\|_2 \leq M \quad \forall x \in A : \|x - x_0\|_1 \leq r$$

²ricordiamo che $[t]$ indica la parte intera di un numero t , definita da $[t] := \max\{n \in \mathbb{N} : n \leq t\}$; ne segue allora che $[t]$ è un intero e che $[t] \leq t < [t] + 1$

2. Se F e G sono continue in x_0 e se $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ (risp. $\in \mathbb{C}$), allora $\alpha F + \beta G$ è continua in x_0 .
3. Se $\mathbb{X}_1, \mathbb{X}_2$ e \mathbb{X}_3 sono spazi normati, se $A \subset \mathbb{X}_1, x_0 \in A, B \subset \mathbb{X}_2, F : A \rightarrow B, F$ è continua in $x_0, G : B \rightarrow \mathbb{X}_3, G$ è continua in $y_0 := F(x_0)$ allora la funzione composta $G \circ F$ è continua in x_0 .

Un particolare interesse rivestiranno per noi le applicazioni lineari continue.

2.5.3 Definizione. Siano \mathbb{X}_1 e \mathbb{X}_2 due spazi vettoriali. Se L è una applicazione da \mathbb{X}_1 in \mathbb{X}_2 si dice che L è *lineare* quando

$$L(c_1x_1 + c_2x_2) = c_1L(x_1) + c_2L(x_2) \quad \forall x_1, x_2 \in \mathbb{X}_1, \quad \forall c_1, c_2 \in \mathbb{R} \text{ (risp. in } \mathbb{C})$$

Spesso per le applicazioni lineari si sopprimono le parentesi scrivendo Lx in luogo di $L(x)$.

2.5.4 Proposizione. Se $L : \mathbb{X}_1 \rightarrow \mathbb{X}_2$ è lineare sono equivalenti i tre fatti seguenti.

1. L è continua in ogni x_0 di \mathbb{X}_1 ;
2. L è continua in $\mathbf{0}$;
3. esiste una costante M tale che

$$\|L(x)\|_2 \leq M\|x\|_1 \quad \forall x \in \mathbb{X}_1 \quad (2.4)$$

dove $\|\cdot\|_1$ (risp. $\|\cdot\|_2$) indica la norma in \mathbb{X}_1 (risp. in \mathbb{X}_2).

Dimostrazione. È chiaro che (1) \Rightarrow (2). Mostriamo che (2) \Rightarrow (1). Sia x_0 un qualunque punto di \mathbb{X}_1 . Per la linearità e la continuità in zero:

$$x_n \rightarrow x_0 \Leftrightarrow (x_n - x_0) \rightarrow \mathbf{0} \Rightarrow L(x_n - x_0) \rightarrow \mathbf{0} \Leftrightarrow L(x_n) \rightarrow L(x_0)$$

(dato che $L(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$) e quindi L è continua in x_0 .

Mostriamo che (2) \Rightarrow (3). Per le proprietà dei limiti è chiaro che se L è continua in zero allora essa è limitata in una palla centrata in zero, cioè esistono M_1 ed $r > 0$ tali che

$$\|L(y)\|_2 \leq M_1 \quad \forall y \in \mathbb{X}_1 \text{ tale che } \|y\|_1 \leq r.$$

Ma allora se $x \in \mathbb{X}_1$ e $x \neq 0$ posto $y := \frac{x}{\|x\|_1} r$ si ha $\|y\|_1 = r$ e dunque $L(y) \leq M_1$. Per la linearità di L

$$\|L(x)\|_2 = \frac{\|x\|_1}{r} \|L(y)\|_2 \leq \frac{\|x\|_1}{r} M_1$$

e quindi, ponendo $M := \frac{M_1}{r}$ abbiamo ottenuto (2.4).

Se viceversa vale (2.4) è evidente che L è continua in zero, cioè vale (2). \square

2.5.5 Definizione. Se L è lineare e continua chiamiamo *norma di L* il numero

$$\|L\| := \inf \{M : \text{vale la disuguaglianza (2.4)}\}$$

Quindi (come si può vedere facilmente)

$$\|L(x)\|_2 \leq \|L\| \|x\|_1 \quad \forall x \in \mathbb{X}_1$$

e $\|L\|$ è il più piccolo M per cui vale tale disuguaglianza. Si può anche vedere che

$$\|L\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|Lx\|_2}{\|x\|_1} = \sup_{\|x\|_1=1} \|Lx\|_2$$

Vediamo che la norma sopra introdotta per le applicazioni lineari ha effettivamente le proprietà introdotte in 2.2.6.

1. Chiaramente $\|L\| \geq 0$, se poi $\|L\| = 0$ si ha $\|Lx\|_2 \leq 0\|x\|_1$ per ogni x , cioè $Lx = 0$ per ogni x e dunque $L = 0$.
2. Sia c uno scalare. Allora $\|(cL)(x)\|_2 = |c|\|L(x)\|_2 \leq |c|\|L\|\|x\|_1$ per cui $M = |c|\|L\|$ verifica $\|(cL)(x)\|_2 \leq M\|x\|_1$. Dato che $\|cL\|$ è la più piccola costante con questa proprietà si ha $\|cL\| \leq |c|\|L\|$. Se $c = 0$ abbiamo finito; se $c \neq 0$, per lo stesso motivo $\|L\| = \|c^{-1}cL\| \leq |c^{-1}|\|cL\|$ e quindi, moltiplicando per $|c|$, troviamo $|c|\|L\| \leq \|cL\|$. Mettendo insieme le due disuguaglianze si ha $\|cL\| = |c|\|L\|$.
3. Siano L_1 e L_2 due applicazioni lineari continue. Per ogni x si ha

$$\begin{aligned} \|(L_1 + L_2)(x)\|_2 &= \|L_1(x) + L_2(x)\|_2 \leq \|L_1(x)\|_2 + \|L_2(x)\|_2 \leq \\ &\|L_1\|_2\|x\|_1 + \|L_2\|_2\|x\|_1 = (\|L_1\| + \|L_2\|)\|x\|_1 \end{aligned}$$

Quindi $M = \|L_1\| + \|L_2\|$ verifica $\|(L_1 + L_2)(x)\|_2 \leq M\|x\|_1$. Dato che $\|L_1 + L_2\|$ è la più piccola costante con questa proprietà si ha $\|L_1 + L_2\| \leq \|L_1\| + \|L_2\|$.

Abbiamo quindi verificato che lo spazio vettoriale

$$\mathcal{L}(\mathbb{X}_1, \mathbb{X}_2) := \{L : \mathbb{X}_1 \rightarrow \mathbb{X}_2 : L \text{ è lineare e continua}\}$$

è uno spazio normato (quindi si può introdurre una nozione di convergenza di applicazioni lineari a una applicazione lineare).

Se poi $\mathbb{X}_1 = \mathbb{X}_2 = \mathbb{X}$, e quindi prese due applicazioni lineari L_1, L_2 da \mathbb{X} in \mathbb{X} ha senso considerare la composizione L_1L_2 , si ha:

$$\|L_1L_2\| \leq \|L_1\|\|L_2\|.$$

Infatti per ogni x si ha $\|L_1L_2x\| \leq \|L_1\|\|L_2x\| \leq \|L_1\|\|L_2\|\|x\|$. Quindi $M = \|L_1\|\|L_2\|$ verifica $\|L_1L_2x\| \leq M\|x\|$. Dato che $\|L_1L_2\|$ è la più piccola costante con questa proprietà si ha $\|L_1L_2\| \leq \|L_1\|\|L_2\|$.

2.5.6 Esempio. Consideriamo una applicazione lineare da \mathbb{R}^N in \mathbb{R}^M . Indichiamo con \hat{e}_j i versori di \mathbb{R}^N ($j = 1, \dots, N$); allora il vettore $L\hat{e}_j$ avrà M componenti che indichiamo con $a_{1,j}, \dots, a_{M,j}$. In questo modo risulta definita una matrice $M \times N$ \mathbf{A} di elementi $a_{i,j}$ per $i = 1, \dots, M$ e $j = 1, \dots, N$. Usando la linearità di L si vede facilmente che

$$L(x_1, \dots, x_N) = (y_1, \dots, y_M) \Leftrightarrow y_i = \sum_{j=1}^N a_{i,j}x_j \quad \text{per } i = 1, \dots, M$$

Questo significa che L si rappresenta mediante il prodotto matriciale della matrice \mathbf{A} per il vettore \mathbf{x} (convenendo di rappresentare i vettori come colonne, cioè come matrici $N \times 1$ (in partenza e $M \times 1$ in arrivo).

Poniamo $\bar{A} := \max\{|a_{i,j}| : i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, N\}$. Si vede allora che

$$|L(\mathbf{x})| \leq |L(\mathbf{x})|_1 = |\mathbf{A} \cdot \mathbf{x}|_1 = \sum_{i=1}^M \left| \sum_{j=1}^N a_{i,j}x_j \right| \leq M\bar{A}|\mathbf{x}|_1 \leq NM\bar{A}|\mathbf{x}|$$

(abbiamo usato ripetutamente (2.1)). Ne segue che L è continua e che $\|L\| \leq NM\bar{A}$. Se identifichiamo le matrici $M \times N$ con i vettori di \mathbb{R}^{NM} possiamo notare che \bar{A} corrisponde a $|\mathbf{A}|_\infty$ precedentemente introdotta. Quindi possiamo scrivere $\|\mathbf{A}\| \leq NM|\mathbf{A}|_\infty$. Quindi qualunque applicazione lineare da \mathbb{R}^N in \mathbb{R}^M è continua.

Notiamo che vale anche $|\mathbf{A}|_\infty \leq \|\mathbf{A}\|$ dato che per ogni $i = 1, \dots, M$ e ogni $j = 1, \dots, N$

$$|a_{i,j}| = |(\mathbf{A}\hat{e}_j)_i| \leq |\mathbf{A}\hat{e}_j| \leq \|\mathbf{A}\|\|\hat{e}_j\| = \|\mathbf{A}\|$$

e quindi la stessa disuguaglianza vale prendendo il massimo di tutti gli $|a_{i,j}|$.

Ne segue che $\|\cdot\|$ e $|\cdot|_\infty$ sono norme equivalenti. Dunque la convergenza indotta sulle matrici $N \times N$ dalla norma delle corrispondenti applicazioni lineari coincide con quelle che si ottengono vedendo le matrici come MN -uple di numeri. In sostanza una successione di matrici \mathbf{A}_n tende ad una matrice \mathbf{A} (nel senso delle applicazioni lineari) se e solo se ogni componente di \mathbf{A}_n tende alla corrispondente componente di \mathbf{A} .

Quanto fatto per \mathbb{R}^N vale per gli spazi di dimensione finita.

2.5.7 Teorema. *Ogni applicazione lineare tra spazi normati di dimensione finita è continua.*

Vedremo che, come per la completezza, anche quest'ultimo teorema non vale più negli spazi di dimensione infinita. Cominciamo però col mostrare qualche esempio di applicazione continua tra spazi di funzioni.

2.5.8 Esempio. Consideriamo lo spazio $\mathbb{X} = \mathcal{C}^0(A)$ con la norma $\|f\| = \|f\|_{\infty, A}$. Se x_0 è un punto prefissato in A si può considerare

$$F_1(f) := f(x_0) \quad \text{per ogni } f \text{ in } \mathcal{C}^0(A)$$

e quindi $F_1 : \mathcal{C}^0(A) \rightarrow \mathbb{R}$; si può anche prendere $F_2 : \mathcal{C}^0(A) \rightarrow \mathbb{R}$ definita da

$$F_2(f) := \int_A f(x) dx \quad \text{per ogni } f \text{ in } \mathcal{C}^0(A)$$

(in questo caso lo spazio di arrivo è lo spazio unidimensionale $\mathbb{R} = \mathbb{R}^1$). Entrambe queste due applicazioni sono lineari (come è ovvio verificare). Esse sono anche continue. Per la continuità di F_1 basta osservare che

$$f_n \xrightarrow{\text{unif}} f \Rightarrow f_n(x_0) \rightarrow f(x_0)$$

(la convergenza uniforme implica quella puntuale). Per quanto riguarda la continuità di F_2 , questa è il contenuto del teorema 2.1.10.

Notiamo che se $f \in \mathcal{C}^0(A)$

$$|F_1(f)| = |f(x_0)| \leq \|f\|_\infty \Rightarrow \|F_1\| \leq 1$$

e analogamente

$$|F_2(f)| = \left| \int_A f(x) dx \right| \leq |A| \|f\|_\infty \Rightarrow \|F_2\| \leq |A|.$$

Si potrebbe dimostrare che valgono le eguaglianze, cioè che:

$$\|F_1\| = 1, \quad \|F_2\| = |A|.$$

2.5.9 Esempio. Riprendiamo lo spazio $\mathbb{X} = \mathcal{C}^0([0, 1])$, ma consideriamo in \mathbb{X} la norma $\|\cdot\|_1$ dell'esempio 2.2.14. Consideriamo di nuovo le applicazioni $F_1, F_2 : \mathbb{X} \rightarrow \mathbb{R}$ dell'esempio precedente.

Si vede facilmente che F_2 è continuo, infatti per ogni funzione continua f si ha:

$$|F_2(f)| = \left| \int_0^1 f(t) dt \right| \leq \int_0^1 |f(t)| dt = \|f\|_1.$$

Quindi, con quest'altra norma, si ha $\|F_2\| \leq 1$ (e si potrebbe vedere che $\|F_2\| = 1$).

Invece F_1 **non è continuo**. Consideriamo infatti le funzioni f_n definite da

$$f_n(t) := \begin{cases} 1 - nt & \text{se } 0 \leq t \leq \frac{1}{n} \\ 0 & \text{se } \frac{1}{n} \leq t \leq 1 \end{cases}$$

È chiaro che f_n sono continue, dunque $f_n \in \mathbb{X}$, e che

$$\|f_n\|_1 = \int_0^1 |f_n(t)| dt = \int_0^{1/n} (1 - nt) dt = \frac{1}{2n} \rightarrow 0$$

e quindi le $f_n \rightarrow \mathbf{0}$, dove $\mathbf{0}$ indica la funzione nulla. Però $F_1(f_n) = f_n(0) = 1$ mentre $F_1(\mathbf{0}) = 0$ e dunque non è vero che $F_1(f_n) \rightarrow F_1(\mathbf{0})$, cioè F_1 non è continua.

2.5.10 Osservazione. I due esempi precedenti mostrano che $\|\cdot\|_\infty$ e $\|\cdot\|_1$ **non sono norme equivalenti** su $\mathcal{C}^0(A)$. Questo per la verità era già chiaro dato che $\mathcal{C}^0(A)$ è completo rispetto a $\|\cdot\|_\infty$, mentre non lo è rispetto a $\|\cdot\|_1$.

2.5.11 Esempio. Si può considerare l'insieme \mathbb{X}_1 :

$$\mathbb{X}_1 := \{f \in \mathcal{C}^0(A) : f \text{ è derivabile}\}$$

che è un sottospazio vettoriale di $\mathbb{X} = \mathcal{C}^0(A)$, dato che f, g derivabili implica $\alpha f + \beta g$ derivabile. Allora l'applicazione $D : \mathbb{X}_1 \rightarrow \mathbb{X}$ definita da $D(f) := f'$ (D è l'operazione di derivazione) è lineare dato che

$$D(\alpha f + \beta g) = (\alpha f + \beta g)' = \alpha f' + \beta g' = \alpha D(f) + \beta D(g)$$

Però D non è continua, se si considera (sia in partenza che in arrivo) la distanza introdotta sopra. Per vederlo prendiamo $f_n(x) = \frac{\sin(nx)}{n}$. Si vede facilmente che $\|f_n\|_\infty = \frac{1}{n}$ e quindi $f_n \xrightarrow{\text{unif}} 0$. Inoltre $f_n \in \mathbb{X}_1$ per ogni n . Però $f_n'(x) = \cos(nx)$ e quindi $\|D(f_n)\| = \|f_n'\| = 1$. Questo implica che non può essere $D(f_n) \xrightarrow{\text{unif}} D(0)$, altrimenti $1 = \|D(f_n)\| \rightarrow \|D(0)\| = 0$, che è assurdo.

Abbiamo trovato quindi un altro esempio di applicazione lineare non continua. Inoltre se si rilegge l'esempio 2.1.11 in termini astratti si vede che esso dice che il sottospazio \mathbb{X}_1 non è chiuso in \mathbb{X} (altra proprietà che sarebbe vera se fossimo in dimensione finita)

2.6 Serie di potenze

In questo paragrafo useremo i risultati precedenti per studiare serie del tipo

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$$

Per motivi che saranno chiari nei prossimi paragrafi risulta conveniente ambientare il problema nei numeri complessi, quindi, almeno all'inizio, i coefficienti a_k saranno dei numeri complessi, $z_0 \in \mathbb{C}$ e faremo variare la z in \mathbb{C} . Ad un certo punto però (quando

entreranno in gioco le derivate) ci metteremo in \mathbb{R} , supponendo $a_n, z_0, z \in \mathbb{R}$; utilizzeremo allora, per “ragioni estetiche” x_0 e x al posto di z_0 e z .

Nel resto del paragrafo z_0 sarà un numero fissato. Per $R > 0$ consideriamo il disco aperto di centro z_0 e raggio R :

$$B(R) = B_{z_0}(R) := \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| < R\}.$$

e il corrispondente disco chiuso

$$\bar{B}(R) = \bar{B}_{z_0}(R) := \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| \leq R\}.$$

Fatte queste premesse possiamo scrivere subito il seguente enunciato:

2.6.1 Teorema. *Siano (a_n) una successione in \mathbb{C} e poniamo:*

$$M := \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$$

(per esempio supponiamo che esista il limite di $\sqrt[n]{|a_n|}$ e chiamiamolo M). In generale $M \in [0, +\infty]$. Poniamo

$$\bar{R} := \begin{cases} +\infty & \text{se } M = 0, \\ \frac{1}{M} & \text{se } M \in]0, \infty[, \\ 0 & \text{se } M = +\infty. \end{cases}$$

Allora:

1. per ogni R con $0 < R < \bar{R}$ la serie $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ converge uniformemente su $\bar{B}(R)$; questo implica che per ogni z in $B(\bar{R})$ la serie converge puntualmente in z ;
2. per ogni z fuori da $\bar{B}(\bar{R})$ la serie non converge in z .

Si noti che non si dice nulla (e la situazione è diversa caso per caso) di cosa succeda sulla “buccia” $S(\bar{R}) := \{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| = \bar{R}\}$.

Dimostrazione. Sia $R < \bar{R}$ e applichiamo il teorema 2.4.2 alla serie di funzioni $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ sull'insieme $A = \bar{B}(R)$. Si ha:

$$\|a_n(z - z_0)^n\|_{\infty, \bar{B}(R)} = \sup_{z \in \bar{B}(R)} |a_n(z - z_0)^n| = |a_n|R^n.$$

Se applichiamo alla serie numerica $\sum_{n=0}^{\infty} \|a_n(z - z_0)^n\|_{\infty, \bar{B}(R)}$ il criterio della radice troviamo:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{\|a_n(z - z_0)^n\|_{\infty, \bar{B}(R)}} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|R^n} = MR = \frac{R}{\bar{R}} < 1$$

e dunque la serie converge (questo funziona se $\bar{R} \neq 0, \infty$, ma è chiaro che se $\bar{R} = 0$ il teorema non dice nulla dato che non ci sono R ammissibili, mentre se $\bar{R} = \infty$, cioè se $M = 0$, tutti gli $R > 0$ vanno bene perchè $MR = 0$).

Dalla convergenza di $\sum_{n=0}^{\infty} \|a_n(z - z_0)^n\|_{\infty, \bar{B}(R)}$ si deduce la convergenza uniforme della serie di funzioni sul disco chiuso $\bar{B}(R)$.

In particolare, se $z \in B(\bar{R})$ (disco aperto) si può prendere un raggio R con $|z - z_0| < R <$

\bar{R} ; dato che la serie converge uniformemente su $\bar{B}(R)$ deve convergere in z .
Infine se $|z - z_0| > \bar{R}$ si ha:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n(z - z_0)^n|} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} |z - z_0| = M |z - z_0| = \frac{|z - z_0|}{\bar{R}} > 1$$

che, sempre per il criterio della radice, implica che la serie $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ non converge. \square

2.6.2 Definizione. Data la successione (a_n) in \mathbb{C} chiamiamo *raggio di convergenza* della serie $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ il numero \bar{R} (in $[0, +\infty]$) ottenuto nel teorema (2.6.1).

Risulta quindi definita la funzione $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ per ogni z in $B(\bar{R})$ (se $\bar{R} = 0$ $B(\bar{R}) = \emptyset$; se $\bar{R} = +\infty$ $\bar{R} = \mathbb{C}$).

2.6.3 Proposizione. *La funzione*

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$$

è (ben definita e) continua nel disco aperto $B(\bar{R})$, dove \bar{R} è il raggio di convergenza della serie.

Dimostrazione. La tesi è una conseguenza del teorema 2.1.9, dato che le somme parziali $f_n(z) = \sum_{k=0}^n a_k(z - z_0)^k$ sono ovviamente continue e convergono uniformemente a f su ogni disco chiuso $B(R)$, se $R > \bar{R}$. \square

D'ora in poi consideriamo il caso a coefficienti reali. In realtà tutto quanto stiamo per dire vale allo stesso modo nel caso generale, ma per poter vedere ciò avremmo bisogno di sapere cosa è la derivata in z di una funzione di variabile complessa. Quando faremo tale definizione risulterà chiaro che tutta la teoria delle serie di potenze si ambienta naturalmente nei numeri complessi.

Quindi ora $a_n \in \mathbb{R}$ e $z_0 = x_0 \in \mathbb{R}$; naturalmente il raggio di convergenza \bar{R} è definito come prima, però se vogliamo prendere la $z = x$ reale dobbiamo considerare $x \in]x_0 - \bar{R}, x_0 + \bar{R}[$.

2.6.4 Proposizione. *La funzione $f :]x_0 - \bar{R}, x_0 + \bar{R}[\rightarrow \mathbb{R}$ definita da*

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(x - x_0)^n$$

è di classe C^∞ , cioè ha derivata k -esima continua per qualunque k intero. Inoltre vale la formula

$$f^{(k)}(x) = \sum_{n=k}^{\infty} a_n n(n-1) \cdots (n-k+1) (x - x_0)^{n-k} \quad \forall z \text{ in }]x_0 - \bar{R}, x_0 + \bar{R}[\quad (2.5)$$

dove la serie (delle derivate) scritta destra ha lo stesso raggio di convergenza \bar{R} della serie di partenza.

Dimostrazione. Verifichiamo che la serie delle derivate k -esime ha lo stesso raggio di convergenza della serie di partenza. Per questo ricordiamo che $\sqrt[n]{n} \rightarrow 1$ (e allora anche $\sqrt[n]{n-1} \rightarrow 1, \dots, \sqrt[n]{n-k} \rightarrow 1$). Dunque se $\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} = M$ si ha

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n n(n-1) \cdots (n-k+1)|} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} \sqrt[n]{n} \sqrt[n]{n-1} \cdots \sqrt[n]{n-k+1} = M.$$

Quindi i raggi di convergenza sono gli stessi. A questo punto la tesi segue per il corollario (2.4.4). \square

2.6.5 Osservazione. Se mettiamo $x = x_0$ nella formula (2.5), otteniamo:

$$f^{(k)}(x_0) = a_k k! \Leftrightarrow a_k = \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!}$$

cioè f (in $]x_0 - \bar{R}, x_0 + \bar{R}[$) è eguale alla sua serie di Taylor.

2.6.6 Esempio. Consideriamo la serie $f(z) := \sum_{n=0}^{\infty} z^n$. Allora il raggio di convergenza è 1 dato che $\sqrt[n]{1} \rightarrow 1$. Peraltro si sa che:

$$\sum_{k=0}^n z^k = \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z} \rightarrow \frac{1}{1 - z} \quad \text{se } |z| < 1$$

e quindi $f(z) = \frac{1}{1-z}$ per ogni z del disco aperto $\{|z| < 1\}$ (in particolare $f(x) = \frac{1}{1-x}$ se $-1 < x < 1$).

Consideriamo ora un'altra serie $g(x) := \sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n}$. Anche questa serie ha raggio di convergenza 1 dato che $\sqrt[n]{1/n} \rightarrow 1$. Notiamo che $\frac{d}{dx} \frac{x^n}{n} = x^{n-1}$ e dunque

$$g'(x) = \sum_{n=1}^{\infty} x^{n-1} = \sum_{n=0}^{\infty} x^n = f(x).$$

In altre parole g è una primitiva di f , cioè $g(x) = \ln(1-x) + c$ per c costante. Ma calcolando tutto in $x = 0$ si trova $0 = g(0) = c$ e quindi:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{x^n}{n} = \ln(1-x) \quad \text{se } -1 < x < 1.$$

Consideriamo ancora una terza serie: $h(x) := \sum_{n=0}^{\infty} nx^n$. Anch'essa ha raggio di convergenza 1 perché $\sqrt[n]{n} \rightarrow 1$. Si ha

$$h(x) = \sum_{n=0}^{\infty} nx^n = x \sum_{n=1}^{\infty} nx^{n-1} = x \sum_{n=1}^{\infty} \frac{d}{dx} x^n = x \frac{d}{dx} \left(\sum_{n=1}^{\infty} x^n \right) = x f'(x)$$

e quindi

$$\sum_{n=0}^{\infty} nx^n = \frac{x}{(1-x)^2} \quad \text{se } -1 < x < 1.$$

2.6.7 Esempio. Consideriamo la serie $\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n z^{2n}$. Questa serie ha raggio di convergenza

1. In questo caso in verità non esiste $\lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|}$ perché si ha:

$$a_n = \begin{cases} (-1)^k & \text{se } n = 2k \\ 0 & \text{se } n = 2k + 1 \end{cases}$$

però il massimo limite fa 1, come si vede passando alla sottosuccessione $\sqrt[2k]{|a_{2k}|}$. Si vede facilmente che

$$\sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n z^{2n} = \sum_{n=0}^{\infty} (-z^2)^n = \frac{1}{1+z^2} \quad \text{se } |z| < 1.$$

Quindi la serie converge a $\frac{1}{1+z^2}$ per le z in $\{|z| < 1\}$. Guardando la cosa dal punto di vista di \mathbb{R} la cosa è abbastanza strana, dato che non si capisce come c'entri il numero 1 con la funzione $\frac{1}{1+x^2}$, che è ben definita su tutto \mathbb{R} . Dal punto di vista complesso invece è chiaro che il raggio di convergenza non può essere più di 1 dato che i e $-i$, che hanno modulo uno, sono delle singolarità per $\frac{1}{1+z^2}$.

Abbiamo visto prima che data una serie di potenze $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ essa definisce una funzione f sull'intervallo $]x_0 - \bar{R}, x_0 + \bar{R}[$ ed f è somma della sua serie di Taylor. Procediamo a rovescia e assegnamo una funzione f di classe \mathcal{C}^∞ , definita per esempio su $]x_0 - r, x_0 + r[$, e poniamo $a_n := \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}$. È spontaneo chiedersi se la serie $\sum_{n=0}^{\infty} a_n(x-x_0)^n$ (costruita a partire da f) sia convergente in $]x_0 - r, x_0 + r[$ e soprattutto se converga a f . Il seguente esempio mostra che, in generale, ciò non è vero.

2.6.8 Esempio. Consideriamo la funzione $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ definita da

$$f(x) := \begin{cases} e^{1/|x|} & \text{se } x \neq 0 \\ 0 & \text{se } x = 0 \end{cases}$$

È chiaro che f è continua in zero, dato che $e^{-|x|^{-1}} \rightarrow 0$ per $x \rightarrow 0$.

Per $x > 0$ si ha:

$$\begin{aligned} f'(x) &= -x^{-2}e^{x^{-1}} \\ f''(x) &= (2x^{-3} + x^{-4})e^{x^{-1}} \\ f^{(3)}(x) &= (-6x^{-4} - 4x^{-5} - 2x^{-5} - x^{-6})e^{x^{-1}} = (-6x^{-4} - 6x^{-5} - x^{-6})e^{x^{-1}} \\ &\vdots \\ f^{(k)}(x) &= P_k(x^{-1})e^{x^{-1}} \end{aligned}$$

per un opportuno polinomio P_k . Dato che l'esponenziale "vince" su ogni polinomio si trova

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} f^{(k)}(x) = 0$$

qualunque sia k intero. Lo stesso si trova facendo il limite da sinistra per cui $f^{(k)}(0) = 0$ per ogni k intero. Quindi

$$f^{(k)}(0) = 0 \quad \forall k.$$

In altri termini f si annulla in zero più rapidamente di qualunque potenza. Tutto questo implica che la serie di Taylor associata a f nel punto zero ha tutti i coefficienti nulli e dunque converge uniformemente ovunque alla funzione zero. Dato che $f(x) \neq 0$ se $x \neq 0$ si ha che $f(x)$ non è eguale alla somma della sua serie di Taylor in nessuna $x \neq 0$.

Vedremo nel seguito che questo dipende dal fatto che stiamo ragionando in \mathbb{R} , se infatti guardassimo la funzione in \mathbb{C} essa non sarebbe \mathcal{C}^1 in un intorno di zero.

Nel seguente enunciato si dà un criterio (sufficiente ma non necessario) per far funzionare le cose.

2.6.9 Proposizione. *Supponiamo che $f :]x_0 - r, x_0 + r[\rightarrow \mathbb{R}$ sia di classe \mathcal{C}^∞ e supponiamo che esista una costante K tale che*

$$|f^{(n)}(x)| \leq K^n \quad \text{per tutte le } x \text{ in }]x_0 - r, x_0 + r[$$

Allora

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n \quad \text{in }]x_0 - r, x_0 + r[$$

Dimostrazione. Per la formula di Taylor con resto di Lagrange si ha

$$f(x) = \sum_{k=0}^n \frac{f^{(k)}(x_0)}{k!} (x - x_0)^k + \frac{f^{(n+1)}(\xi_{n,x})}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1}$$

dove $\xi_{n,x}$ è un opportuno punto, che dipende da n e da x , che si trova sul segmento tra x_0 e x . Facendo tendere n all'infinito:

$$\left| \frac{f^{(n+1)}(\xi_{n,x})}{(n+1)!} (x - x_0)^{n+1} \right| \leq \frac{K^{n+1} r^{n+1}}{(n+1)!} \rightarrow 0$$

(il fattoriale va all'infinito più velocemente dell'esponenziale) e dunque la serie converge a $f(x)$. \square

2.6.10 Esempio. La funzione $f(x) := e^x$ è somma della sua serie di Taylor:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} x^n$$

per tutti gli x in \mathbb{R} . Infatti, fissato $R > 0$

$$\max_{x \in [-R, R]} |f^{(k)}(x)| = \max_{x \in [-R, R]} |e^x| = e^R$$

(che è una costante indipendente da n). Per (2.6.9) la tesi vale su $[-R, R]$ e per l'arbitrarietà di R la tesi è vera ovunque.

Nello stesso modo si può verificare che

$$\sin(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} x^{2n+1}, \quad \cos(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} x^{2n}$$

per tutti gli x in \mathbb{R} .

Notiamo che, da quanto fatto in precedenza, si deduce che tutte tre le serie scritte sopra hanno raggio di convergenza infinito e quindi definiscono delle funzioni da \mathbb{C} in \mathbb{C} (mettendo $z \in \mathbb{C}$ al posto di $x \in \mathbb{R}$). In particolare

$$f(z) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z^n$$

è ben definita per ogni z in \mathbb{C} . Facciamo vedere che $f(z_1 + z_2) = f(z_1)f(z_2)$. Infatti applicando il teorema 1.2.11 (dimostrato per serie a termini reali, ma valido anche per termini complessi con la stessa dimostrazione) si ha:

$$\begin{aligned} f(z_1)f(z_2) &= \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z_1^n \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z_2^n \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n \frac{z_1^k}{k!} \frac{z_2^{n-k}}{(n-k)!} \right) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} z_1^k z_2^{n-k} \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z_1^n z_2^n}{n!} = f(z_1 + z_2). \end{aligned}$$

Quindi, se $x, y \in \mathbb{R}$ possiamo scrivere

$$\begin{aligned} f(x + iy) &= f(x)f(iy) = e^x \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(iy)^n}{n!} = e^x \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(iy)^{2k}}{(2k)!} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(iy)^{2k+1}}{(2k+1)!} \right) = \\ &= e^x \left(\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{y^{2k}}{(2k)!} + i \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{y^{2k+1}}{(2k+1)!} \right) = e^x (\cos(y) + i \sin(y)). \end{aligned}$$

e dunque, con la definizione tradizionale di e^z per z in \mathbb{C} , troviamo

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z^n = e^z.$$

Si potrebbe in realtà *definire* le funzioni e^z , $\sin(z)$ e $\cos(z)$ mediante le serie scritte sopra, e *dimostrare* che la formula $e^{x+iy} := e^x(\cos(y) + i \sin(y))$ è una conseguenza di tali definizioni.

2.7 L'esponenziale di una matrice

Come abbiamo visto, se A è una matrice $N \times N$, è definita la norma di A , vedendo A come applicazione lineare da \mathbb{R}^N in \mathbb{R}^N e quindi è definita una convergenza nello spazio delle matrici $N \times N$: $A_n \rightarrow A$ se e solo se $\|A_n - A\| \rightarrow 0$. Abbiamo anche visto che tale convergenza si traduce nella convergenza componente per componente, cioè

$$A_n \rightarrow A \Leftrightarrow a_{ij}^{(n)} \rightarrow a_{ij}$$

dove $a_{ij}^{(n)}$ indica la componente ij di A_n e a_{ij} indica la componente ij di A .

La stessa cosa si può fare se A è una matrice $N \times N$ a componenti complesse - vedendo A come applicazione lineare da \mathbb{C}^N a \mathbb{C}^N .

Data A matrice $N \times N$ a coefficienti $a_{ij} \in \mathbb{C}$ consideriamo la serie

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} A^n$$

che converge perché è assolutamente convergente; infatti

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \|A^n\| \leq \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \|A\|^n = e^{\|A\|}.$$

Tale serie si chiama *esponenziale della matrice* A e si indica con e^A . Quindi $\sum_{k=0}^n \frac{A^k}{k!}$ converge a e^A nelle matrici e cioè componente per componente.

2.7.1 Proposizione. Se $AB = BA$ (A e B commutano) allora

$$e^A e^B = e^B e^A = e^{A+B}.$$

Prima della dimostrazione premettiamo un risultato analogo al teorema (1.2.11), la cui dimostrazione si potrebbe ottenere imitando gli stessi argomenti usati nella dimostrazione di (1.2.11)

2.7.2 Proposizione. Siano (A_n) e (B_n) due successioni di matrici tali che $A_n B_m = B_m A_n$ per ogni m, n e supponiamo che

$$\sum_{n=0}^{\infty} \|A_n\| < +\infty, \sum_{n=0}^{\infty} \|B_n\| < +\infty.$$

Poniamo

$$C_n := \sum_{k=0}^n A_k B_{n-k}.$$

Allora $\sum_{n=0}^{\infty} \|C_n\| < +\infty$ e

$$\sum_{n=0}^{\infty} C_n = \left(\sum_{n=0}^{\infty} A_n \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} B_n \right).$$

Dimostrazione di (2.7.1). Applichiamo la proposizione sopra al caso $A_n = \frac{A^n}{n!}$ e $B_n = \frac{B^n}{n!}$.

È chiaro che le ipotesi sono verificate e quindi:

$$\begin{aligned} e^A e^B &= \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{A^n}{n!} \right) \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{B^n}{n!} \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\sum_{k=0}^n \frac{A^k}{k!} \frac{B^{n-k}}{(n-k)!} \right) = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left(\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} A^k B^{n-k} \right) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (A+B)^n = e^{A+B} \end{aligned}$$

□

2.7.3 Proposizione. Se M è una matrice invertibile, allora

$$e^{M^{-1}AM} = M^{-1}e^A M.$$

Dimostrazione. Poniamo $A_1 := M^{-1}AM$. Allora

$$A_1^n = (M^{-1}AM)(M^{-1}AM) \cdots (M^{-1}AM) = M^{-1}AA \cdots AM = M^{-1}A^n M.$$

e quindi

$$\sum_{k=0}^n \frac{A_1^k}{k!} = M^{-1} \left(\sum_{k=0}^n \frac{A^k}{k!} \right) M$$

da cui segue facilmente la tesi. □

Supponiamo che la matrice A sia diagonale, allora

$$A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_N \end{pmatrix} \Rightarrow A^n = \begin{pmatrix} \lambda_1^n & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2^n & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_N^n \end{pmatrix}$$

da cui si ottiene facilmente

$$e^A = \begin{pmatrix} e^{\lambda_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{\lambda_N} \end{pmatrix}$$

Più in generale supponiamo che A abbia N autovalori reali distinti $\lambda_1, \dots, \lambda_N$. Allora si può trovare una base di N autovalori $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_N$ (cioè $A\mathbf{e}_i = \lambda_i\mathbf{e}_i$). Se allora prendiamo la matrice $M = (\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_N)$ le cui colonne sono i vettori $\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_N$, cioè la matrice M tale che $M\hat{\mathbf{e}}_i = \mathbf{e}_i$ allora si vede facilmente che M è invertibile e che

$$M^{-1}AM\hat{\mathbf{e}}_i = M^{-1}A\mathbf{e}_i = M^{-1}\lambda_i\mathbf{e}_i = \lambda_i\hat{\mathbf{e}}_i$$

e quindi $D := M^{-1}AM$ è la matrice diagonale avente gli autovalori di A sulla diagonale principale. Da questo fatto segue che $A = MDM^{-1}$ da cui

$$e^A = e^{MDM^{-1}} = Me^DM^{-1} = M \begin{pmatrix} e^{\lambda_1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{\lambda_N} \end{pmatrix} M^{-1}.$$

Vediamo ora come si descrive in generale l'esponenziale di una matrice 2×2

2.7.4 Esempio. Sia A una matrice complessa 2×2 . Dato che gli autovalori di A sono le radici del polinomio caratteristico che è di secondo grado si possono presentare due casi.

1. A ha due autovalori distinti λ_1 e λ_2 in \mathbb{C} e dunque ha due autovettori \mathbf{e}_1 ed \mathbf{e}_2 linearmente indipendenti in \mathbb{C}^2 . Allora, come abbiamo appena visto, se $M = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$

$$D := M^{-1}AM = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{pmatrix}$$

da cui

$$e^A = e^{MDM^{-1}} = M \begin{pmatrix} e^{\lambda_1} & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2} \end{pmatrix} M^{-1}$$

2. A ha un solo autovalore reale λ (che deve essere una radice doppia del polinomio caratteristico). Sia \mathbf{e} un autovettore di A e consideriamo $M = (\mathbf{e}, \mathbf{w})$ dove \mathbf{w} è un qualunque vettore linearmente indipendente da \mathbf{e} . Allora si vede che

$$T := M^{-1}AM = \begin{pmatrix} \lambda & \gamma \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

per un opportuno γ reale. Infatti $T\hat{\mathbf{e}}_1 = M^{-1}AM\hat{\mathbf{e}}_1 = M^{-1}A\mathbf{e} = M^{-1}\lambda\mathbf{e} = \lambda\hat{\mathbf{e}}_1$, da cui si ricava $t_{11} = \lambda$ e $t_{21} = 0$, e quindi T è triangolare superiore. Inoltre $t_{22} = \lambda$ dato che λ è l'unico autovalore.

Allora

$$T^n = \begin{pmatrix} \lambda^n & \gamma n \lambda^{n-1} \\ 0 & \lambda^n \end{pmatrix}$$

come si verifica facilmente ragionando induttivamente. Ne segue che

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{T^n}{n!} = \begin{pmatrix} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!} & \gamma \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\lambda^{n-1}}{(n-1)!} \\ 0 & \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\lambda^n}{n!} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^\lambda & \gamma e^\lambda \\ 0 & e^\lambda \end{pmatrix}$$

Quindi, ragionando come prima

$$e^A = Me^TM^{-1} = M \begin{pmatrix} e^\lambda & \gamma e^\lambda \\ 0 & e^\lambda \end{pmatrix} M^{-1}$$

Supponiamo ora che A sia a coefficienti reali e cerchiamo una versione reale dei risultati appena trovati. In questo caso si possono distinguere tre casi.

1. A ha due autovalori reali distinti. Ragionando come nel caso complesso si trovano due autovalori \mathbf{e}_1 ed \mathbf{e}_2 linearmente indipendenti e reali. Posto $M = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2)$ si trova

$$e^A = M \begin{pmatrix} e^{\lambda_1} & 0 \\ 0 & e^{\lambda_2} \end{pmatrix} M^{-1}$$

2. A ha un solo autovalore λ , che deve per forza essere reale. Anche questo caso si tratta nello stesso modo del secondo caso di prima, con l'unica differenza che $\lambda, \gamma, \mathbf{e}$ e \mathbf{w} sono tutti reali.
3. A non ha autovalori reali. Questo significa che il polinomio caratteristico ha due radici complesse coniugate $\lambda = \alpha + i\beta$ e $\bar{\lambda} = \alpha - i\beta$ (essendo un polinomio di secondo grado a coefficienti reali). È anche facile verificare che i corrispondenti autovalori \mathbf{e}_1 ed \mathbf{e}_2 formano una coppia di vettori coniugati, cioè

$$\mathbf{e}_1 = \mathbf{x} + i\mathbf{y}, \quad \mathbf{e}_2 = \mathbf{x} - i\mathbf{y}$$

dove $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^2$. Non è difficile verificare che \mathbf{x} e \mathbf{y} sono linearmente indipendenti dato che \mathbf{e}_1 e \mathbf{e}_2 lo sono. Per quanto visto nel punto (1) del caso complesso si ha $e^A \mathbf{e}_1 = e^\lambda \mathbf{e}_1$, $e^A \mathbf{e}_2 = e^{\bar{\lambda}} \mathbf{e}_2$. Definiamo ora la matrice reale $M = (\mathbf{x}, \mathbf{y})$ che è invertibile, essendo le sue due colonne linearmente indipendenti. Si ha:

$$\begin{aligned} M^{-1} e^A M \hat{\mathbf{e}}_1 &= M^{-1} e^A \mathbf{x} = M^{-1} e^A \frac{1}{2} (\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2) = M^{-1} \frac{1}{2} (e^\lambda \mathbf{e}_1 + e^{\bar{\lambda}} \mathbf{e}_2) = \\ &= M^{-1} \frac{e^\alpha}{2} (e^{\beta i} \mathbf{e}_1 + e^{-\beta i} \mathbf{e}_2) = M^{-1} e^\alpha (\cos(\beta) \mathbf{x} - \sin(\beta) \mathbf{y}) = \\ &= e^\alpha (\cos(\beta) \hat{\mathbf{e}}_1 - \sin(\beta) \hat{\mathbf{e}}_2); \\ M^{-1} e^A M \hat{\mathbf{e}}_2 &= M^{-1} e^A \mathbf{y} = M^{-1} e^A \frac{1}{2i} (\mathbf{e}_1 - \mathbf{e}_2) = M^{-1} \frac{1}{2i} (e^\lambda \mathbf{e}_1 - e^{\bar{\lambda}} \mathbf{e}_2) = \\ &= M^{-1} \frac{e^\alpha}{2i} (e^{\beta i} \mathbf{e}_1 - e^{-\beta i} \mathbf{e}_2) = M^{-1} e^\alpha (\sin(\beta) \mathbf{x} + \cos(\beta) \mathbf{y}) = \\ &= e^\alpha (\sin(\beta) \hat{\mathbf{e}}_1 + \cos(\beta) \hat{\mathbf{e}}_2). \end{aligned}$$

Quindi

$$M^{-1} e^A M = e^\alpha \begin{pmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix}$$

cioè

$$e^A = M \begin{pmatrix} \cos(\beta) & -\sin(\beta) \\ \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix} M^{-1}.$$

Consideriamo ora la funzione

$$t \mapsto e^{tA} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{t^n A^n}{n!}$$

Tale funzione è una serie di potenze in t , anche se formalmente non ricade nella teoria svolta, perché i coefficienti di t non sono numeri ma matrici. In effetti la funzione sopra associa ad ogni t reale una matrice $N \times N$. Non è difficile verificare però che le cose vanno come nel caso di serie numeriche (si potrebbe per esempio ragionare componente per componente) e quindi si ha che il raggio di convergenza è infinito (come era già chiaro

dato che e^{tA} è definito come somma della sua serie per ogni t) e inoltre si può derivare sotto il segno di serie ottenendo

$$\frac{d}{dt}e^{tA} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{d}{dt} \frac{t^n A^n}{n!} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{n-1} A^n}{(n-1)!} = A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{t^{n-1} A^{n-1}}{(n-1)!} = Ae^{tA}$$

(la derivata va intesa, per esempio, componente per componente). Quindi la funzione $M : \mathbb{R} \rightarrow \mathcal{M}(N, N)$, $M(t) := e^{tA}$ dove $\mathcal{M}(N, N)$ denota lo spazio delle matrici $N \times N$ verifica l'equazione

$$M'(t) = AM(t)$$

Da quanto detto si deduce il risultato seguente

2.7.5 Proposizione. *Siano A una matrice $N \times N$ a coefficienti complessi, $B : I \rightarrow \mathbb{C}^N$ una funzione continua, dove I è un intervallo in \mathbb{R} , siano t_0 in I e Y_0 in \mathbb{C}^n . Allora l'unica soluzione Y del problema di Cauchy:*

$$\begin{cases} Y'(t) &= AY(t) + B(t) \\ Y(t_0) &= Y_0 \end{cases}$$

è data da

$$Y(t) = e^{(t-t_0)A} \left(Y_0 + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-t_0)A} B(\tau) d\tau \right) \quad (2.6)$$

Dimostrazione. L'unicità della soluzione è un fatto standard nella teoria dei sistemi di equazioni differenziali lineari. L'unica cosa da vedere è che la Y definita sopra risolve l'equazione. In effetti:

$$Y(t_0) = e^{0A} \left(Y_0 + \int_{t_0}^{t_0} e^{-(\tau-t_0)A} B(\tau) d\tau \right) = Y_0$$

e

$$\begin{aligned} Y'(t) &= \left(\frac{d}{dt} e^{(t-t_0)A} \right) \left(Y_0 + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-t_0)A} B(\tau) d\tau \right) + \\ &e^{(t-t_0)A} \frac{d}{dt} \left(Y_0 + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-t_0)A} B(\tau) d\tau \right) = \\ &Ae^{(t-t_0)A} \left(Y_0 + \int_{t_0}^t e^{-(\tau-t_0)A} B(\tau) d\tau \right) + \\ &e^{(t-t_0)A} \left(e^{-(t-t_0)A} B(t) \right) = AY(t) + B(t) \end{aligned}$$

□

Tutto quanto detto fin'ora fa capire come il calcolo dell'esponenziale di una matrice rivesta importanza nella risoluzione di sistemi di equazioni differenziali ordinarie. Vediamo un esempio (che non è per nulla esaustivo).

2.7.6 Esempio. Consideriamo il seguente sistema di equazioni differenziali del primo ordine:

$$\begin{cases} y_1' &= y_1 - y_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} y_3 = t \\ y_2' &= -y_1 + y_2 + \frac{\sqrt{2}}{2} y_3 = 0 \\ y_3' &= \frac{\sqrt{2}}{2} y_1 + \frac{\sqrt{2}}{2} y_2 = 2 \end{cases}, \quad (2.7)$$

$$y_1(0) = y_2(0) = y_3(0) = 0.$$

Per risolverlo siamo condotti a studiare l'esponenziale della matrice

$$A := \begin{pmatrix} 1 & -1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -1 & 1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{pmatrix}$$

Notiamo che A è simmetrica; questo semplifica alcune cose in quanto, come noto, A deve avere tre autovalori reali corrispondenti a tre autovettori linearmente indipendenti, anzi tra loro ortogonali. Troviamo gli autovalori cercando le radici del polinomio caratteristico:

$$\begin{aligned} P(\lambda) = \det(A - \lambda I) &= \det \begin{pmatrix} 1 - \lambda & -1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -1 & 1 - \lambda & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\lambda \end{pmatrix} = \\ &= (1 - \lambda)(1 - \lambda)\lambda - \frac{1}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2}(1 - \lambda) - \frac{1}{2}(1 - \lambda) + \lambda = (1 - \lambda)(\lambda^2 - \lambda - 2) \end{aligned}$$

Le radici di P sono $\lambda_1 = -1$, $\lambda_2 = 1$ e $\lambda_3 = 2$. Cerchiamo gli autovettori. Per quanto riguarda $\lambda = \lambda_1 = -1$ dobbiamo risolvere

$$\begin{pmatrix} 2 & -1 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -1 & 2 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = 0 \Leftrightarrow \begin{cases} 2x - y + \frac{\sqrt{2}}{2}z = 0 \\ -x + 2y + \frac{\sqrt{2}}{2}z = 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2}x + \frac{\sqrt{2}}{2}y + z = 0 \end{cases}$$

che equivale a $x = y = -\frac{\sqrt{2}}{2}z$; conviene considerare un autovalore di modulo uno, imponendo $x^2 + y^2 + z^2 = 1$ da cui $2z^2 = 1$ e quindi

$$\mathbf{e}_1 = \pm \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}$$

Con calcoli analoghi si trovano gli autovettori relativi a λ_2 e λ_3 :

$$\mathbf{e}_2 = \pm \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{e}_3 = \pm \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Consideriamo allora $M := (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$; essendo le sue colonne dei vettori **ortonormali** la sua inversa è pari alla sua trasposta quindi, indicando con D la matrice diagonale di autovalori $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ si ha:

$$M = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}, \quad M^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \end{pmatrix}$$

e $M^{-1}AM = D \Leftrightarrow A = MDM^{-1}$. Quindi

$$e^{tA} = e^{tMDM^{-1}} = Me^{tD}M^{-1} = M \begin{pmatrix} e^{-t} & 0 & 0 \\ 0 & e^t & 0 \\ 0 & 0 & e^{2t} \end{pmatrix} M^{-1}$$

e facendo gli opportuni calcoli si trova

$$e^{tA} = \begin{pmatrix} \frac{e^{-t}}{4} + \frac{e^t}{4} + \frac{e^{2t}}{2} & \frac{e^{-t}}{4} + \frac{e^t}{4} - \frac{e^{2t}}{2} & -\frac{\sqrt{2}e^{-t}}{4} + \frac{\sqrt{2}e^t}{4} \\ \frac{e^{-t}}{4} + \frac{e^t}{4} - \frac{e^{2t}}{2} & \frac{e^{-t}}{4} + \frac{e^t}{4} + \frac{e^{2t}}{2} & -\frac{\sqrt{2}e^{-t}}{4} + \frac{\sqrt{2}e^t}{4} \\ -\frac{\sqrt{2}e^{-t}}{4} + \frac{\sqrt{2}e^t}{4} & -\frac{\sqrt{2}e^{-t}}{4} + \frac{\sqrt{2}e^t}{4} & \frac{e^{-t}}{2} + \frac{e^t}{2} \end{pmatrix}.$$

La conoscenza di e^{tA} ci permette di risolvere l'equazione omeogenea per un qualunque dato iniziale. Se per esempio vogliamo risolvere

$$\begin{cases} y_1' = y_1 - y_2 + \frac{\sqrt{2}}{2}y_3 = 0 \\ y_2' = -y_1 + y_2 + \frac{\sqrt{2}}{2}y_3 = 0 \\ y_3' = \frac{\sqrt{2}}{2}y_1 + \frac{\sqrt{2}}{2}y_2 = 0 \end{cases}, \quad (2.8)$$

$$y_1(0) = -2, y_2(0) = 0, y_3(0) = 1,$$

si ha:

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{pmatrix} = e^{tA} \begin{pmatrix} -2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{(2+\sqrt{2})}{4}e^{-t} - \frac{(2-\sqrt{2})}{4}e^t - e^{2t} \\ -\frac{(2+\sqrt{2})}{4}e^{-t} - \frac{(2-\sqrt{2})}{4}e^t + e^{2t} \\ \frac{\sqrt{2}+1}{2}e^{-t} - \frac{\sqrt{2}-1}{2}e^t \end{pmatrix}$$

Se invece vogliamo risolvere il problema iniziale 2.7, dobbiamo applicare la formula 2.6 con $t_0 = 0$,

$$Y_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad B(t) = \begin{pmatrix} t \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix}.$$

Facendo i calcoli si ottiene

$$e^{-\tau A}B(\tau) = \begin{pmatrix} \frac{t-2\sqrt{2}}{4}e^\tau + \frac{t+2\sqrt{2}}{4}e^{-\tau} + \frac{t}{2}e^{-2\tau} \\ \frac{t-2\sqrt{2}}{4}e^\tau + \frac{t+2\sqrt{2}}{4}e^{-\tau} - \frac{t}{2}e^{-2\tau} \\ -\frac{\sqrt{2}t-4}{4}e^\tau + \frac{\sqrt{2}t+4}{4}e^{-\tau} \end{pmatrix}.$$

Integrando tra 0 e t e rimoltiplicando per e^{tA} si trova la soluzione

$$\begin{pmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1+2\sqrt{2}}{4}e^{-t} + \frac{1+2\sqrt{2}}{4}e^t + e^{2t} - \frac{5+8\sqrt{2}+2t}{8} \\ \frac{1+2\sqrt{2}}{4}e^{-t} + \frac{1+2\sqrt{2}}{4}e^t - e^{2t} - \frac{3+8\sqrt{2}-2t}{8} \\ -\frac{4+\sqrt{2}}{4}e^{-t} + \frac{4+\sqrt{2}}{4}e^t - \sqrt{2}t \end{pmatrix}$$

MORALE: questi calcoli li fa meglio un computer - l'importante è però avere capito cosa si deve fare e come sia importante capire la natura di e^{tA} .

Capitolo 3

Funzioni olomorfe

3.1 Richiami sui campi e gli integrali di linea

3.1.1 Definizione. Ricordiamo innanzitutto che una *curva* in \mathbb{R}^N è una applicazione γ da un intervallo I di \mathbb{R} a valori in \mathbb{R}^N (cioè $\gamma : I \rightarrow \mathbb{R}^N$). Se $I = [a, b]$ allora i punti $\gamma(a)$ e $\gamma(b)$ si chiamano gli *estremi* della curva γ . Si dice *supporto* di γ l'immagine $\gamma(I)$ della curva.

Possiamo immaginare che I sia un intervallo di tempi e che γ descriva la legge del moto di un punto in \mathbb{R}^N . Notiamo che parlando di una curva non teniamo conto solo dei punti $\gamma(t)$ percorsi al variare di t in I , ma di tutta l'applicazione γ ; per esempio, dati due punti P_0 e P_1 in \mathbb{R}^N , $\gamma_1(t) := tP_0 + (1-t)P_1$ e $\gamma_2(t) := tP_1 + (1-t)P_0$, per $t \in [0, 1]$ hanno entrambe come supporto il segmento tra P_0 e P_1 , ma γ_2 è *percorsa in senso inverso* rispetto a γ_1 .

Se $I = [a, b]$ e $\gamma(a) = \gamma(b)$ diremo che γ è *una curva chiusa*.

Dato che le curve sono delle applicazioni è chiaro che ha senso dire che γ è continua oppure C^1 (sull'intervallo di definizione).

Diremo che γ è C^1 a tratti se γ è continua su tutto I e l'intervallo I si può suddividere in un numero finito di sottointervalli I_1, \dots, I_k tali che γ è di classe C^1 sulla chiusura di ognuno di tali sottointervalli.

3.1.2 Definizione. Data una curva $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ indichiamo con $-\gamma$ la curva $\gamma_1 : [a, b] \rightarrow \Omega$ definita da $\gamma_1(t) := \gamma(a + b - t)$ (cioè la curva γ percorsa a ritroso).

3.1.3 Definizione. Date due curve $\gamma_1 : [a_1, b_1] \rightarrow \mathbb{R}^N$ e $\gamma_2 : [a_2, b_2] \rightarrow \mathbb{R}^N$ diremo che γ_2 è una *riparametrizzata* di γ_1 se $\gamma_2(t) = \gamma_1(\varphi(t))$ per ogni t in $[a_2, b_2]$, dove $\varphi : [a_2, b_2] \rightarrow [a_1, b_1]$ è un'applicazione C^1 con $\varphi(a_2) = a_1$ e $\varphi(b_2) = b_1$. La φ viene detta *riparametrizzazione* o *cambio di parametro*.

3.1.4 Osservazione. Se γ_2 è una riparametrizzata di γ_1 , allora le due curve hanno lo stesso supporto. Il viceversa non è vero, come si potrebbe vedere considerando

$$\gamma_1(t) := (\cos(t), \sin(t)) \quad 0 \leq t \leq 2\pi, \quad \gamma_2(t) := (\cos(t), \sin(t)) \quad 0 \leq t \leq 4\pi.$$

dato che γ_1 percorre **una volta** la circonferenza unitaria in \mathbb{R}^2 mentre γ_2 percorre **due volte** la stessa circonferenza.

3.1.5 Definizione. Diciamo che due curve γ_1 e γ_2 sono *consecutive* se $\gamma_1 : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^N$ e $\gamma_2 : [b, c] \rightarrow \mathbb{R}^N$ e $\gamma_2(b) = \gamma_1(b)$. In questo caso si può definire $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ ponendo $\gamma : [a, c] \rightarrow \mathbb{R}^N$, $T := (b_1 - a_1) + (b_2 - a_2)$ e

$$\gamma(t) = \begin{cases} \gamma_1(t) & \text{se } t \in [a, b], \\ \gamma_2(t) & \text{se } t \in [(b, c)]. \end{cases}$$

Più in generale diciamo che $\gamma_1 : [a_1, b_1] \rightarrow \mathbb{R}^N$ e $\gamma_2 : [a_2, b_2] \rightarrow \mathbb{R}^N$ sono consecutive se $\gamma_2(b_1) = \gamma_1(a_2)$. È semplice vedere che allora si può riparametrizzare le due curve in modo che siano consecutive nel senso di prima e si può definire la somma prendendo la somma delle riparametrizzate. Dunque la somma di due curve non è definita in modo univoco ma ciò non darà fastidio in quanto tutte le operazioni che faremo sulle curve sono indipendenti dalle riparametrizzazioni.

È immediato verificare che se γ_1 e γ_2 sono C^1 a tratti anche $\gamma_1 + \gamma_2$ lo è.

Se invece γ_1 e γ_2 hanno lo stesso secondo estremo ($\gamma_1(b_1) = \gamma_2(b_2)$) è chiaro che possiamo considerare $\gamma_1 - \gamma_2 := \gamma_1 + (-\gamma_2)$.

3.1.6 Osservazione. È abbastanza semplice verificare che γ è C^1 a tratti se e solo se essa è continua e se $\gamma = \gamma + \dots + \gamma_k$ dove $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ sono k curve C^1 consecutive.

3.1.7 Definizione. Se $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^N$ è una curva C^1 chiamiamo *lunghezza* di γ l'integrale:

$$l(\gamma) := \int_a^b |\gamma'(t)| dt$$

Se poi γ è solo C^1 a tratti poniamo

$$l(\gamma) := l(\gamma_1) + \dots + l(\gamma_k)$$

dove $\gamma_1, \dots, \gamma_k$ sono k curve C^1 consecutive tali che $\gamma = \gamma_1 + \dots + \gamma_k$. Si può verificare che l'ultima definizione è ben posta in quanto dipende solo da γ .

3.1.8 Proposizione (invarianza per riparametrizzazioni). *Sia $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ una curva di classe C^1 in Ω . Allora*

- Se γ_1 è una riparametrizzata di γ allora $l(\gamma) = l(\gamma_1)$;
- $l(\gamma) = l(-\gamma)$.

Le stesse proprietà sono vere se γ è C^1 a tratti.

3.1.9 Proposizione. *Se $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ sono tutte C^1 a tratti allora*

$$l(\gamma) = l(\gamma_1) + l(\gamma_2).$$

3.1.10 Proposizione. *Se $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ è una curva C^1 a tratti si può sempre trovare una riparametrizzazione $\varphi : [0, L] \rightarrow [a, b]$ tale che la riparametrizzata $\gamma_1 := \gamma \circ \varphi$ ha (modulo della) velocità costante, anzi $|\gamma_1(t)| = 1$ per ogni t ; si vede allora che $L = l(\gamma) = l(\gamma_1)$ e si dice che γ_1 è parametrizzata nella lunghezza d'arco.*

Dimostrazione. Consideriamo il caso C^1 e supponiamo anche che la velocità γ' sia sempre diversa da zero (la dimostrazione si può fare anche in questo caso ma è più complicata). Si prenda $\lambda(t) = \int_a^t |\gamma'(\tau)| d\tau$. Si vede che $\lambda : [a, b] \rightarrow [0, L]$, dove $L = l(\gamma)$, che $\lambda'(t) = |\gamma'(t)| > 0$ e quindi si può considerare $\varphi(s) := \lambda^{-1}(s)$, $\varphi : [0, L] \rightarrow [a, b]$ e per le formule di derivazione $\varphi'(s) = \frac{1}{\lambda'(\varphi(s))} = \frac{1}{|\gamma'(\varphi(s))|}$. Ne segue:

$$\left| \frac{d}{ds} \gamma(\varphi(s)) \right| = |\gamma'(\varphi(s))| |\varphi'(s)| = \frac{|\gamma'(\varphi(s))|}{|\gamma'(\varphi(s))|} = 1$$

□

3.1.11 Definizione. Sia Ω un sottoinsieme di \mathbb{R}^N . Ricordiamo che Ω si dice *aperto* se il suo complementare è chiuso o se, equivalentemente, per ogni punto \mathbf{x}_0 di Ω esiste un disco $D(\mathbf{x}_0, r) = \{\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0\| < r\}$, con $r > 0$, tale che $D(\mathbf{x}_0, r) \subset \Omega$.

Ricordiamo anche che il *bordo* o *frontiera* di Ω è l'insieme

$$\partial\Omega = \{z \in \mathbb{C} : \forall \rho > 0 \quad (\exists z_1 \in \Omega : |z - z_1| < \rho), (\exists z_2 \notin \Omega : |z - z_2| < \rho)\}$$

mentre la *chiusura* di Ω è l'insieme $\bar{\Omega} := \Omega \cup \partial\Omega$.

Un sottoinsieme aperto Ω di \mathbb{R}^N si dice *connesso* se per ogni coppia di punti \mathbf{x}_0 e \mathbf{x}_1 in Ω esiste una curva in Ω $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ che congiunge \mathbf{x}_0 a \mathbf{x}_1 (cioè tale che $\gamma(a) = \mathbf{x}_0$ e $\gamma(b) = \mathbf{x}_1$).

D'ora in poi consideriamo un sottoinsieme Ω aperto e connesso in \mathbb{R}^N . Inoltre, se \mathbf{x} e \mathbf{y} sono due vettori di \mathbb{R}^N indichiamo con $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y}$ il *prodotto scalare* tra \mathbf{x} e \mathbf{y} definito da $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} := x_1 y_1 + \dots + x_N y_N$.

3.1.12 Definizione. Se D è un sottoinsieme di \mathbb{R}^N chiameremo *campo* in D un'applicazione $\mathbf{f} : D \rightarrow \mathbb{R}^N$. Possiamo pensare che per ogni \mathbf{x} in D $\mathbf{f}(\mathbf{x})$ rappresenti una forza applicata nel punto \mathbf{x} (dunque \mathbf{f} rappresenta un campo di forze in D). Nel seguito considereremo sempre dei campi che siano continui nel loro insieme di definizione e aggiungeremo volta per volta delle ulteriori proprietà. La situazione tipica, che d'ora in poi assumiamo (a meno di precisazioni in senso contrario) è $D = \bar{\Omega}$, quindi $\mathbf{f} : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^N$ è continuo in $\bar{\Omega}$. Spesso servirà ipotizzare che \mathbf{f} sia differenziabile in Ω .

Diciamo che il campo \mathbf{f} è *conservativo* se esiste una funzione $F : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ di classe C^1 tale che $\mathbf{f}(\mathbf{x}) = \nabla F(\mathbf{x})$ per ogni \mathbf{x} in Ω e cioè

$$f_i(x_1, \dots, x_N) = \frac{\partial}{\partial x_i} F(x_1, \dots, x_N) \quad \forall (x_1, \dots, x_N) = \mathbf{x} \in \Omega;$$

se tale F esiste si dirà che F è un *potenziale* per il campo \mathbf{f} .

3.1.13 Definizione. Sia $\gamma : [a, b] \rightarrow \bar{\Omega}$ una curva di classe C^1 in $\bar{\Omega}$ e sia $\mathbf{f} : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^N$ un campo continuo in $\bar{\Omega}$. Chiameremo *integrale* di \mathbf{f} su γ l'espressione:

$$\int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma := \int_a^b \mathbf{f}(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt.$$

La definizione si può estendere al caso di curve C^1 a tratti: se I_1, \dots, I_k sono come nella definizione 3.1.1, allora

$$\int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma := \sum_{i=1}^k \int_{I_i} \mathbf{f}(\gamma(t)) \cdot \gamma'(t) dt.$$

L'integrale di \mathbf{f} su γ si chiama anche il *lavoro* del campo \mathbf{f} sulla curva γ .

3.1.14 Proposizione (invarianza per riparametrazioni). *Sia $\gamma : [a, b] \rightarrow \bar{\Omega}$ una curva di classe C^1 in $\bar{\Omega}$ e sia \mathbf{f} un campo continuo su $\bar{\Omega}$.*

- Se γ_1 è una riparametrizzata di γ allora:

$$\int_{\gamma_1} \mathbf{f} \cdot d\gamma = \int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma.$$

- Si ha:

$$\int_{-\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma = - \int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma.$$

Le stesse proprietà sono vere se γ è C^1 a tratti.

3.1.15 Proposizione. Se γ_1 e γ_2 sono curve consecutive in $\bar{\Omega}$ e C^1 a tratti, e se \mathbf{f} è un campo continuo in $\bar{\Omega}$ allora

$$\int_{\gamma_1+\gamma_2} \mathbf{f} \cdot d\gamma = \int_{\gamma_1} \mathbf{f} \cdot d\gamma + \int_{\gamma_2} \mathbf{f} \cdot d\gamma$$

3.1.16 Proposizione. Se $\gamma : [a, b] \rightarrow \bar{\Omega}$ è una curva C^1 a tratti in $\bar{\Omega}$ ed \mathbf{f} è un campo continuo in $\bar{\Omega}$, allora

$$\left| \int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma \right| \leq \|\mathbf{f}\|_{\infty, \gamma([a, b])} l(\gamma). \quad (3.1)$$

3.1.17 Teorema. Sia dato $\mathbf{f} : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^N$ continuo in $\bar{\Omega}$. Sono equivalenti i tre fatti seguenti.

1. \mathbf{f} è un campo conservativo.
2. Date due curve C^1 a tratti γ_1 e γ_2 in $\bar{\Omega}$ aventi gli stessi estremi, il lavoro di \mathbf{f} sulle due curve è lo stesso:

$$\int_{\gamma_1} \mathbf{f} \cdot d\gamma = \int_{\gamma_2} \mathbf{f} \cdot d\gamma.$$

3. Data una curva chiusa in $\bar{\Omega}$, C^1 a tratti γ , il lavoro di f su γ è nullo:

$$\int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma = 0.$$

Inoltre se il campo è conservativo ed F è un potenziale si ha:

$$F(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}_0) + \int_{\gamma_{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}}} \mathbf{f} \cdot d\gamma$$

dove \mathbf{x}_0 e \mathbf{x} sono due qualunque punti di $\bar{\Omega}$ e $\gamma_{\mathbf{x}_0, \mathbf{x}}$ è una qualunque curva in $\bar{\Omega}$ che congiunge \mathbf{x}_0 a \mathbf{x} .

3.1.18 Definizione. Dato un campo $\mathbf{f} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^N$ di classe C^1 diremo che \mathbf{f} è irrotazionale in Ω se per ogni $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_N)$ in Ω si ha:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f_j(x_1, \dots, x_N) = \frac{\partial}{\partial x_j} f_i(x_1, \dots, x_N) \quad \forall i, j = 1, \dots, N.$$

3.1.19 Proposizione. Se \mathbf{f} è conservativo in Ω allora \mathbf{f} è irrotazionale in Ω .

Il viceversa della proposizione sopra non vale come mostra l'esempio

$$\mathbf{f}(x_1, x_2) := \left(\frac{-x_2}{x_1^2 + x_2^2}, \frac{x_1}{x_1^2 + x_2^2} \right).$$

Tale campo è irrotazionale in $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$, dato che:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_2} f_1(x_1, x_2) &= \frac{-(x_1^2 + x_2^2) + x_2 2x_2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} = \frac{x_2^2 - x_1^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \\ \frac{\partial}{\partial x_1} f_2(x_1, x_2) &= \frac{(x_1^2 + x_2^2) - x_1 2x_1}{(x_1^2 + x_2^2)^2} = \frac{x_2^2 - x_1^2}{(x_1^2 + x_2^2)^2} \end{aligned}$$

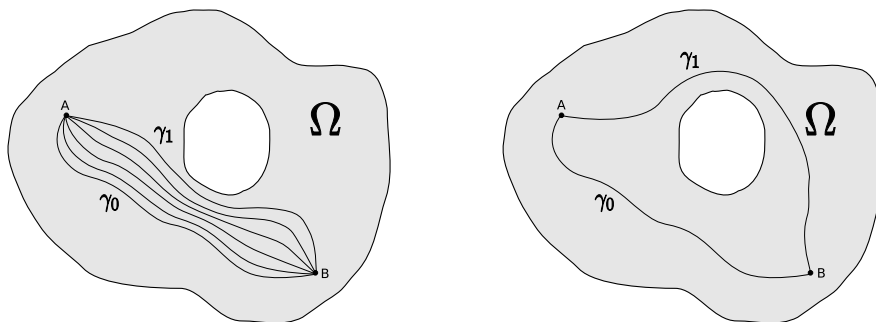


Figura 3.1: Curve omotope e non omotope a estremi fissi

ma se consideriamo la curva $\gamma(t) = (\rho \cos(t), \rho \sin(t))$, per $t \in [0, 2\pi]$ e per $\rho > 0$ fissato è chiaro che γ è una curva chiusa e che $\gamma'(t) = (-\rho \sin(t), \rho \cos(t))$ (γ descrive la circonferenza di raggio ρ percorsa una volta in senso antiorario). Allora:

$$\int_{\gamma} \mathbf{f} \cdot d\gamma = \int_0^{2\pi} \frac{(-\rho \sin(t))(-\rho \sin(t)) + \rho \cos(t)\rho \cos(t)}{\rho^2(\cos^2(t) + \sin^2(t))} dt = 1$$

e quindi \mathbf{f} non può essere conservativo.

3.1.20 Definizione. Siano $\gamma_0, \gamma_1 : [a, b] \rightarrow \bar{\Omega}$ due curve in $\bar{\Omega}$ aventi gli stessi estremi: $\gamma_0(a) = \gamma_1(a) = \mathbf{A}$ e $\gamma_0(b) = \gamma_1(b) = \mathbf{B}$. Diremo che γ_0 e γ_1 sono *omotope a estremi fissi* in $\bar{\Omega}$ se esiste una applicazione $H : [a, b] \times [0, 1] \rightarrow \bar{\Omega}$ (detta *omotopia a estremi fissi* tra γ_0 e γ_1) tale che H è continua (sul rettangolo $[a, b] \times [0, 1]$) e si ha:

$$\begin{aligned} H(t, 0) &= \gamma_0(t) & \forall t \in [a, b], \\ H(t, 1) &= \gamma_1(t) & \forall t \in [a, b], \\ H(a, s) &= \mathbf{A}, H(b, s) = \mathbf{B} & \forall s \in [0, 1]. \end{aligned}$$

Tutto ciò significa che si può passare con continuità da γ_0 a γ_1 mediante una famiglia di curve in $\bar{\Omega}$ ($\gamma_s(t) = H(t, s)$), tutte con primo estremo in \mathbf{A} e secondo estremo in \mathbf{B} (vedi la figura 3.1).

3.1.21 Definizione. Siano $\gamma_0, \gamma_1 : [a, b] \rightarrow \bar{\Omega}$ due curve chiuse in $\bar{\Omega}$ $\gamma_0(a) = \gamma_0(b)$ e $\gamma_1(a) = \gamma_1(b)$. Diremo che γ_0 e γ_1 sono *omotope come curve chiuse* in $\bar{\Omega}$ se esiste una applicazione $H : [a, b] \times [0, 1] \rightarrow \bar{\Omega}$ (detta *omotopia di curve chiuse* tra γ_0 e γ_1) tale che H è continua (sul rettangolo $[a, b] \times [0, 1]$) e si ha:

$$\begin{aligned} H(t, 0) &= \gamma_0(t) & \forall t \in [a, b], \\ H(t, 1) &= \gamma_1(t) & \forall t \in [a, b], \\ H(a, s) &= H(b, s) & \forall s \in [0, 1]. \end{aligned}$$

Tutto ciò significa che si può passare con continuità da γ_0 a γ_1 mediante una famiglia di curve chiuse in $\bar{\Omega}$ ($\gamma_s(t) = H(t, s)$) (vedi la figura 3.2).

3.1.22 Teorema. Sia $\mathbf{f} : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}^N$ un campo continuo in $\bar{\Omega}$ e C^1 in Ω con \mathbf{f} irrotazionale.

1. Allora se due curve γ_0 e γ_1 in $\bar{\Omega}$ aventi gli stessi estremi sono omotope in $\bar{\Omega}$ (a estremi fissi) si ha che:

$$\int_{\gamma_1} \mathbf{f} \cdot d\gamma = \int_{\gamma_2} \mathbf{f} \cdot d\gamma.$$

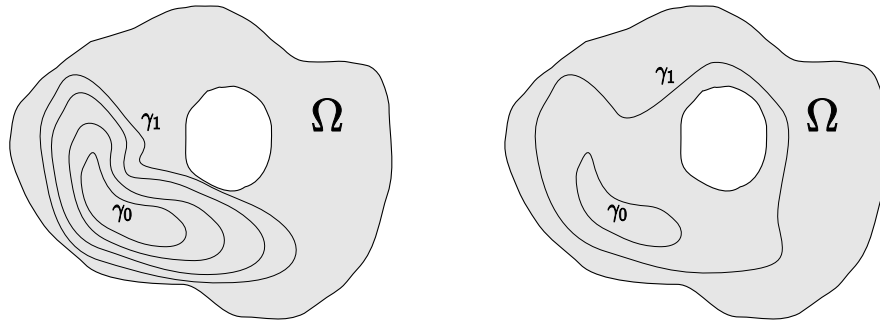


Figura 3.2: curve chiuse omotope e non omotope

2. Analogamente se γ_0 e γ_1 sono due curve chiuse in $\bar{\Omega}$ tra di loro omotope in $\bar{\Omega}$ (come curve chiuse) si ha che:

$$\int_{\gamma_1} \mathbf{f} \cdot d\gamma = \int_{\gamma_2} \mathbf{f} \cdot d\gamma.$$

3.1.23 Definizione. Diciamo che Ω è *semplicemente connesso* se ogni curva chiusa γ in $\bar{\Omega}$ è omotopa (tra le curve chiuse) ad una curva costante (è chiaro che $\gamma_0(t) = \text{costante}$ è una curva chiusa). Questa che si è definita è una proprietà di Ω che si può interpretare dicendo che Ω non ha buchi - vedi la figura 3.3.

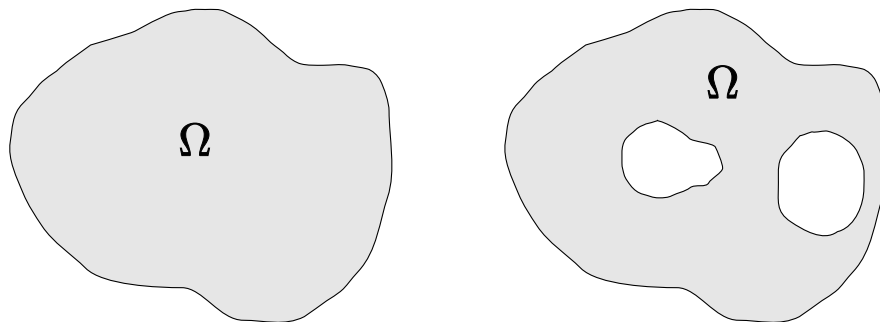


Figura 3.3: un aperto semplicemente connesso e uno non semplicemente connesso

Dato che è ovvio verificare che $\int_{\gamma_0} \mathbf{f} \cdot d\gamma = 0$ se γ_0 è una curva costante si deduce subito il seguente risultato

3.1.24 Teorema. Se Ω è semplicemente connesso allora ogni campo irrotazionale in Ω è conservativo in Ω .

3.1.25 Esempio. Supponiamo che Ω sia *stellato* rispetto a un suo punto, cioè che esista un \mathbf{x}_0 in Ω tale che per ogni altro punto \mathbf{x} di Ω il segmento tra \mathbf{x}_0 e \mathbf{x} sia completamente contenuto in Ω (da \mathbf{x}_0 si “vedono” tutti i punti di Ω). Allora Ω è semplicemente connesso dato che presa una qualunque curva $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ si può definire

$$H(t, s) := s\gamma(t) + (1 - s)\mathbf{x}_0$$

che è un'omotopia tra γ e la curva costante $\gamma_0(t) = \mathbf{x}_0$.

In questo modo si può vedere che $\Omega = \mathbb{R}^N$ oppure $\Omega = B(\mathbf{x}_0, R)$ sono semplicemente connessi.

Viceversa l'esempio considerato in precedenza mostra che $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$ non è semplicemente connesso in quanto si è trovato un campo irrotazionale in \mathbb{R}^2 che non è conservativo.

3.2 Funzioni olomorfe

D'ora in poi consideriamo Ω un sottoinsieme aperto connesso di \mathbb{C} . Introduciamo prima di tutto la nozione di integrale sulle curve in campo complesso.

3.2.1 Definizione. Si dice curva in Ω una applicazione $\gamma : I \rightarrow \Omega$, dove I è un intervallo. Se si vede \mathbb{C} come \mathbb{R}^2 , mediante l'identificazione $x + iy \leftrightarrow (x, y)$ allora tale nozione è la stessa introdotta nel paragrafo precedente e quindi non ripetiamo tutte le definizioni e proprietà già viste.

Se $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ è una curva C^1 e se $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ definiamo l'integrale di f su γ ponendo

$$\int_{\gamma} f(z) dz := \int_a^b f(\gamma(t))\gamma'(t) dt$$

dove si è usato il prodotto tra i numeri complessi $f(\gamma(t))$ e $\gamma'(t)$. Analogamente si può definire l'integrale se γ è C^1 a tratti.

3.2.2 Osservazione. Se $f(z) = f(x + iy) = f_1(x + iy) + if_2(x + iy) = f_1(x, y) + if_2(x, y)$ e se $\gamma(t) = \gamma_1(t) + i\gamma_2(t)$, allora:

$$f(\gamma(t))\gamma'(t) = f_1(\gamma_1(t), \gamma_2(t))\gamma_1'(t) - f_2(\gamma_1(t), \gamma_2(t))\gamma_2'(t) + i(f_1(\gamma_1(t), \gamma_2(t))\gamma_2'(t) + f_2(\gamma_1(t), \gamma_2(t))\gamma_1'(t)).$$

Dunque

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\gamma} \mathbf{h}_1 \cdot d\boldsymbol{\gamma} + i \int_{\gamma} \mathbf{h}_2 \cdot d\boldsymbol{\gamma} \quad (3.2)$$

dove

$$\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2), \quad \mathbf{h}_1 = (f_1, -f_2), \quad \mathbf{h}_2 = (f_2, f_1).$$

Avendo ricondotto l'integrale complesso a degli integrali di campo è chiaro che tutte le proprietà del paragrafo precedente (comportamento rispetto alle riparametrazioni, additività rispetto alle curve, ecc.) rimangono ancora validi.

3.2.3 Definizione. Sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione. Diremo che f è derivabile in un punto z_0 di Ω se esiste il limite del rapporto incrementale:

$$f'(z_0) := \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0}$$

che verrà ovviamente detto la *derivata* di f in z_0 . Se f è derivabile in tutti i punti di Ω ed f' è continua diremo che f è *olomorfa* su Ω .

Le seguenti proprietà si possono dimostrare facilmente imitando le analoghe dimostrazioni per le funzioni derivabili di una variabile reale.

3.2.4 Proposizione. 1. Se f è derivabile in z_0 allora è continua in z_0 .

2. Se f, g sono derivabili in z_0 allora $f + g$ e fg sono derivabili in z_0 e

$$(f + g)'(z_0) = f'(z_0) + g'(z_0), \quad (fg)'(z_0) = f'(z_0)g(z_0) + f(z_0)g'(z_0).$$

Se inoltre $g(z_0) \neq 0$ $\frac{f}{g}$ è derivabile in z_0 e

$$\left(\frac{f}{g}\right)'(z_0) = \frac{f'(z_0)g(z_0) - f(z_0)g'(z_0)}{g^2(z_0)}.$$

3. Se f è derivabile in z_0 e g è derivabile in $w_0 := f(z_0)$, allora $g \circ f$ è derivabile in z_0 e $(g \circ f)'(z_0) = g'(w_0)f'(z_0)$.
4. Se f è derivabile in z_0 , γ è una curva tale che $\gamma(t_0) = z_0$ e γ è derivabile in t_0 , allora $f \circ \gamma$ è (una curva) derivabile in t_0 e $(f \circ \gamma)'(t_0) = f'(z_0)\gamma'(t_0)$.

3.2.5 Esempio. Prendiamo $f(z) = z^n$ per n intero positivo. Allora:

$$\frac{z^n - z_0^n}{z - z_0} = \sum_{k=0}^{n-1} z^k z_0^{n-1-k} \rightarrow \sum_{k=0}^{n-1} z_0^k z_0^{n-1-k} = n z_0^{n-1}$$

per $z \rightarrow z_0$. Quindi f è olomorfa in \mathbb{C} e $f'(z) = n z^{n-1}$.

Se poi si prende la stessa espressione di f con $n < 0$ si ha $f(z) = \frac{1}{z^{-n}}$ e allora, se $z \neq 0$:

$$f'(z) = \frac{-(-n z^{-n-1})}{(z^{-n})^2} = \frac{n z^{-n-1}}{z^{-2n}} = n z^{n-1}.$$

Dunque per $n < 0$ f è olomorfa su $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ e la formula trovata sopra vale anche per tutti gli n interi relativi.

Vediamo ora un importantissimo risultato che caratterizza le funzioni olomorfe.

3.2.6 Teorema. Sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ e scriviamo $f(z) = f_1(x, y) + i f_2(x, y)$, dove $z = x + iy$. Allora sono equivalenti i due fatti seguenti.

1. f è olomorfa in Ω .
2. f_1, f_2 sono di classe C^1 e valgono le seguenti eguaglianze, dette condizioni di Cauchy-Riemann.

$$\frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y) = \frac{\partial}{\partial y} f_2(x, y), \quad \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y) = -\frac{\partial}{\partial y} f_1(x, y)$$

per ogni $z = x + iy$ in Ω .

Se tali proprietà sono vere si ha inoltre $f' = \frac{\partial}{\partial x} f = -i \frac{\partial}{\partial y} f$, cioè:

$$f'(x + iy) = \frac{\partial}{\partial x} (f_1(x, y) + i f_2(x, y)) = -i \frac{\partial}{\partial y} (f_1(x, y) + i f_2(x, y)), \quad (3.3)$$

Dimostrazione. (1) \Rightarrow (2) Sia $z = x + iy$ in Ω . Dato che $f'(z)$ esiste possiamo calcolarlo mediante uno qualunque dei due limiti seguenti in cui h è reale:

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

Quindi

$$f'(z) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(f_1(x+h, y) - f_1(x, y)) + i(f_2(x+h, y) - f_2(x, y))}{h} = \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y) + i \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y),$$

e anche

$$f'(z) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{(f_1(x, y+h) - f_1(x, y)) + i(f_2(x, y+h) - f_2(x, y))}{ih} = -i \frac{\partial}{\partial y} f_1(x, y) + \frac{\partial}{\partial y} f_2(x, y).$$

Se ne ricava che le derivate parziali esistono continue (per la continuità di f') e che valgono le condizioni di Cauchy-Riemann. Se ne ricavano anche le due formule (3.3).

(2) \Rightarrow (1) Se le derivate parziali esistono continue allora (teorema del differenziale totale) f_1 e f_2 sono differenziabili, cioè

$$\begin{aligned} f_1(x+h, y+k) &= f_1(x, y) + \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y)h + \frac{\partial}{\partial y} f_1(x, y)k + r_1(h, k) \\ f_2(x+h, y+k) &= f_2(x, y) + \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y)h + \frac{\partial}{\partial y} f_2(x, y)k + r_2(h, k) \end{aligned}$$

dove r_1 e r_2 vanno a zero più velocemente di $|(h, k)|$, cioè:

$$\lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} \frac{r_1(h, k)}{|(h, k)|} = 0, \quad \lim_{(h,k) \rightarrow (0,0)} \frac{r_2(h, k)}{|(h, k)|} = 0.$$

Da ciò, usando le condizioni di Cauchy-Riemann si ottiene:

$$\begin{aligned} \frac{f(z+h+ik) - f(z)}{h+ik} &= \\ \frac{f_1(x+h, y+k) - f_1(x, y)}{h+ik} + i \frac{f_2(x+h, y+k) - f_2(x, y)}{h+ik} &= \\ \frac{\frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y)h + \frac{\partial}{\partial y} f_1(x, y)k + r_1(h, k)}{h+ik} + i \frac{\frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y)h + \frac{\partial}{\partial y} f_2(x, y)k + r_2(h, k)}{h+ik} &= \\ \frac{\frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y)h - \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y)k + r_1(h, k)}{h+ik} + i \frac{\frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y)h + \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y)k + r_2(h, k)}{h+ik} &= \\ \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y) + i \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y) + \frac{r_1(h, k) + r_2(h, k)}{h+ik} &\rightarrow \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y) + i \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y), \end{aligned}$$

e dunque esiste $f'(z)$ e vale la prima delle (3.3) (analogamente si trova la seconda), da cui si ha che f' è continua. \square

3.2.7 Esempio. Consideriamo la funzione $f(z) = e^z$ e facciamo vedere che è olomorfa su \mathbb{C} . Questo si può fare in vari modi. Mostriamo per esempio che f è derivabile a partire dalla definizione di derivata. Conviene ricordare che $e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$; se ne deduce allora:

$$\frac{f(z) - f(0)}{z - 0} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} - 1}{z} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n!}}{z} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^{n-1}}{n!} \rightarrow 1$$

e quindi f è derivabile in 0 e $f'(0) = 1$. Ricordando poi le proprietà dell'esponenziale:

$$\frac{e^z - e^{z_0}}{z - z_0} = e^{z_0} \frac{e^{z-z_0} - 1}{z - z_0} \rightarrow e^{z_0}$$

e quindi f è olomorfa e $f'(z) = e^z$.

Un altro modo è di scrivere le componenti di e^z $f_1(x, y) = e^x \cos(y)$ e $f_2(x, y) = e^x \sin(y)$, verificare le condizioni di Cauchy-Riemann:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} f_1(x, y) &= e^x \cos(y) & , & & \frac{\partial}{\partial y} f_1(x, y) &= -e^x \sin(y) \\ \frac{\partial}{\partial x} f_2(x, y) &= e^x \sin(y) & , & & \frac{\partial}{\partial y} f_2(x, y) &= e^x \cos(y) \end{aligned}$$

e dedurre che $f'(z) = \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) = e^x \cos(y) + ie^x \sin(y) = e^z$.

3.2.8 *Osservazione.* Le condizioni di Cauchy-Riemann dicono che i campi $\mathbf{h}_1 = (f_1, -f_2)$ e $\mathbf{h}_2 = (f_2, f_1)$ sono irrotazionali. Ne segue che se f è olomorfa e se γ_1 e γ_2 hanno gli stessi estremi e sono omotope a estremi fissi in Ω , allora

$$\int_{\gamma_1} f(z) dz = \int_{\gamma_2} f(z) dz.$$

3.2.9 Teorema. *Sia $f : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione continua su $\bar{\Omega}$ che indichiamo con $f(z) = f_1(x, y) + if_2(x, y)$ e siano $\mathbf{h}_1 = (f_1, -f_2)$ e $\mathbf{h}_2 = (f_2, f_1)$. Allora i fatti seguenti sono equivalenti.*

1. \mathbf{h}_1 e \mathbf{h}_2 sono conservativi.
2. Esiste una funzione olomorfa $F : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ tale che $F'(z) = f(z)$ per ogni z in Ω (cioè una primitiva di f).
3. Date due curve C^1 a tratti γ_1 e γ_2 in $\bar{\Omega}$ aventi gli stessi estremi si ha:

$$\int_{\gamma_1} f(z) dz = \int_{\gamma_2} f(z) dz.$$

4. Data una curva chiusa in $\bar{\Omega}$, C^1 a tratti γ , si ha:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = 0$$

Inoltre se F è una primitiva per f si ha

$$F(z) = F(z_0) + \int_{\gamma_{z_0, z}} f(\zeta) d\zeta$$

per ogni coppia z_0 e z di punti in Ω e per una qualunque curva $\gamma_{z_0, z}$ di estremi z_0 e z .

Dimostrazione. (2) \Rightarrow (1). Se \mathbf{h}_1 e \mathbf{h}_2 sono conservativi esistono due potenziali H_1 e H_2 per \mathbf{h}_1 e \mathbf{h}_2 rispettivamente, cioè:

$$\begin{aligned} f_1(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} H_1(x, y), & -f_2(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} H_1(x, y) \\ f_2(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} H_2(x, y), & f_1(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} H_2(x, y) \end{aligned}$$

Ne segue che, posto $F(z) = H_1(x, y) + iH_2(x, y)$, F verifica le condizioni di Cauchy-Riemann, dunque è olomorfa. Inoltre per le formule (3.3):

$$F'(z) = \frac{\partial}{\partial x} H_1(x, y) + i \frac{\partial}{\partial x} H_2(x, y) = f_1(x, y) + if_2(x, y) = f(z)$$

(1) \Rightarrow (2). Sia F una primitiva di f e scriviamo $F(z) = F_1(x, y) + iF_2(x, y)$. Per le (3.3), se $F'(z) = f(z) = f_1(x, y) + if_2(x, y)$ deve risultare:

$$\begin{aligned} f_1(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} F_1(x, y), & f_2(x, y) &= \frac{\partial}{\partial x} F_2(x, y) \\ f_1(x, y) &= \frac{\partial}{\partial y} F_2(x, y), & f_2(x, y) &= -\frac{\partial}{\partial y} F_1(x, y) \end{aligned}$$

Questo significa che

$$\nabla F_1 = \mathbf{h}_1, \quad \nabla F_2 = \mathbf{h}_2$$

e quindi abbiamo trovato due potenziali per \mathbf{h}_1 e \mathbf{h}_2 rispettivamente.

(1) \Leftrightarrow (3) \Leftrightarrow (4) sono conseguenze del teorema 3.1.17 e dell'osservazione 3.2.2.

L'ultima affermazione infine segue dall'ultima tesi del teorema 3.1.17, dato che, se γ congiunge z_0 a z :

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_{\gamma} (\mathbf{h}_1 + i\mathbf{h}_2) \cdot d\gamma = H_1(z) - H_1(z_0) + i(H_2(z) - H_2(z_0)) = F(z) - F(z_0)$$

□

3.2.10 Osservazione. L'ultima affermazione del teorema precedente si deduce anche direttamente osservando che per ogni curva $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ tra due punti z_0 e z si ha $(F \circ \gamma)' = (F' \circ \gamma)\gamma'$ e dunque per la definizione di integrale:

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} f(z) dz &= \int_{\gamma} F'(z) dz = \int_a^b F'(\gamma(t))\gamma'(t) dt = \\ &= \int_a^b \frac{d}{dt} F(\gamma(t)) dt = F(\gamma(b)) - F(\gamma(a)) = F(z) - F(z_0). \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.2.11 Proposizione. Sia $f : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ continua in $\bar{\Omega}$ e olomorfa in Ω . Allora:

$$f'(z) = 0 \quad \forall z \in \Omega \Leftrightarrow f \text{ è costante in } \bar{\Omega}.$$

Dimostrazione. La parte \Rightarrow è un'evidente conseguenza della definizione di derivata. La parte \Leftarrow segue dalla formula (3.4). □

3.2.12 Proposizione. Se Ω è semplicemente connesso e se $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ è olomorfa, allora esiste una primitiva F di f . In particolare l'integrale di f su una qualunque curva dipende γ solo dagli estremi di γ e si esprime come la differenza di F tra i due estremi.

Dimostrazione. Dato che f è olomorfa \mathbf{h}_1 e \mathbf{h}_2 sono irrotazionali. Dato che Ω è semplicemente connesso essi sono conservativi e dunque per il teorema 3.2.9 vale la tesi. □

3.2.13 Esempio. Sia n un intero relativo e sia $f(z) := z^n$.

Se $n \geq 0$ f è olomorfa su tutto \mathbb{C} e dunque essa ha una primitiva, poiché \mathbb{C} è semplicemente connesso. Si può però anche ragionare direttamente notando che $F(z) := \frac{z^{n+1}}{n+1}$ è ben definita ed è una primitiva per f come si vede immediatamente.

Se $n < 0$ f è olomorfa su $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ che **non** è semplicemente connesso. Anche in questo caso però possiamo esibire direttamente una primitiva data dalla formula $F(z) := \frac{z^{n+1}}{n+1}$,

a patto che $n \neq -1$. Quindi ogni potenza, eccetto $z^{-1} = \frac{1}{z}$, ammette primitiva.

Se $f(z) = \frac{1}{z}$ si vede che f non ha primitiva su $\mathbb{C} \setminus \{0\}$. Per vederlo consideriamo la curva chiusa $\gamma(t) = \rho e^{it}$ per $\rho > 0$ e $t \in [0, 2\pi]$ (che descrive la circonferenza di centro zero e raggio ρ , percorsa una volta in senso antiorario) e integriamo f su γ . Si ha:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_0^{2\pi} \frac{1}{\rho e^{it}} i\rho e^{it} dt = \int_0^{2\pi} i dt = 2\pi i. \quad (3.5)$$

Dato che tale integrale non fa zero, f non ammette primitiva (su $\mathbb{C} \setminus \{0\}$).

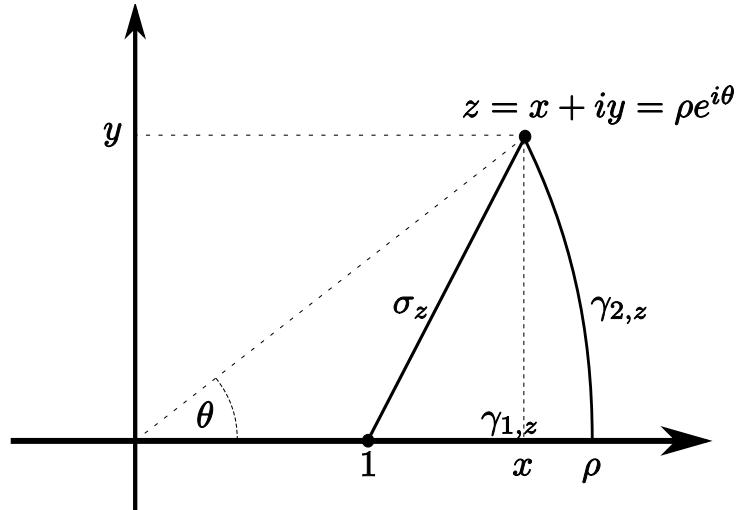


Figura 3.4: per congiungere 1 a z in $\mathbb{C} \setminus \{x \leq 0\}$

3.2.14 Esempio. Riprendiamo la funzione $f(z) := \frac{1}{z}$. Come abbiamo visto essa non ammette primitiva in \mathbb{C} . Possiamo però considerare $\tilde{\Omega} := \mathbb{C} \setminus]-\infty, 0]$ (togliamo l'asse reale negativo da \mathbb{C}). Dato che $\tilde{\Omega}$ è semplicemente connesso (da $z = 1$ si vedono tutti i punti di $\tilde{\Omega}$!) esiste una primitiva F per f definita su $\tilde{\Omega}$ che possiamo definire per esempio come:

$$F(z) = \int_{\sigma_z} \frac{dz}{z}, \quad \sigma_z(t) := tz + (1-t), \quad 0 \leq t \leq 1$$

(σ_z è il segmento che congiunge 1 a z). Notiamo che con questa scelta $F(1) = 0$. Con questa definizione è però complicato calcolare F (vedi sotto). Conviene invece rappresentare $z = \rho e^{i\theta}$ con $-\pi < \theta < \pi$ (cosa possibile in modo univoco visto che abbiamo escluso i numeri reali negativi) e prendere

$$F(z) = \int_{\gamma_z} \frac{dz}{z}$$

dove $\gamma_z := \gamma_{1,z} + \gamma_{2,z}$ e $\gamma_{1,z}, \gamma_{2,z} : [0, 1] \rightarrow \tilde{\Omega}$ sono definite da (vedi la figura)

$$\gamma_{1,z}(t) := t\rho + 1 - t, \quad \gamma_{2,z}(t) := \rho e^{it\theta}.$$

Allora

$$F(z) = \int_{\gamma_{1,z}} \frac{dz}{z} + \int_{\gamma_{2,z}} \frac{dz}{z} = \int_0^1 \frac{\rho - 1}{t(\rho - 1) + 1} dt + \int_0^1 \frac{i\theta \rho e^{i\theta t}}{\rho e^{i\theta t}} dt =$$

$$[\ln((\rho - 1)t + 1)]_0^1 + i\theta [t]_0^1 = \ln(\rho) + i\theta$$

Proviamo, a mo' di verifica, a calcolare l'integrale sul segmento. Se $z = x + iy$ si ha $\sigma_z(t) = 1 + t(x - 1) + ity$ per $0 \leq t \leq 1$, da cui:

$$\int_{\sigma_z} \frac{dz}{z} = \int_0^1 \frac{(x-1) + iy}{1 + t(x-1) + ity} dt = \int_0^1 \frac{((x-1) + iy)(1 + t(x-1) - ity)}{(1 + t(x-1))^2 + t^2y^2} dt =$$

$$\underbrace{\int_0^1 \frac{(x-1)(1 + t(x-1)) + ty^2}{(1 + t(x-1))^2 + t^2y^2} dt}_{(1)} + \underbrace{\int_0^1 \frac{iy}{(1 + t(x-1))^2 + t^2y^2} dt}_{(2)}$$

Se poniamo $A(t) := (1 + t(x - 1))^2 + t^2y^2$ si ha $A'(t) = 2(1 + t(x - 1))(x - 1) + 2ty^2$ da cui

$$(1) = \frac{1}{2} \int_0^1 \frac{A'(t)}{A(t)} dt = \left[\ln(\sqrt{A(t)}) \right]_0^1 = \ln(\sqrt{x^2 + y^2}) = \ln(\rho)$$

Se $y = 0$ il secondo integrale fa zero. Se $y \neq 0$ poniamo $B(t) := \frac{1 + t(x - 1)}{ty}$; allora

$B'(t) = \frac{(x - 1)ty - (1 + t(x - 1))y}{t^2y^2} = -\frac{1}{t^2y}$. Dividendo per t^2y^2 nel secondo integrale si trova

$$(2) = -i \int_0^1 \frac{B'(t)}{1 + B(t)^2} dt = -i [\arctan(B(t))]_0^1 = -i \arctan(x/y) + i \lim_{s \rightarrow 0^+} \arctan(y/s).$$

A questo punto notiamo che

$$\arctan(x/y) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} - \theta & \text{se } y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} - \theta & \text{se } y < 0 \end{cases}, \quad \lim_{s \rightarrow 0^+} \arctan(y/s) = \begin{cases} \frac{\pi}{2} & \text{se } y > 0, \\ -\frac{\pi}{2} & \text{se } y < 0, \end{cases}$$

da cui segue che $(2) = i\theta$.

Abbiamo trovato quindi *una determinazione* della primitiva di $\frac{1}{z}$ su $\mathbb{C} \setminus]-\infty, 0]$. Dato che $e^{F(z)} = e^{\ln(\rho) + i\theta} = \rho e^{i\theta} = z$ è spontaneo dire che $F(z)$ è una determinazione del logaritmo (naturale) di z .

Si poteva arrivare allo stesso risultato notando che, se $h(z) := \frac{e^{F(z)}}{z}$ (per z in $\mathbb{C} \setminus]-\infty, 0]$) allora

$$h'(z) = \frac{ze^{F(z)}F'(z) - e^{F(z)}}{z^2} = \frac{ze^{F(z)}(1/z) - e^{F(z)}}{z^2} = \frac{e^{F(z)} - e^{F(z)}}{z^2} = 0.$$

Dunque $h(z)$ è costante. Dato che $h(1) = e^{F(1)} = e^0 = 1$ si ha $h(z) = 1$ per ogni z , cioè $e^{F(z)} = z$ per ogni z in $\mathbb{C} \setminus]-\infty, 0]$.

Tutti questi discorsi si possono ripetere utilizzando $\mathbb{C} \setminus [0, +\infty[$ invece di $\mathbb{C} \setminus]-\infty, 0]$; in questo modo si troverà $F_1(\rho e^{i\theta}) = \ln(\rho) + i\theta$ per $0 < \theta < 2\pi$ che dunque è un'altra determinazione del logaritmo.

3.2.15 Definizione. Se $\alpha \in \mathbb{R}$ possiamo definire $z^\alpha := e^{\alpha \ln(z)}$. Dato che questa definizione usa il logaritmo essa si potrà considerare solo su $\mathbb{C} \setminus]-\infty, 0]$ oppure su $\mathbb{C} \setminus [0, +\infty[$ ed avrà anch'essa varie determinazioni a seconda di quale logaritmo si sceglie. Se α è intero si può vedere che tutte le determinazioni coincidono e si ritrova l'usuale potenza intera.

3.3 Il teorema e la formula di Cauchy

3.3.1 Definizione. Supponiamo che Ω sia un aperto connesso di \mathbb{C} . Sia $\gamma : I \rightarrow \mathbb{C}$ una curva C^1 a tratti, dove I è un intervallo chiuso (cioè contenente i suoi estremi). Diremo che il bordo di Ω è descritto da γ se:

1. $\partial\Omega = \gamma(I)$ (cioè il bordo di Ω è il supporto di γ);
2. $\gamma(t_1) \neq \gamma(t_2)$ se $t_1 \neq t_2$ e t_1, t_2 sono interni a I (γ non si autointerseca, eccetto che negli estremi);

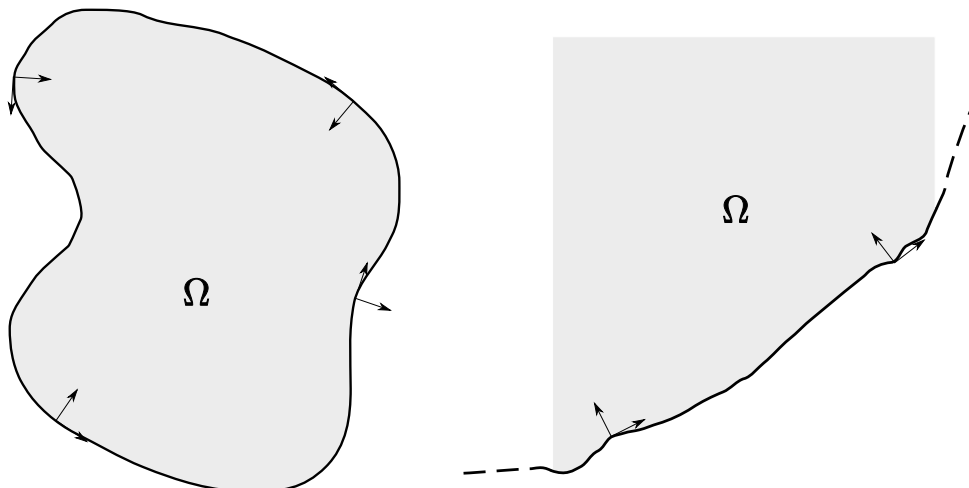


Figura 3.5: aperti con bordo descritto da una sola curva

3. Il verso di percorrenza di γ è coerente con Ω : questo significa che per ogni t in I eccetto il numero finito di punti in cui $\gamma'(t)$ non esiste, il vettore $\gamma'(t)$ “lascia Ω a sinistra” (vedi figura 3.5) ¹.

Si vede (e si potrebbe dimostrare, anche se non in modo semplice) che se è possibile descrivere il bordo di Ω in questo modo, allora Ω è semplicemente connesso e si possono presentare (solo) due casi: a) $I = [a, b]$ e γ è chiusa; b) $I = \mathbb{R}$ e il supporto di γ (dunque $\partial\Omega$) è illimitato.

Più in generale si dirà che il bordo di Ω è descritto da un numero finito di curve chiuse e C^1 a tratti $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_k$, dove $\gamma_j : I_j \rightarrow \mathbb{C}$ e $I_j = [a_j, b_j]$ oppure $I_j = \mathbb{R}$, se

$$\partial\Omega = \bigcup_{j=1, \dots, k} \gamma_j(I_j), \quad \gamma_j(I_j) \cap \gamma_h(I_h) = \emptyset \text{ per } j \neq h,$$

e se ogni γ_j verifica le (2) e (3) (vedi figura 3.6).

3.3.2 Osservazione. È chiaro che se $\partial\Omega$ è limitato le curve γ_j sono tutte del primo tipo. Si noti che $\partial\Omega$ è sicuramente limitato se Ω è limitato ma può esserlo anche se Ω è illimitato (per esempio se Ω è il complementare di un disco).

3.3.3 Definizione. Diremo che l'aperto Ω ha bordo C^1 a tratti se $\partial\Omega$ è descritto da un numero finito di curve C^1 a tratti, $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_k$. In tal caso, data una funzione $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$, scriveremo

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz := \sum_{j=0}^k \int_{\gamma_j} f(z) dz$$

¹Questa frase è chiaramente poco matematica - per renderla rigorosa bisognerebbe dire che per ogni punto del bordo c'è una coppia di vettori (v, n) tali che: a) (v, n) si ottengono come immagine dei vettori (\hat{e}_1, \hat{e}_2) mediante una rotazione; b) (v, n) variano con continuità rispetto al punto del bordo; c) v è concorde con la velocità $\gamma'(t)$ (eccetto che nei punti in cui $\gamma'(t)$ non esiste); d) seguendo n si entra nell'aperto.

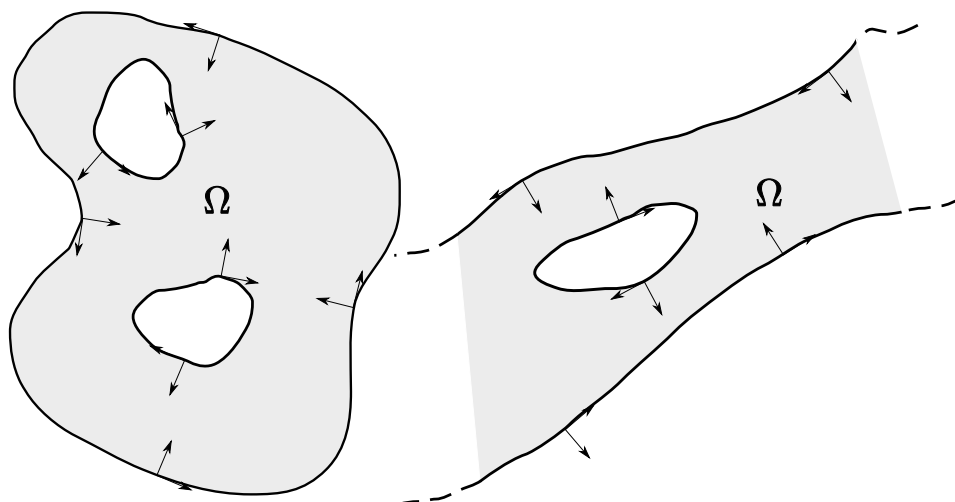


Figura 3.6: aperti con bordo descritto da più curve

È abbastanza chiaro che tale integrale è indipendente dalle curve utilizzate per descrivere il bordo.

Notiamo che stiamo definendo un integrale su $\partial\Omega$ **orientato**. Notiamo anche che Ω e $\mathcal{C}\Omega := \mathbb{C} \setminus \Omega$ hanno lo stesso bordo dal punto di vista insiemistico, ma i due bordi sono orientati in senso opposto: se $\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_k$ descrivono il bordo di Ω allora per descrivere il bordo di $\mathcal{C}\Omega$ ci vogliono $-\gamma_0, -\gamma_1, \dots, -\gamma_k$.

Diremo che un punto z_0 di $\partial\Omega$ è regolare se i punti di $\partial\Omega$ vicini a z_0 si descrivono mediante una curva $\gamma_0 :]-1, 1[\rightarrow \partial\Omega$ tale che $\gamma_0(0) = z_0$ e γ_0 è derivabile in 0. In caso contrario diremo che z_0 è uno *spigolo* di Ω .

3.3.4 Teorema (Teorema di Cauchy). *Supponiamo che Ω sia un aperto limitato con bordo C^1 a tratti, e che $f : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ sia continua su $\bar{\Omega}$ e olomorfa in Ω . Allora:*

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = 0.$$

Idea di dimostrazione. Facciamo la dimostrazione “con il disegno” (vedi le figure in 3.7). Descriviamo innanzi tutto il bordo mediante $\gamma_0, \dots, \gamma_k$, che risultano tutte curve chiuse dato che Ω è limitato. Si vede che possiamo per prima cosa fare dei “tagli”, congiungendo ogni $\gamma_1, \dots, \gamma_n$ a γ_0 , come nella prima figura. Poi possiamo considerare un’unica curva γ come nella seconda figura (in cui ogni taglio dà origine a due pezzi di curva, percorsi in senso opposto - nella terza figura questi pezzi sono stati distanziati per rendere meglio l’idea).

Dato che γ è una singola curva che descrive il bordo di un aperto (vedi Ω' nella terza figura) essa è omotopa a una costante (per quanto osservato prima, senza dimostrazione). Essendo f olomorfa si ha:

$$\int_{\gamma} f(z) dz = 0.$$

Ma è chiaro allora che l’integrale su γ è eguale alla somma degli integrali su tutte le γ_i più l’integrale sui pezzi di collegamento. Dato però che questi ultimi compaiono in coppie con

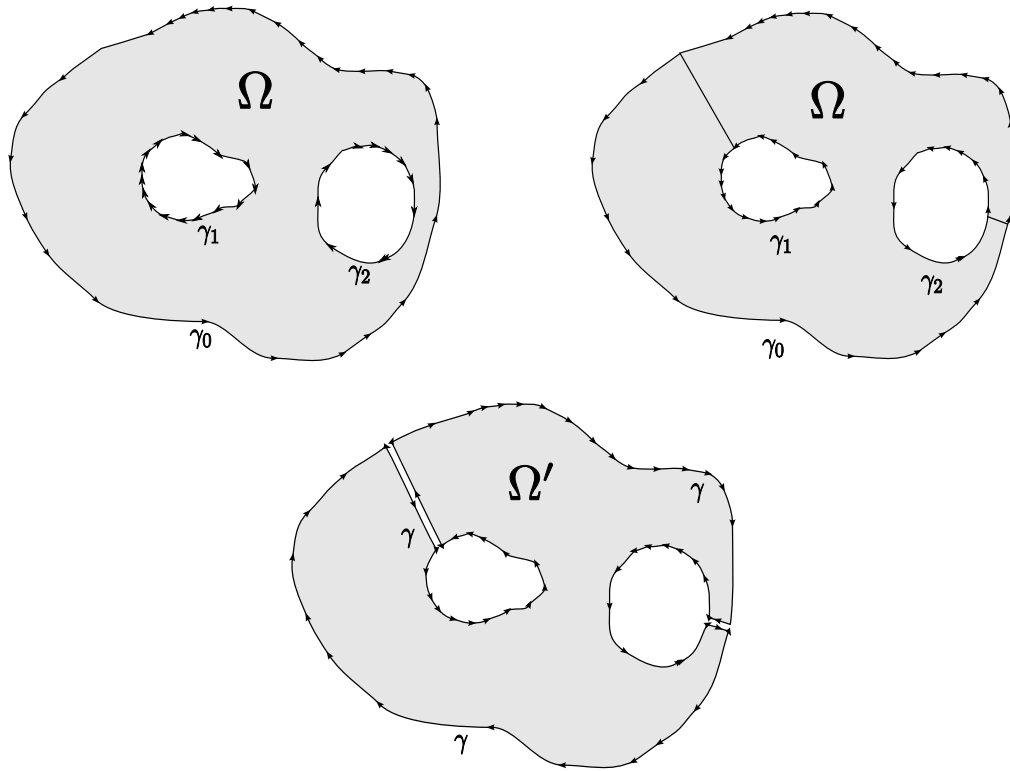


Figura 3.7: riduzione ad una sola curva

identico supporto e verso opposto, gli integrali su tali pezzi si elidono a vicenda e quindi:

$$\sum_{i=0}^k \int_{\gamma_i} f(z) dz = \int_{\gamma} f(z) dz = 0.$$

□

3.3.5 Teorema (Formula di Cauchy). *Supponiamo che Ω sia limitato, che abbia bordo C^1 a tratti, che $f : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ sia continua su $\bar{\Omega}$ e olomorfa in Ω . Allora:*

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial\Omega} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta \quad \forall z \in \Omega. \quad (3.6)$$

Dimostrazione. Fissiamo z in Ω e prendiamo $\rho > 0$ in modo che $B(z, \rho) \subset \Omega$. Poniamo $\Omega_{z,\rho} := \Omega \setminus B(z, \rho)$. È chiaro che il bordo di $\Omega_{z,\rho}$ è descritto dalle curve che descrivono Ω più la curva che descrive $\partial B(z, \rho)$ precorsa in senso inverso. Dunque, applicando il teorema di Cauchy a $\Omega_{z,\rho}$

$$0 = \int_{\partial\Omega_{z,\rho}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \int_{\partial\Omega} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \int_{\partial B_{z,\rho}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta.$$

Allora:

$$\int_{\partial\Omega} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \int_{\partial B_{z,\rho}} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \int_{\partial B_{z,\rho}} \frac{f(\zeta) - f(z)}{\zeta - z} d\zeta + f(z) \int_{\partial B_{z,\rho}} \frac{d\zeta}{\zeta - z}$$

Come già visto in (3.5)

$$\int_{\partial B_{z,\rho}} \frac{d\zeta}{\zeta - z} = \int_{\partial B_{0,\rho}} \frac{d\zeta}{\zeta} = 2\pi i.$$

Per quanto riguarda il primo integrale possiamo osservare che, essendo f derivabile in z esiste una costante M tale che

$$\left| \frac{f(\zeta) - f(z)}{\zeta - z} \right| \leq M \quad \forall \zeta \in B(z, \rho)$$

(per ρ sufficientemente piccolo). Allora

$$\left| \int_{\partial B_{z,\rho}} \frac{f(\zeta) - f(z)}{\zeta - z} d\zeta \right| \leq Ml(\partial B_{z,\rho}) = M2\pi\rho.$$

Però l'integrale sopra deve essere sempre lo stesso per tutti i ρ piccoli (purché $B(z, \rho) \subset \Omega$) perché l'integrando è olomorfo in $\Omega \setminus \{z\}$ e le curve che descrivono $\partial B(z, \rho)$ sono tutte omotope tra loro. Facendo tendere ρ a zero si deduce:

$$\int_{\partial B(z,\rho)} \frac{f(\zeta) - f(z)}{\zeta - z} d\zeta = 0 \quad \text{se } B(z, \rho) \subset \Omega$$

per cui vale la tesi. □

3.4 Analiticità delle funzioni olomorfe

3.4.1 Proposizione. *Siano f_n ed f delle funzioni continue da Ω in \mathbb{C} e sia γ una curva \mathcal{C}^1 a tratti in Ω . Se $f_n \rightarrow f$ uniformemente su $\gamma([a, b])$ (per esempio se $f_n \rightarrow f$ uniformemente in Ω) allora*

$$\int_{\gamma} f_n(z) dz \rightarrow \int_{\gamma} f(z) dz.$$

Dimostrazione. La tesi è una conseguenza della disuguaglianza (3.1) e della proprietà generale espressa nella proposizione 3.1 (dato che $L(f) := \int_{\gamma} f$ è una applicazione lineare). □

3.4.2 Proposizione. *Siano f_n ed f delle funzioni da Ω in \mathbb{C} olomorfe in Ω . Se $f_n \rightarrow f$ puntualmente in Ω e se esiste una $g : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ tale che $f'_n \rightarrow g$ uniformemente su ogni insieme chiuso C con $C \subset \Omega$, (per esempio se $f_n \rightarrow f$ uniformemente in Ω), allora f è olomorfa in Ω e $f' = g$.*

Dimostrazione. Sia $\gamma : [a, b] \rightarrow \Omega$ una qualunque curva \mathcal{C}^1 a tratti. Notiamo che se prendiamo come C il supporto di γ abbiamo che C è chiuso. Dato che le f_n sono olomorfe:

$$\int_{\gamma} f'_n(z) dz = f_n(\gamma(b)) - f_n(\gamma(a))$$

Passando al limite e usando la proposizione precedente:

$$\int_{\gamma} g(z) dz = f(\gamma(b)) - f(\gamma(a)).$$

Dato che γ è arbitraria, la tesi segue per il teorema 3.2.9. □

3.4.3 Osservazione. A causa della proposizione precedente si può estendere al caso complesso quanto visto sulle proprietà differenziali delle serie di potenze. Data una successione di numeri complessi (a_n) e un punto z_0 in \mathbb{C} la funzione

$$f(z) := \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$$

definita in $B(z_0, \bar{R})$, dove $\bar{R} = \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} \right)^{-1}$ è il raggio di convergenza, è olomorfa, anzi infinitamente derivabile su $B(z_0, \bar{R})$, si ha:

$$f^{(k)}(z) = \sum_{n=k}^{\infty} a_n n(n-1) \dots (n-k+1) (z-z_0)^{n-k} \quad \forall z \in B(z_0, \bar{R}),$$

e si può dire anche che:

$$a_k = \frac{f^{(k)}(z_0)}{k!} \quad \forall k.$$

Inoltre tutte le serie scritte sopra convergono uniformemente in $\overline{B(z_0, R)}$ per ogni $R < \bar{R}$.

3.4.4 Definizione. Sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$. Diciamo che f è analitica in Ω se per ogni z_0 di Ω esiste un raggio $R > 0$ tale che $B(z_0, R) \subset \Omega$ ed f è sviluppabile in serie di potenze in $B(z_0, R)$. Detto altrimenti f è infinitamente derivabile e per ogni z_0 di Ω esiste un raggio $R > 0$ tale che

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!} (z-z_0)^n \quad \forall z \in B(z_0, R).$$

3.4.5 Osservazione. Dalla definizione è chiaro che se f è analitica allora f è olomorfa. Il teorema che segue mostra che vale il viceversa. Allora la definizione di funzione analitica è in qualche senso inutile in quanto è equivalente a quella di funzione olomorfa. Viceversa tale definizione è significativa quando si parla di funzioni reali dato che, come si è già notato, non tutte le funzioni \mathcal{C}^∞ sono analitiche.

3.4.6 Teorema. Sia $f : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione olomorfa in Ω . Allora f è analitica in Ω . Inoltre, se f è continua su $\bar{\Omega}$ e $\partial\Omega$ è \mathcal{C}^1 a tratti, vale la formula seguente (che estende la formula di Cauchy)

$$f^{(k)}(z) = \frac{k!}{2\pi i} \int_{\partial\Omega} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-z)^{k+1}} d\zeta \quad \forall z \in \Omega, \forall k \in \mathbb{N}. \quad (3.7)$$

Dimostrazione. Sia z_0 un punto di Ω e sia $R > 0$ tale che $\overline{B(z_0, R)} \subset \Omega$. Dalla formula di Cauchy per il dominio $B(z_0, R)$ si ottiene che, per ogni z in $B(z_0, R)$:

$$\begin{aligned} 2\pi i f(z) &= \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{\zeta-z} d\zeta = \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-z_0) - (z-z_0)} d\zeta = \\ &= \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-z_0)} \frac{1}{\left(1 - \frac{z-z_0}{\zeta-z_0}\right)} d\zeta = \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-z_0)} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z-z_0}{\zeta-z_0}\right)^n d\zeta = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-z_0)} \left(\frac{z-z_0}{\zeta-z_0}\right)^n d\zeta = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta-z_0)^{n+1}} d\zeta \right) (z-z_0)^n. \end{aligned}$$

Nei passaggi sopra abbiamo potuto scambiare serie con integrale perché, se si pone $g_n(\zeta) := \frac{z-z_0^n}{\zeta-z_0}$, allora:

$$\|g_n\|_{\infty, \partial B(z_0, R)} = \max_{\zeta \in \partial B(z_0, R)} \left| \frac{z-z_0}{\zeta-z_0} \right| = \frac{|z-z_0|}{R} \Rightarrow \sum_{n=0}^{\infty} \|g_n\|_{\infty, \partial B(z_0, R)} = \frac{1}{1 - \frac{|z-z_0|}{R}} < +\infty$$

e quindi la serie $\sum_{n=0}^{\infty} g_n$ converge uniformemente su $\partial B(z_0, R)$, da cui:

$$\int_{\partial B(z_0, R)} \left(\sum_{n=0}^{\infty} g_n(\zeta) \right) d\zeta = \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\partial B(z_0, R)} g_n(\zeta) d\zeta.$$

Dunque

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n \quad \forall z \in B(z_0, R)$$

dove

$$a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta. \quad (3.8)$$

Peraltro, dato che $\zeta \mapsto \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}}$ è olomorfa su $\Omega \setminus B(z_0, R)$, applicando il teorema di Cauchy.

$$0 = \int_{\partial(\Omega \setminus B(z_0, R))} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta = \int_{\partial\Omega} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta - \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta,$$

da cui gli a_n sono dati anche da

$$a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial\Omega} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta. \quad (3.9)$$

Dato che $n!a_n = f^{(n)}(z_0)$ se ne deduce la tesi. \square

3.4.7 Osservazione. La dimostrazione fatta sopra mostra anche che, non appena f è olomorfa in $B(z_0, R)$, essa si sviluppa in una serie di potenze su $B(z_0, R)$ e i suoi coefficienti sono definiti da (3.8). In altri termini, definiti gli a_n come in (3.8), il raggio di convergenza della serie $\sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$ è maggiore o eguale a R e in $B(z, R)$ la sua somma vale f .

3.4.8 Teorema (di Liouville). *Se $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ è olomorfa ed è limitata, allora f è costante.*

Dimostrazione. Sia M tale che

$$|f(z)| \leq M \quad \forall z \in \mathbb{C}.$$

Possiamo scrivere $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$ dove gli a_n sono dati dalla (3.9), prendendo come Ω un disco $B(0, R)$, e quindi

$$|a_n| \leq \frac{1}{2\pi} \max_{\zeta \in \partial B(0, R)} \left| \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \right| 2\pi R = \frac{1}{R^n} \max_{\zeta \in \partial B(0, R)} |f(\zeta)| \leq \frac{M}{R^n}$$

e dato che si può prendere R arbitrariamente grande si trova $a_n = 0$ per ogni $n \geq 1$, da cui la tesi. \square

3.4.9 Teorema. *Se P è un polinomio di grado maggiore o eguale a uno allora P ha una radice in \mathbb{C} .*

Dimostrazione. Per assurdo supponiamo che $P(z) \neq 0$ per ogni z complesso e prendiamo $f(z) := \frac{1}{P(z)}$ che risulta quindi essere olomorfa su tutto \mathbb{C} . Poniamo $P(z) = a_n z^n + \text{termini di grado} < n$; si ha:

$$|f(z)| = \frac{1}{|P(z)|} = \frac{1}{|a_n||z|^n(1 + \text{infinitesimi})} \rightarrow 0 \text{ per } |z| \rightarrow \infty$$

da cui (per una semplice conseguenza del teorema di Weierstrass) si ha che f è limitata su \mathbb{C} . Ne segue che f è costante, cioè P è costante, e questo è impossibile. \square

3.5 Singolarità isolate e sviluppi in serie di Laurent

3.5.1 Definizione. Supponiamo che per ogni intero relativo n sia dato a_n in \mathbb{C} ; scriveremo $(a_n)_{n \in \mathbb{Z}}$. Se è assegnato anche un numero complesso z_0 chiameremo *serie di Laurent* l'espressione $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$. Con questo simbolo intendiamo

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n := \sum_{n=0}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n + \sum_{n=1}^{+\infty} a_{-n}(z - z_0)^{-n}.$$

Quindi una serie di Laurent è la somma di due addendi $f_1(z) + f_2(z)$, il primo è la serie di potenze $f_1(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$ mentre il secondo si ottiene dalla serie di potenze $g(w) = \sum_{n=1}^{+\infty} a_{-n}w^n$ ponendo $f_2(z) = g(1/(z - z_0))$.

Da quanto detto per le serie di potenze si ottiene che, posto

$$\bar{R} := \left(\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_n|} \right)^{-1}, \quad \bar{r} := \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{|a_{-n}|} = \limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[|n|]{|a_n|},$$

risulta che $f_1(z)$ risulta definita su $B(z_0, \bar{R})$ mentre g risulta definita su $B(0, (\bar{r})^{-1})$ e dunque f_2 si può considerare su $\{z \in \mathbb{C} : |z - z_0| > \bar{r}\}$.

In definitiva la serie di Laurent definisce una funzione $f(z)$ sulla corona

$$C(z_0, \bar{r}, \bar{R}) := \{z \in \mathbb{C} : \bar{r} < |z - z_0| < \bar{R}\}$$

(che può essere vuota, sia perché $\bar{R} = 0$ oppure perché $\bar{r} = \infty$, ma anche perché può essere $\bar{r} > \bar{R}$). Se però tale *corona di convergenza* non è vuota allora si ha che, per ogni $\bar{r} < r < R < \bar{R}$

$$\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n \text{ converge uniformemente a } f(z) \text{ su } \overline{C(z_0, r, R)}$$

e quindi f è infinitamente derivabile e

$$f^{(k)}(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n n(n-1) \cdots (n-k+1)(z - z_0)^{n-k}$$

come si verifica facilmente derivando separatamente f_1 e f_2 .

In particolare ogni funzione ottenuta come serie di Laurent è olomorfa sulla corona di convergenza. Vediamo che vale anche il viceversa.

3.5.2 Teorema. Sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione olomorfa e supponiamo $z_0 \in \mathbb{C}$, r ed R siano tali che $0 < r < R$ e $\overline{C(z_0, r, R)} \subset \Omega$. Allora

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n \quad \text{uniformemente su } \overline{C(z_0, r, R)}$$

dove:

$$a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial B(z_0, \rho)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} \quad \forall n \in \mathbb{N}, \forall \rho \in [r, R]. \quad (3.10)$$

Dimostrazione. Dalla formula di Cauchy per il dominio $C(z_0, r, R)$ si ottiene che, per ogni z in $C(z_0, r, R)$:

$$\begin{aligned}
2\pi i f(z) &= \int_{\partial C(z_0, r, R)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta - \int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{\zeta - z} d\zeta = \\
&= \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0) - (z - z_0)} d\zeta - \int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0) - (z - z_0)} d\zeta = \\
&= \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)} \frac{1}{1 - \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)} d\zeta - \int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{(z - z_0) \left(\frac{\zeta - z_0}{z - z_0} - 1\right)} d\zeta = \\
&= \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)^n d\zeta + \int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{(z - z_0)} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{\zeta - z_0}{z - z_0}\right)^n d\zeta = \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)} \left(\frac{z - z_0}{\zeta - z_0}\right)^n d\zeta + \sum_{n=0}^{\infty} \int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{(z - z_0)} \left(\frac{\zeta - z_0}{z - z_0}\right)^n d\zeta = \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta \right) (z - z_0)^n + \sum_{n=0}^{\infty} \left(\int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{-n}} d\zeta \right) (z - z_0)^{-n-1} = \\
&= \sum_{n=0}^{\infty} \left(\int_{\partial B(z_0, R)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta \right) (z - z_0)^n + \sum_{n=-\infty}^{-1} \left(\int_{\partial B(z_0, r)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta \right) (z - z_0)^n = \\
&= \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left(\int_{\partial B(z_0, \rho)} \frac{f(\zeta)}{(\zeta - z_0)^{n+1}} d\zeta \right) (z - z_0)^n.
\end{aligned}$$

Si è sfruttato il fatto che, essendo $|z - z_0| < R = |\zeta - z_0|$ per tutti gli ζ di $\partial B(z_0, R)$ e $|z - z_0| > r = |\zeta - z_0|$ per tutti gli ζ di $\partial B(z_0, r)$ sono verificate le convergenze uniformi che permettono di invertire integrale e serie. Inoltre, nell'ultimo passaggio abbiamo potuto rimpiazzato sia gli integrali su $\partial B(z_0, r)$ che quelli su $\partial B(z_0, R)$ con quelli su $\partial B(z_0, R)$. Ciò è possibile visto che tali insiemi sono descritti da circonferenze tutte omotope tra loro in Ω e che gli integrandi sono olomorfi in Ω . Dunque

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n (z - z_0)^n \quad \forall z \in C(z_0, r, R)$$

dove gli a_n sono dati in (3.10).

3.5.3 Osservazione. Si può anche dimostrare che lo sviluppo in serie di Laurent è unico. Infatti se $f(z) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n (z - z_0)^n$ in una corona $C(z_0, r, R)$, allora preso ρ con $r < \rho < R$ si ha:

$$\begin{aligned}
\int_{\partial B(z_0, \rho)} \frac{f(z)}{(z - z_0)^k} dz &= \int_{\partial B(z_0, \rho)} \frac{\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n (z - z_0)^n}{(z - z_0)^k} dz = \\
&= \int_{\partial B(z_0, \rho)} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n (z - z_0)^{n-k} dz = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \int_{\partial B(z_0, \rho)} a_n (z - z_0)^{n-k} dz = \\
&= a_{k-1} \int_{\partial B(z_0, \rho)} (z - z_0)^{-1} dz = 2\pi i a_{k-1}
\end{aligned}$$

(cfr. l'esempio 3.2.13) dove si è potuto invertire integrale e serie perché $\sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$ converge uniformemente a $f(z)$ su $\partial B(z_0, \rho)$, essendo $r < \rho < R$. Abbiamo quindi dimostrato che gli a_n sono univocamente determinati dalla formula (3.10). \square

3.5.4 Definizione. Sia z_0 un punto di \mathbb{C} diremo che z_0 è una *singolarità isolata* per la funzione f se f è olomorfa in $C(z_0, 0, R)$ per un opportuno $R > 0$. È chiaro che se z_0 è una singolarità isolata allora f si sviluppa in serie di Laurent in $C(z_0, 0, R)$ e i coefficienti di Laurent a_n sono dati dalla formula (3.10) dove $0 < \rho < R$.

3.5.5 Proposizione. *Supponiamo che z_0 sia una singolarità isolata per f . Allora sono equivalenti i due fatti seguenti.*

1. f è prolungabile in z_0 in modo che la prolungata risulta olomorfa in $B(z_0, R)$.
2. Tutti i coefficienti a_n dello sviluppo di Laurent con $n < 0$ sono nulli.

Dimostrazione. (1) \Rightarrow (2) Se f è prolungabile in z_0 allora deve esistere il limite di $f(z)$ per $z \rightarrow z_0$ e in particolare f è limitata in $B(z_0, R)$; sia quindi M tale che $|f(z)| \leq M$ per ogni z in $B(z_0, R)$. Allora da (3.10) si deduce che, se $\rho \in]0, R[$:

$$|a_n| \leq \frac{1}{2\pi} \frac{M}{\rho^{n+1}} 2\pi\rho = \frac{M}{\rho^n}.$$

Dato che ρ si può prendere arbitrariamente piccolo si deduce che $a_n = 0$ per tutti gli $n < 0$.

(2) \Rightarrow (1) È ovvio che se $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n$ per $z \in B(z_0, \rho)$ basta porre $f(z_0) := a_0$ per definire il prolungamento di f in z_0 . \square

3.5.6 Definizione. Sia z_0 una singolarità isolata per f e indichiamo con $(a_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ i coefficienti dello sviluppo di Laurent vicino a z_0 . Diremo che

- z_0 è una singolarità *eliminabile* se $a_n = 0$ per tutti gli $n < 0$; questo equivale a dire che f si prolunga ad una funzione olomorfa in z_0 ;
- z_0 è un *polo* se esiste $k > 0$ intero tale che $a_{-k} \neq 0$ e $a_n = 0$ per tutti gli $n < -k$; l'intero k si dice allora *ordine* del polo z_0 ;
- z_0 è una *singolarità essenziale* se ci sono infiniti n negativi per cui $a_n \neq 0$.

3.5.7 Proposizione. *Una singolarità isolata z_0 è un polo di ordine k se e solo se esiste una funzione h olomorfa in $B(z_0, R)$ tale che $f(z) = \frac{h(z)}{(z - z_0)^k}$ e $h(z_0) \neq 0$.*

Dimostrazione. Dimostriamo il “se”. Dato che z_0 è un polo di ordine k

$$f(z) = \sum_{n=-k}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n = \frac{1}{(z - z_0)^k} \sum_{n=-k}^{+\infty} a_n(z - z_0)^{n+k} = \frac{1}{(z - z_0)^k} \sum_{n=0}^{+\infty} a_{n-k}(z - z_0)^n.$$

e dunque la tesi è vera con $h(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{n-k}(z - z_0)^n$ (si noti che $h(z_0) = a_{-k} \neq 0$).

Dimostriamo il “solo se”. Se $h(z) = \frac{f(z)}{(z - z_0)^k}$ è olomorfa allora per la proposizione precedente $h(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n(z - z_0)^n$ e $0 \neq h(z_0) = b_0$; quindi

$$f(z) = \frac{1}{(z - z_0)^k} \sum_{n=0}^{+\infty} b_n(z - z_0)^n = \sum_{n=0}^{+\infty} b_n(z - z_0)^{n-k} = \sum_{n=-k}^{+\infty} b_{n+k}(z - z_0)^n$$

da cui z_0 è un polo di ordine k . \square

3.5.8 Definizione. Se z_0 è un polo di ordine k la funzione

$$h(z) := (z - z_0)^k f(z)$$

(che come abbiamo visto si prolunga in z_0) si dice *parte analitica* di f in z_0 .

3.5.9 Proposizione. Se z_0 è un polo di ordine k allora i coefficienti a_n dello sviluppo di Laurent di f in z_0 sono dati da:

$$a_n = \frac{h^{(n+k)}(z_0)}{(n+k)!} \quad \forall n \geq -k. \quad (3.11)$$

dove h indica la parte analitica di f in z_0 .

Dimostrazione. Supponiamo che $f(z) = \sum_{n=-k}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$ per ogni z in $C(z_0, 0, R)$. Se h è la parte analitica di f si ha:

$$h(z) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (z - z_0)^n \quad \forall z \in B(z_0, R),$$

e deve essere $b_n = \frac{h^{(n)}(z_0)}{n!}$. Ma allora, se $z \in C(z_0, 0, R)$:

$$f(z) = \frac{h(z)}{(z - z_0)^k} = \frac{1}{(z - z_0)^k} \sum_{n=0}^{\infty} b_n (z - z_0)^n = \sum_{n=0}^{\infty} b_n (z - z_0)^{n-k} = \sum_{n=-k}^{\infty} b_{n+k} (z - z_0)^n$$

da cui segue $a_n = b_{n+k} = \frac{h^{(n+k)}(z_0)}{(n+k)!}$ per tutti gli $n \geq -k$. □

3.6 I teoremi dei residui

3.6.1 Definizione. Se z_0 è una singolarità isolata per una funzione olomorfa f ($f : \Omega \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$) chiamiamo *residuo di f in z_0* il coefficiente di ordine -1 dello sviluppo di Laurent di f in z_0 :

$$\text{Res}(f, z_0) = a_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial B(z_0, \rho)} f(\zeta) d\zeta$$

(dove $\rho > 0$ è tale che $\overline{B(z_0, \rho)} \subset \Omega$).

3.6.2 Proposizione. Supponiamo che z_0 sia un polo di ordine k per f . Allora

$$\text{Res}(f, z_0) = \frac{h^{(k-1)}(z_0)}{(k-1)!}$$

dove h indica la parte analitica di f in z_0 , cioè $h(z) := (z - z_0)^k f(z)$, che per quanto visto si può estendere analiticamente a z_0 .

Dimostrazione. È conseguenza della proposizione 3.5.9, mettendo $n = -1$. □

Il seguente risultato è assai utile nel caso dei poli semplici in quanto non richiede di calcolare la parte analitica in ogni polo.

3.6.3 Proposizione. Supponiamo che $f(z) = \frac{f_1(z)}{Q(z)}$, z sia una radice semplice di Q e f_1 sia olomorfa nell'intorno di z_0 ; dunque z_0 è un polo di ordine 1 per f (se $f_1(z_0) \neq 0$, altrimenti è una singolarità eliminabile). Allora

$$\operatorname{Res}(f, z_0) = \frac{f_1(z_0)}{Q'(z_0)}$$

Dimostrazione. Si ha $Q(z) = Q_1(z)(z - z_0)$ dove Q_1 è un polinomio con $Q_1(z_0) \neq 0$. Allora la parte analitica di f è $h(z) := \frac{f_1(z)}{Q_1(z)}$. Ne segue

$$\operatorname{Res}(f, z_0) = h(z_0) = \frac{f_1(z_0)}{Q_1(z_0)}.$$

Peraltro $Q'(z) = Q_1(z) + Q_1'(z)(z - z_0)$ che calcolato in $z = z_0$ dà $Q'(z_0) = Q_1(z_0)$, da cui la tesi. \square

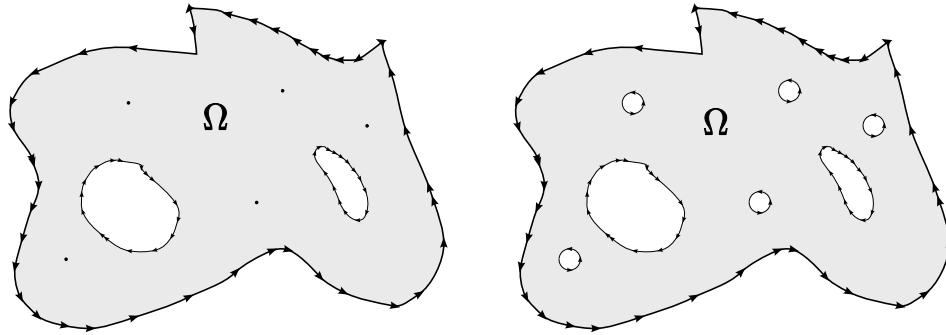


Figura 3.8: dimostrazione del teorema dei residui

3.6.4 Teorema (primo teorema dei residui). Sia Ω un aperto limitato con bordo \mathcal{C}^1 a tratti, siano z_1, \dots, z_k punti di Ω ed $f : \bar{\Omega} \setminus \{z_1, \dots, z_k\} \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione continua in $\bar{\Omega} \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$ e olomorfa in $\Omega \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$ (dunque z_1, \dots, z_k sono singolarità isolate di f). Allora:

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = 2\pi i \sum_{j=1}^k \operatorname{Res}(f, z_j).$$

Dimostrazione. Sia $\rho > 0$ tale che $\overline{B(z_j, \rho)} \subset \Omega$ per ogni $j = 1, \dots, k$ e $\overline{B(z_j, \rho)} \cap \overline{B(z_h, \rho)} = \emptyset$ se $j \neq h$. Se poniamo $\Omega_1 := \Omega \setminus \bigcup_{j=1}^k \overline{B(z_j, \rho)}$ (vedi la figura 3.8) possiamo applicare il teorema di Cauchy su Ω_1 :

$$0 = \int_{\partial\Omega_1} f(z) dz = \int_{\partial\Omega} f(z) dz - \sum_{j=1}^k \int_{\partial B(z_j, \rho)} f(z) dz = \int_{\partial\Omega} f(z) dz - \sum_{j=1}^k 2\pi i \operatorname{Res}(f, z_j)$$

da cui la tesi. \square

3.6.5 Definizione. Sia f una funzione olomorfa su $C(0, r, \infty)$ per un qualche r (cioè su $\{|z| > r\}$). Allora possiamo considerare $g : C(0, 0, 1/r) \rightarrow \mathbb{C}$ definita da $g(w) = -\frac{f(1/w)}{w^2}$. Diremo *residuo* di f all'infinito il residuo di g in zero:

$$\text{Res}(f, \infty) := \text{Res}(g, 0).$$

Diremo che f ha un polo di ordine k a ∞ se g ha un polo di ordine k in zero. Diremo anche che f è olomorfa a ∞ se g è olomorfa in zero.

3.6.6 Osservazione. Sia k un intero. Allora f ha un polo di ordine minore o eguale a k all'infinito se e solo se esistono una costante M e un raggio R tali che

$$|f(z)| \leq M|z|^{k-2} \quad \forall z \in C(0, R, \infty).$$

Inoltre f è olomorfa a ∞ se e solo se esistono una costante M e un raggio R tali che

$$|f(z)| \leq \frac{M}{|z|^2} \quad \forall z \in C(0, R, \infty).$$

Dimostrazione. f ha un polo di ordine minore o eguale a k all'infinito se e solo se $g(w)$ ha un polo di ordine k in zero, se e solo se esistono M ed r tali che:

$$|g(w)| \leq M|w|^{-k} \quad \forall w \in C(0, 0, r)$$

Scrivendo la definizione di g si ottiene facilmente la tesi (con $R := 1/r$). La seconda tesi si ottiene dalla prima con $k = 0$. \square

3.6.7 Proposizione. *Si ha:*

$$\text{Res}(f, \infty) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial C(0, \rho, \infty)} f(z) dz$$

per ogni $\rho > r$ (dove f è come nella definizione precedente).

Dimostrazione. Possiamo descrivere il bordo di $C(0, \rho, \infty)$ mediante $\gamma(t) = \rho e^{-it}$ per $0 \leq t \leq 2\pi$. Notiamo che $\gamma_1(t) := 1/\gamma(t) = \rho^{-1} e^{it}$ descrive $\partial B(0, \rho^{-1})$. Notiamo anche che $f(z) = -\frac{g(1/z)}{z^2}$. Allora:

$$\begin{aligned} \int_{\partial C(0, \rho, \infty)} f(z) dz &= \int_0^{2\pi} f(\gamma(t)) \gamma'(t) dt = \int_0^{2\pi} f(\rho e^{-it}) (-i\rho e^{-it}) dt = \\ &= \int_0^{2\pi} \frac{g(\rho^{-1} e^{it})}{\rho^2 e^{-2it}} (i\rho e^{-it}) dt = \int_0^{2\pi} g(\rho^{-1} e^{it}) (i\rho^{-1} e^{it}) dt = \\ &= \int_0^{2\pi} g(\gamma_1(t)) \gamma_1'(t) dt = \int_{\partial B(0, \rho)} g(z) dz. \end{aligned}$$

Dato che

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\partial B(0, \rho)} g(z) dz = \text{Res}(g, 0)$$

si ha la tesi. \square

3.6.8 Teorema (secondo teorema dei residui). *Sia Ω un aperto illimitato contenente una $C(0, r, \infty)$ per $r > 0$ opportuno (in qualche senso Ω è un intorno di ∞). Supponiamo che $\partial\Omega$ sia C^1 a tratti (si noti che $\partial\Omega$ è limitato), che z_1, \dots, z_k siano punti di Ω e che $f : \bar{\Omega} \setminus \{z_1, \dots, z_k\} \rightarrow \mathbb{C}$ sia continua in $\Omega \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$ e olomorfa in $\Omega \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$ (anche in questo caso z_1, \dots, z_k sono singolarità isolate di f). Allora:*

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = 2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res}(f, z_j) + 2\pi i \text{Res}(f, \infty).$$

Dimostrazione. Prendiamo $\rho > r$ in modo che tutti gli z_1, \dots, z_k abbiano modulo minore di ρ , e poniamo $\Omega_1 := \Omega \cap B(0, \rho)$. Applicando il primo teorema dei residui su Ω_1 (che quindi contiene tutti gli z_j):

$$\int_{\partial\Omega_1} f(z) dz = 2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res}(f, z_j).$$

D'altra parte si vede facilmente che:

$$\begin{aligned} \int_{\partial\Omega_1} f(z) dz &= \int_{\partial\Omega} f(z) dz + \int_{\partial B(0, \rho)} f(z) dz = \\ &= \int_{\partial\Omega} f(z) dz - \int_{\partial C(0, \rho, \infty)} f(z) dz = \int_{\partial\Omega} f(z) dz - 2\pi i \text{Res}(f, \infty). \end{aligned}$$

Mettendo insieme le due formule si ha la tesi. \square

3.6.9 Osservazione. Supponiamo che $f : \mathbb{C} \setminus \{z_1, \dots, z_k\} \rightarrow \mathbb{C}$ sia olomorfa (cioè che f abbia solo un numero finito di singolarità che sono dunque isolate). Sia Ω un aperto limitato tale che $\partial\Omega$ sia C^1 a tratti e non contenga nessuna delle singolarità. Allora

$$\int_{\partial\Omega} f(z) dz = 2\pi i \sum_{\substack{j=1, \dots, h \\ z_j \in \Omega}} \text{Res}(f, z_j) = -2\pi i \sum_{\substack{j=1, \dots, h \\ z_j \notin \Omega}} \text{Res}(f, z_j) - 2\pi i \text{Res}(f, \infty).$$

In particolare

$$\sum_{j=1}^h \text{Res}(f, z_j) + \text{Res}(f, \infty) = 0.$$

3.6.10 Osservazione. Supponiamo che $f(z) := \frac{P(z)}{Q(z)}$ dove P e Q sono polinomi con

$$P(z) = \sum_{j=0}^n a_j z^j, \quad Q(z) = \sum_{j=0}^{n+1} b_j z^j.$$

Allora $\text{Res}(f, \infty) = -\frac{a_n}{b_{n+1}}$. Infatti si vede subito che $f(z) = \frac{a_n}{b_{n+1}} \frac{1}{z} (1 + \sigma(z))$, dove $\sigma(z) \rightarrow 0$ per $|z| \rightarrow \infty$. Quindi $g(w) = -\frac{a_n}{b_{n+1}} \frac{1}{w} (1 + \sigma(w^{-1}))$ che ha chiaramente $-\frac{a_n}{b_{n+1}}$ come residuo in zero.

3.7 Qualche applicazione dei teoremi dei residui

3.7.1 Proposizione. *Supponiamo che P e Q siano due polinomi tale che Q non ha radici reali e $\text{grado}(P) \leq \text{grado}(Q) - 2$. Siano z'_1, \dots, z'_k le radici di Q con parte immaginaria positiva e z''_1, \dots, z''_h le radici di Q con parte immaginaria negativa. Allora*

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P(x)}{Q(x)} dx = 2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) = -2\pi i \sum_{j=1}^h \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z''_j \right).$$

Dimostrazione. Per $R > 0$ consideriamo il “mezzo disco”

$$D_R^+ := \{z \in \mathbb{C} : \Im m(z) > 0, |z| < R\}$$

(vedi la figura 3.9 che ha come bordo la curva $\gamma_R = \gamma_{1,R} + \gamma_{2,R}$ dove $\gamma_{1,R}(t) = t$ per

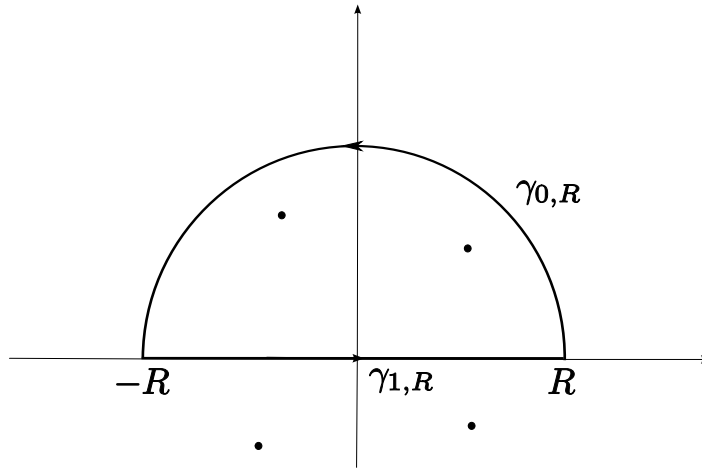


Figura 3.9: il mezzo disco

$-R \leq t \leq R$ (descrive il segmento $[-R, R]$) e $\gamma_{2,R}(t) = Re^{it}$ per $0 \leq t \leq \pi$ (descrive la semicirconferenza superiore di raggio R). Per R abbastanza grande tutti gli z'_j stanno in D_R^+ ; applicando il teorema dei residui

$$2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) = \int_{\partial D_R^+} \frac{P(z)}{Q(z)} dz = \int_{-R}^R \frac{P(x)}{Q(x)} dx + \int_{\gamma_{2,R}} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \quad (3.12)$$

Ma per l'ipotesi sui gradi si ha che esiste una costante M tale che, per $|z|$ sufficientemente grande, si ha $\left| \frac{P(z)}{Q(z)} \right| \leq \frac{M}{|z|^2}$. Dunque

$$\left| \int_{\gamma_{2,R}} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \right| \leq \frac{M}{R^2} l(\gamma_{2,R}) = \frac{M}{R^2} \pi R = \frac{M\pi}{R} \xrightarrow{R \rightarrow \infty} 0.$$

Ne segue la tesi andando al limite in (3.12).

Si poteva anche considerare il “mezzo disco inferiore”

$$D_R^- := \{z \in \mathbb{C} : \Im m(z) < 0, |z| < R\}$$

e con gli stessi calcoli, tenendo conto del fatto che l'orientamento del bordo di D_R^- porta a percorrere il segmento $[-R, R]$ in verso opposto a quello usuale, si ottiene la seconda formula. \square

3.7.2 Osservazione. Dall'enunciato precedente si deduce che

$$\sum_{j=1}^k \operatorname{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) + \sum_{j=1}^h \operatorname{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z''_j \right) = 0.$$

Questo è conseguenza del fatto che, se $\operatorname{grado}(P) \leq \operatorname{grado}(Q) - 2$, allora $\operatorname{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, \infty \right) = 0$, e dell'osservazione 3.6.9.

3.7.3 Esempio. Si ha

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^2}{1+x^4} dx = 2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{z^2}{1+z^4}, \frac{1+i}{\sqrt{2}} \right) + 2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{z^2}{1+z^4}, \frac{-1+i}{\sqrt{2}} \right) = \frac{\pi}{\sqrt{2}}.$$

Infatti se $f(z) := \frac{z^2}{1+z^4}$, allora f ha quattro poli semplici in $\frac{\pm 1 \pm i}{\sqrt{2}}$, e, calcolando i residui nei due poli con parte immaginaria positiva, si ha:

$$\begin{aligned} \operatorname{Res} \left(f, \frac{1+i}{\sqrt{2}} \right) &= \frac{z^2}{4z^3} \Big|_{z=\frac{1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{1}{4z} \Big|_{z=\frac{1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{\bar{z}}{4|z|^2} \Big|_{z=\frac{1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{1-i}{4\sqrt{2}} \\ \operatorname{Res} \left(f, \frac{-1+i}{\sqrt{2}} \right) &= \frac{z^2}{4z^3} \Big|_{z=\frac{-1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{1}{4z} \Big|_{z=\frac{-1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{\bar{z}}{4|z|^2} \Big|_{z=\frac{-1+i}{\sqrt{2}}} = \frac{-1-i}{4\sqrt{2}}, \end{aligned}$$

da cui la somma dei residui moltiplicata per $2\pi i$ dà:

$$2\pi i \left(\frac{1-i}{4\sqrt{2}} + \frac{-1-i}{4\sqrt{2}} \right) = 2\pi i \frac{-2i}{4\sqrt{2}} = \frac{\pi}{\sqrt{2}}.$$

3.7.4 Esempio. Si ha

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(x^2+2x+2)^2} dx = 2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{1}{(z^2+2z+2)^2}, -1+i \right) = \frac{\pi}{2}.$$

Infatti se $f(z) := \frac{1}{(z^2+2z+2)^2}$, allora f ha due poli doppi in $-1 \pm i$, e, calcolando il residuo nel polo $-1+i$, che è l'unico con parte immaginaria positiva, si ha:

$$\operatorname{Res}(f, -1+i) = h'(-1+i) \quad \text{dove } h(z) = \frac{1}{(z+1+i)^2} = (z+1+i)^{-2}$$

e $h'(z) = -2(z+1+i)^{-3}$ da cui

$$\operatorname{Res}(f, -1+i) = -2(-1+i+1)^{-3} = \frac{-2}{(2i)^3} = \frac{-2}{-8i} = \frac{1}{4i}$$

che moltiplicato per $2\pi i$ dà il risultato scritto sopra.

3.7.5 Definizione (integrale nel senso del valore principale). Sia $[a, b]$ un intervallo in \mathbb{R} . Dato un punto x_0 di $]a, b[$ e una funzione $f : [a, b] \setminus \{x_0\} \rightarrow \mathbb{C}$ che sia continua su $[a, b] \setminus \{x_0\}$, chiameremo *integrale nel senso del valore principale in x_0* di f su $[a, b]$ il limite:

$$(v.p.x_0) \int_a^b f(x) dx := \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_a^{x_0-\varepsilon} f(x) dx + \int_{x_0+\varepsilon}^b f(x) dx \right)$$

a patto che quest'ultimo esista. Più in generale, se $a < x_1 < \dots < x_n < b$ e $f : [a, b] \setminus \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow \mathbb{C}$ è continua su $[a, b] \setminus \{x_1, \dots, x_n\}$, chiameremo integrale nel senso del valore principale di f su $[a, b]$ l'espressione

$$(v.p.) \int_a^b f(x) dx := \sum_{j=1}^n (v.p.x_j) \int_{c_{j-1}}^{c_j} f(x) dx$$

dove $a = c_0 < x_1 < c_1 < x_2 < c_2 < \dots < c_{n-1} < x_n < c_n = b$. Non è difficile verificare che tale espressione, se esiste, non dipende dalla scelta dei punti intermedi c_j . Infine, se $x_1 < x_2 < \dots < x_n$ e se $f : \mathbb{R} \setminus \{x_1, \dots, x_n\} \rightarrow \mathbb{C}$ è continua chiameremo integrale nel senso del valore principale di f su \mathbb{R} l'espressione (sempre a patto che esista)

$$(v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx := \lim_{R \rightarrow +\infty} (v.p.) \int_{-R}^R f(x) dx.$$

3.7.6 Osservazione. La definizione di integrale nel senso del valore principale generalizza quella di *integrale improprio (o generalizzato) secondo Riemann*, in cui si richiede che esistano separatamente e siano finiti i limiti

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_a^{x_0 - \varepsilon} f(x) dx \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_{x_0 + \varepsilon}^b f(x) dx$$

(siamo nel primo caso, in cui c'è una sola singolarità) e si definisce l'integrale improprio mediante la somma dei due limiti sopra indicati. È evidente che se esiste l'integrale improprio allora esiste l'integrale nel senso del valore principale ed essi coincidono. Il viceversa non è vero. Se consideriamo $f : [-1, 1] \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{R}$, $f(x) = 1/x$, allora:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_{-1}^{-\varepsilon} \frac{1}{x} dx + \int_{\varepsilon}^1 \frac{1}{x} dx \right) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} (\ln(\varepsilon) - \ln(\varepsilon)) = 0.$$

Quindi $(v.p.) \int_{-1}^1 \frac{1}{x} dx = 0$ mentre

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_{-1}^{-\varepsilon} \frac{1}{x} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \ln(\varepsilon) = -\infty, \quad \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_{\varepsilon}^1 \frac{1}{x} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} (-\ln(\varepsilon)) = +\infty$$

e dunque l'integrale improprio non esiste. Si può anche vedere che il fatto di avere escluso un intervallo **simmetrico** è essenziale. Per esempio si ha:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \left(\int_{-1}^{-\varepsilon} \frac{1}{x} dx + \int_{2\varepsilon}^1 \frac{1}{x} dx \right) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} (\ln(\varepsilon) - \ln(2\varepsilon)) = -\ln(2).$$

che non è quanto trovato prima. In generale, se gli integrali esistono come integrali impropri, toglieremo $(v.p.)$ davanti al simbolo di integrale.

3.7.7 Osservazione. Supponiamo che z_0 sia un polo di ordine 1 per f e, per $\rho > 0$, consideriamo la curva $\gamma_\rho(t) := z_0 + \rho e^{it}$ per $0 \leq t \leq \pi$ ("mezza circonferenza" di centro z_0 e raggio ρ). Allora

$$\lim_{\rho \rightarrow 0^+} \int_{\gamma_\rho} f(z) dz = \pi i \operatorname{Res}(f, z_0)$$

Analogamente se f ha un polo di ordine 1 all'infinito si ha

$$\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{\gamma_R} f(z) dz = \pi i \operatorname{Res}(f, \infty)$$

dove $\gamma_R(t) = R e^{-it}$, per $0 \leq t \leq \pi$ ("mezza circonferenza" di centro 0 e raggio R , percorsa in senso orario).

Dimostrazione. Possiamo scrivere $f(z) = a_{-1}(z - z_0)^{-1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n(z - z_0)^n = a_{-1}(z - z_0)^{-1} + f_1(z)$, dove f_1 è olomorfa vicino a z_0 . Quindi

$$\int_{\gamma_\rho} f(z) dz = \int_0^\pi \left(\frac{a_{-1}}{\rho e^{it}} + f_1(z_0 + \rho e^{it}) \right) i \rho e^{it} dz = \pi i a_{-1} + i \rho \int_0^\pi f_1(z_0 + \rho e^{it}) e^{it} dz$$

Dato che f_1 è limitata vicino a z_0 si vede facilmente che, se ρ tende a zero, il secondo addendo sopra tende a zero, da cui la tesi. Il caso all'infinito si ottiene facilmente passando alla funzione g . \square

3.7.8 Proposizione. *Supponiamo che P e Q siano due polinomi tale che $\text{grado}(P) \leq \text{grado}(Q) - 1$. Siano z'_1, \dots, z'_k le radici di Q con parte immaginaria positiva, z''_1, \dots, z''_h le radici di Q con parte immaginaria negativa e x_1, \dots, x_l le radici reali. Supponiamo che tutte le radici reali siano semplici. Allora*

$$\begin{aligned} (v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P(x)}{Q(x)} dx = & 2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) + \pi i \sum_{j=1}^l \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, x_j \right) + \pi i \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, \infty \right) = \\ & -2\pi i \sum_{j=1}^h \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z''_j \right) - \pi i \sum_{j=1}^l \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, x_j \right) - \pi i \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, \infty \right) \end{aligned}$$

Si noti che, per le ipotesi sui gradi, ∞ è (al più) un polo semplice per $\frac{P}{Q}$; inoltre se $\text{grado}(P) \leq \text{grado}(Q) - 2$ il residuo all'infinito fa zero. Se poi non ci sono nemmeno le radici reali allora si può togliere (v.p.) e si ricade nel caso della 3.7.1

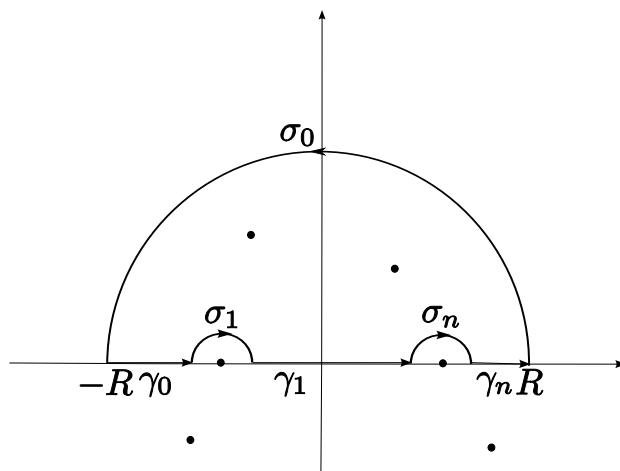


Figura 3.10: il mezzo disco ridotto

Dimostrazione. Consideriamo la curva $\gamma := \sigma_0 + \gamma_0 + \sigma_1 + \gamma_1 + \dots + \sigma_n + \gamma_n$ rappresentata nella figura 3.10 (con $n = 2$), dove R è sufficientemente grande in modo che tutti i poli con parte immaginaria maggiore o eguale siano contenuti nel mezzo disco di raggio $R - 1$ e dove le semicirconferenze $\sigma_1, \dots, \sigma_n$ hanno dei raggi $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$ sufficientemente piccoli

in modo da non intersecarsi tra loro ed essere contenuti nel mezzo disco di raggio R . Applicando il teorema dei residui

$$2\pi i \sum_{j=1}^k \operatorname{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) = \int_{\sigma_0} \frac{P(z)}{Q(z)} dz + \sum_{j=0}^n \int_{\gamma_j} \frac{P(z)}{Q(z)} dz + \sum_{j=0}^n \int_{\sigma_j} \frac{P(z)}{Q(z)} dz$$

Mandando a zero $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n$, per l'osservazione 3.7.7 (nota il verso delle curve) si ha

$$\int_{\sigma_j} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \rightarrow -\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{P}{Q}, x_j \right) \quad j = 1, \dots, n,$$

e per la definizione di integrale nel senso del valore principale

$$\sum_{j=0}^n \int_{\gamma_j} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \rightarrow (v.p.) \int_{-R}^R \frac{P(x)}{Q(x)} dx$$

da cui

$$2\pi i \sum_{j=1}^k \operatorname{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) + \pi i \sum_{j=1}^h \operatorname{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)}, x_j \right) = (v.p.) \int_{-R}^R \frac{P(x)}{Q(x)} dx + \int_{\sigma_0} \frac{P(z)}{Q(z)} dz.$$

Mandando R all'infinito si ottiene la tesi dato che, sempre per la 3.7.7

$$\int_{\sigma_0} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \rightarrow -\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{P}{Q}, \infty \right).$$

Anche in questo caso si può ragionare nel semipiano inferiore, ottenendo la seconda formula. \square

3.7.9 Esempio. Facciamo vedere che

$$(v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x}{x^2 + 2x + 2} dx = -\pi.$$

Infatti, posto $f(z) := \frac{z}{z^2 + 2z + 2}$, si vede che f ha due poli semplici in $-1 \pm i$ (nessuno reale) e che f ha un polo semplice all'infinito dato che lo scarto dei gradi tra numeratore e denominatore è uno. Si ha

$$\begin{aligned} \operatorname{Res}(f, -1 + i) &= \left. \frac{z}{2z + 2} \right|_{z=-1+i} = \frac{-1+i}{2i} = \frac{-1}{2i} + \frac{1}{2}, \\ \operatorname{Res}(f, \infty) &= -1 \end{aligned}$$

(il residuo all'infinito è stato calcolato usando l'osservazione 3.6.10). Dunque l'integrale richiesto fa

$$2\pi i \left(\operatorname{Res}(f, -1 + i) + \frac{1}{2} \operatorname{Res}(f, \infty) \right) = 2\pi i \left(\frac{-1}{2i} + \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \right) = -\pi.$$

3.7.10 Esempio. Facciamo vedere che

$$(v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{x(x^2 + 2x + 2)} dx = -\frac{\pi}{2}.$$

Infatti, posto $f(z) := \frac{1}{z(z^2 + 2z + 2)}$, si vede che f ha tre poli semplici in $-1 \pm i$ (non reali) e 0 (reale), mentre f è olomorfa all'infinito dato che lo scarto dei gradi tra numeratore e denominatore è tre. Si ha

$$\begin{aligned} \operatorname{Res}(f, -1 + i) &= \frac{1}{z(z + 1 + i)} \Big|_{z=-1+i} = \frac{1}{(-1 + i)2i} = \frac{1}{2(-1 - i)} = \frac{-1 + i}{4}, \\ \operatorname{Res}(f, 0) &= \frac{1}{z^2 + 2z + 2} \Big|_{z=0} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Dunque l'integrale richiesto fa

$$2\pi i \left(\operatorname{Res}(f, -1 + i) + \frac{1}{2} \operatorname{Res}(f, 0) \right) = 2\pi i \left(\frac{-1 + i}{4} + \frac{1}{4} \right) = -\frac{\pi}{2}.$$

3.7.11 Proposizione. *Supponiamo che P e Q siano due polinomi tale che $\operatorname{grado}(P) \leq \operatorname{grado}(Q) - 1$. Siano z'_1, \dots, z'_k le radici di Q con parte immaginaria positiva, z''_1, \dots, z''_h le radici di Q con parte immaginaria negativa e x_1, \dots, x_l le radici reali. Supponiamo che tutte le radici reali siano semplici. Sia inoltre a un numero reale. Allora*

$$(v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{iaz} P(x)}{Q(x)} dx = \begin{cases} 2\pi i \sum_{j=1}^k \operatorname{Res}(f, z'_j) + \pi i \sum_{j=1}^l \operatorname{Res}(f, x_j) & \text{se } a > 0 \\ -2\pi i \sum_{j=1}^h \operatorname{Res}(f, z''_j) - \pi i \sum_{j=1}^l \operatorname{Res}(f, x_j) & \text{se } a < 0. \end{cases}$$

dove abbiamo posto $f(z) := \frac{e^{iaz} P(z)}{Q(z)}$.

Dimostrazione. Consideriamo $a > 0$. Usando le stesse curve del teorema precedente si arriva a

$$\begin{aligned} 2\pi i \sum_{j=1}^k \operatorname{Res} \left(e^{iaz} \frac{P(z)}{Q(z)}, z'_j \right) + \pi i \sum_{j=1}^l \operatorname{Res} \left(e^{iaz} \frac{P(z)}{Q(z)}, x_j \right) = \\ (v.p.) \int_{-R}^R \frac{e^{iax} P(x)}{Q(x)} dx + \int_{\sigma_0} e^{iaz} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \end{aligned}$$

Per le ipotesi sui gradi si ha $\left| \frac{P(z)}{Q(z)} \right| \leq \frac{M}{|z|}$ per un'opportuna costante M e $|z|$ abbastanza grande; ne ricaviamo che, essendo $a > 0$, si ha:

$$\begin{aligned} \left| \int_{\sigma_0} e^{iaz} \frac{P(z)}{Q(z)} dz \right| &= \left| \int_0^\pi e^{ia(Re^{it})} \frac{P(Re^{it})}{Q(Re^{it})} iRe^{it} dt \right| \leq \\ &M \int_0^\pi e^{\Re(iaRe^{it})} dt = M \int_0^\pi e^{-aR \sin(t)} dt \end{aligned}$$

Si può vedere (usando ad esempio il teorema di Lebesgue riportato nel capitolo seguente) che l'ultimo integrale tende a zero (anche se l'integrando non tende uniformemente a zero) per $R \rightarrow \infty$. Da questo segue la tesi. Quando $a < 0$ si usa lo stesso ragionamento nel semipiano inferiore usando la curva coniugata e tenendo conto del cambio di verso. \square

3.7.12 Esempio. Calcoliamo

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{e^{2ix}}{1+x^2} dx =: (*).$$

Tale integrale esiste nel senso dell'integrale improprio secondo Riemann, perché e^{2ix} è limitata e $\frac{1}{1+x^2}$ è dell'ordine di $1/x^2$ all'infinito e quindi non occorre scrivere (v.p.). Appliciamo la proposizione 3.7.11. Dato che l'integrando ha un unico polo semplice con parte immaginaria positiva, cioè $z = i$, si ha:

$$(*) = 2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{e^{2iz}}{1+z^2}, i \right) = 2\pi i \left. \frac{e^{2iz}}{2z} \right|_{z=i} = 2\pi i \frac{e^{-2}}{2i} = \frac{\pi}{e^2}.$$

Con questo calcolo, passando alla parte reale e alla parte immaginaria, abbiamo trovato che:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(2x)}{1+x^2} dx = \frac{\pi}{e^2}, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(2x)}{1+x^2} dx = 0.$$

Notiamo che il fatto che il secondo integrale faccia zero si poteva vedere subito dato che l'integrando è dispari.

3.7.13 Esempio. Facciamo vedere che

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(x)}{x} dx = \pi.$$

Poniamo per questo $f(z) := \frac{e^{iz}}{z}$. Questa funzione verifica le condizioni della proposizione 3.7.11 ($a = 1$) Essa ha solo un polo semplice in $z = 0$ per cui

$$(v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = \pi i \operatorname{Res}(f, 0) = \pi i \left. e^{iz} \right|_{z=0} = \pi.$$

Passando alla parte reale e alla parte immaginaria si ottiene

$$(v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos(x)}{x} dx = 0, \quad (v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin(x)}{x} dx = \pi.$$

Peraltro nel secondo integrale la funzione integranda è continua anche in zero (a causa del $\sin(x)$) e quindi l'integrale vicino a zero esiste secondo Riemann. Inoltre essendo f una funzione pari si ha

$$\int_0^c f(x) dx = \frac{1}{2} \int_{-c}^c f(x) dx \Rightarrow \lim_{c \rightarrow +\infty} \int_0^c f(x) dx = \frac{\pi}{2}$$

e questo mostra che f è integrabile in senso improprio secondo Riemann, dunque possiamo togliere (v.p.) dal simbolo del secondo integrale.

3.7.14 Esempio. Calcoliamo

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x \sin(x)}{x^2 + 2x + 2} dx.$$

Poniamo per questo $f(z) := \frac{ze^{iz}}{z^2 + 2z + 2}$. Questa funzione verifica le condizioni della proposizione 3.7.11 ($a = 1$) Essa ha due poli semplici in $z = -1 \pm i$ (nessuno reale) per cui

$$\begin{aligned} (v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx &= 2\pi i \operatorname{Res}(f, -1+i) = 2\pi i \left. \frac{ze^{iz}}{2z+2} \right|_{z=-1+i} = \\ &= 2\pi i \frac{(-1+i)e^{i(-1+i)}}{-2+2i+2} = \pi(-1+i)e^{-1-i} = \pi(-1+i)e^{-1}(\cos(1) - i\sin(1)) = \\ &= \frac{\pi}{e} [((- \cos(1) + \sin(1)) + i(\cos(1) + \sin(1)))] . \end{aligned}$$

Prendendo parte reale e parte immaginaria si ottiene

$$\begin{aligned} (v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x \cos(x)}{x^2 + 2x + 2} dx &= \frac{\pi}{e} (-\cos(1) + \sin(1)), \\ (v.p.) \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x \sin(x)}{x^2 + 2x + 2} dx &= \frac{\pi}{e} (\cos(1) + \sin(1)). \end{aligned}$$

Si potrebbe vedere (vedi l'osservazione 3.7.15 che segue) che in questo caso entrambi gli integrali sopra sono convergenti in senso improprio secondo Riemann e dunque possiamo togliere (v.p.).

3.7.15 Osservazione. Se $f(x) := \frac{P(x)}{Q(x)} \sin(ax)$ con $\operatorname{grado}(P) = \operatorname{grado}(Q) - 1$ e $a > 0$ allora f è integrabile in senso improprio a $+\infty$ e a $-\infty$, cioè esistono finiti

$$\int_{c_0}^{+\infty} f(x) dx := \lim_{c \rightarrow +\infty} \int_{c_0}^c f(x) dx, \quad \int_{-\infty}^{-c_0} f(x) dx := \lim_{c \rightarrow -\infty} \int_c^{-c_0} f(x) dx$$

dove c_0 è scelto in modo che tutte le radici di Q siano in $[-c_0, c_0]$. Vediamo per esempio che esiste il primo integrale. Fissiamo $c > c_0$; integrando per parti:

$$\int_{c_0}^c f(x) dx = \underbrace{\left[\frac{P(x) \cos(ax)}{Q(x) - a} \right]_{c_0}^c}_{(1)} + \underbrace{\int_{c_0}^c \left(\frac{d}{dx} \frac{P(x)}{Q(x)} \right) \frac{\cos(ax)}{a} dx}_{(2)}$$

Dato che $\frac{P(x)}{Q(x)} \rightarrow 0$ all'infinito e che $\cos(ax)$ è limitato, si ha:

$$(1) \rightarrow \frac{P(c_0) \cos(ac_0)}{Q(c_0) - a} \quad \text{per } c \rightarrow +\infty.$$

Per quanto riguarda il secondo pezzo si può verificare che $\frac{d}{dx} \frac{P(x)}{Q(x)}$ è rapporto di due polinomi con differenza di gradi pari a due (nota che derivando $1/x$ si ottiene $-1/x^2$). Allora

$$(2) \rightarrow \int_{c_0}^{+\infty} \left(\frac{d}{dx} \frac{P(x)}{Q(x)} \right) \frac{\cos(ax)}{a} dx \quad \text{per } c \rightarrow +\infty$$

dove quest'ultimo integrale ha perfettamente senso perché appunto il termine che moltiplica $\cos(ax)$ è dell'ordine di $\frac{1}{x^2}$. Dunque $\int_{c_0}^c f(x) dx$ ha limite finito come volevamo dimostrare.

La stessa proprietà vale se nella definizione di f si mette $\cos(ax)$ invece di $\sin(ax)$.

La funzione f è il tipico esempio di funzione che è integrabile in senso improprio secondo Riemann, senza essere assolutamente integrabile: si può infatti verificare che $\int_{c_0}^{+\infty} |f(x)| dx = +\infty$. Questo pone comunque dei problemi, si vedrà infatti che f non è integrabile secondo Lebesgue.

3.7.16 Proposizione. *Siano P e Q due polinomi e sia α un numero reale non intero.*

Poniamo $f(x) := x^\alpha \frac{P(x)}{Q(x)}$ per $x > 0$ e supponiamo che

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} x f(x) = 0, \quad \lim_{x \rightarrow +\infty^+} x f(x) = 0.$$

Siano z_1, \dots, z_k le radici di Q e supponiamo che $z_j \notin [0, +\infty[$ per ogni j . Allora

$$\int_0^{+\infty} f(x) dx = \int_0^{+\infty} x^\alpha \frac{P(x)}{Q(x)} dx = \frac{2\pi i}{1 - e^{2\alpha\pi i}} \sum_{j=1}^k \text{Res}(f, z_j)$$

dove per calcolare i residui di f dobbiamo definire $f(z) := z^\alpha \frac{P(x)}{Q(x)}$ usando la determinazione di z^α data da $(\rho e^{i\theta})^\alpha := \rho^\alpha e^{i\alpha\theta}$ per $0 < \theta < 2\pi$. Tale funzione f non è definita sui numeri reali positivi, ma questo non ha rilevanza per il calcolo dei residui.

Dimostrazione. Scegliamo la determinazione di z^α e $f(z)$ come detto sopra. È chiaro che f è olomorfa su $\mathbb{C} \setminus (\{z_1, \dots, z_k\} \cup [0, +\infty[)$. Se x è un numero reale positivo

$$\lim_{z \rightarrow x, \Im m(z) > 0} f(z) = f(x), \quad \lim_{z \rightarrow x, \Im m(z) < 0} f(z) = \frac{P(x)}{Q(x)} \lim_{\theta \rightarrow 2\pi, \rho \rightarrow x} \rho^\alpha e^{i\alpha\theta} = e^{2\alpha\pi i} f(x)$$

Consideriamo il cammino $\gamma_{R,r}$ rappresentato nella figura 3.11. Per R grande ed r piccolo,

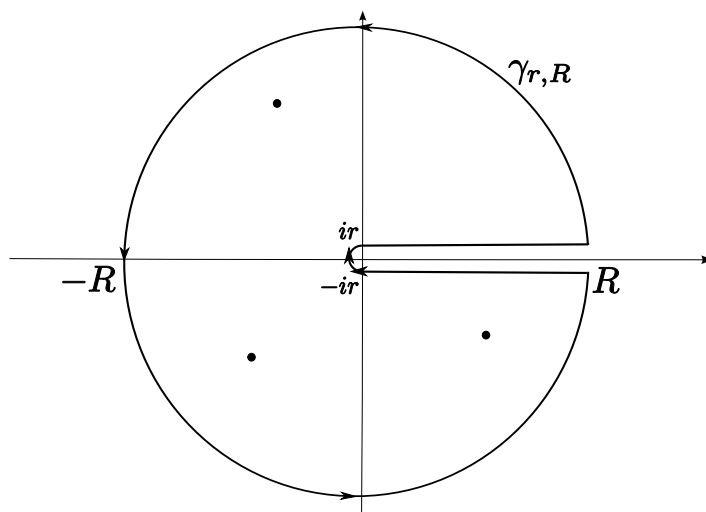


Figura 3.11: il “pacman”

la curva “allaccia” tutti gli z_j . Applicando il teorema dei residui.

$$2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res}(f, z_j) = \int_{\gamma_{R,r}} f(z) dz.$$

Facendo tendere r a zero si ottiene

$$2\pi i \sum_{j=1}^k \operatorname{Res}(f, z_j) = \int_{\partial B(0,R)} f(z) dz + \int_0^R f(x) dx + \int_R^0 e^{2\alpha\pi i} f(x) dx =$$

$$\int_{\partial B(0,R)} f(z) dz + (1 - e^{2\alpha\pi i}) \int_0^R f(x) dx$$

Mandando $R \rightarrow +\infty$ l'integrale su $\partial B(0, R)$ tende a zero a causa dell'andamento di f all'infinito, e dunque si ottiene la tesi. \square

3.7.17 Esempio. Calcoliamo

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sqrt{x}}{1+x^2} dx =: (*).$$

Applicando il risultato della proposizione 3.7.16 con $\alpha = 1/2$ si ha che, posto $f(z) := \frac{\sqrt{z}}{1+z^2}$, risulta:

$$(*) = \frac{2\pi i}{1 - e^{\pi i}} (\operatorname{Res}(f, i) + \operatorname{Res}(f, -i)) = \pi i \left(\frac{\sqrt{z}}{2z} \Big|_{z=i} + \frac{\sqrt{z}}{2z} \Big|_{z=-i} \right) =: (**).$$

Per calcolare $(**)$ conviene mettere i e $-i$ in forma polare e ricordare che stiamo usando la determinazione della radice che usa come argomento l'argomento principale. Dunque se $z = i = e^{\frac{\pi}{2}i}$ si ha $\sqrt{z} = e^{\frac{\pi}{4}i}$, mentre se $z = -i = e^{3\frac{\pi}{2}i}$ si ha $\sqrt{z} = e^{3\frac{\pi}{4}i}$. Ne segue

$$(**) = \frac{\pi i}{2} \left(\frac{e^{\frac{\pi}{4}i}}{e^{\frac{\pi}{2}i}} + \frac{e^{3\frac{\pi}{4}i}}{e^{3\frac{\pi}{2}i}} \right) = \frac{\pi}{2} e^{\frac{\pi}{2}i} (e^{-\frac{\pi}{4}i} + e^{-3\frac{\pi}{4}i}) =$$

$$\frac{\pi}{2} (e^{\frac{\pi}{4}i} + e^{-\frac{\pi}{4}i}) = \frac{\pi}{2} 2\Re(e^{\frac{\pi}{4}i}) = \pi \cos(\pi/4) = \pi \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

3.7.18 Esempio. Calcoliamo

$$\int_0^{+\infty} \frac{1}{\sqrt[3]{x}(1+x^2)} dx =: (*).$$

Stavolta $\alpha = -1/3$ e $f(z) := \frac{1}{\sqrt[3]{z}(1+z^2)}$. Risulta:

$$(*) = \frac{2\pi i}{1 - e^{-\frac{2\pi}{3}i}} (\operatorname{Res}(f, i) + \operatorname{Res}(f, -i)) =$$

$$\frac{2\pi i(1 - e^{\frac{2\pi}{3}i})}{(1 - e^{-\frac{2\pi}{3}i})(1 - e^{\frac{2\pi}{3}i})} \left(\frac{1}{\sqrt[3]{z}2z} \Big|_{z=i} + \frac{1}{\sqrt[3]{z}2z} \Big|_{z=-i} \right) =$$

$$\frac{\pi i(1 - e^{\frac{2\pi}{3}i})}{1 - e^{-\frac{2\pi}{3}i} - e^{\frac{2\pi}{3}i} + 1} \left(e^{-\left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{2}\right)i} + e^{-\left(\frac{\pi}{2} + \frac{3\pi}{2}\right)i} \right) = \frac{\pi i(1 - e^{\frac{2\pi}{3}i})(e^{-\frac{2\pi}{3}i} + 1)}{2(1 - \cos(2\pi/3))} =$$

$$\frac{\pi i(e^{-\frac{2\pi}{3}i} + 1 - 1 - e^{\frac{2\pi}{3}i})}{2(1 - (-1/2))} = \frac{\pi i 2i \Im(e^{-\frac{2\pi}{3}i})}{3} =$$

$$\frac{\pi(-2) \sin(-2\pi/3)}{3} = \frac{2\pi \sin(2\pi/3)}{3} = \frac{2\pi \frac{\sqrt{3}}{2}}{3} = \frac{\pi\sqrt{3}}{3}.$$

3.7.19 Esempio. Calcoliamo

$$\int_0^{+\infty} \frac{\sqrt{x}}{(1+x^4)} dx =: (*).$$

In questo caso $\alpha = 1/2$ e $f(z) := \frac{\sqrt{z}}{(1+z^4)}$. Risulta:

$$\begin{aligned} (*) &= \pi i \left(\operatorname{Res}(f, e^{\frac{\pi}{4}i}) + \operatorname{Res}(f, e^{\frac{3\pi}{4}i}) + \operatorname{Res}(f, e^{\frac{5\pi}{4}i}) + \operatorname{Res}(f, e^{\frac{7\pi}{4}i}) \right) = \\ &= \pi i \left(\frac{\sqrt{z}}{4z^3} \Big|_{z=e^{\frac{\pi}{4}i}} + \frac{\sqrt{z}}{4z^3} \Big|_{z=e^{\frac{3\pi}{4}i}} + \frac{\sqrt{z}}{4z^3} \Big|_{z=e^{\frac{5\pi}{4}i}} + \frac{\sqrt{z}}{4z^3} \Big|_{z=e^{\frac{7\pi}{4}i}} \right) = \\ &= \frac{\pi}{4} e^{\frac{\pi}{2}i} \left(\frac{e^{\frac{\pi}{8}i}}{e^{\frac{3\pi}{4}i}} + \frac{e^{\frac{3\pi}{8}i}}{e^{\frac{9\pi}{4}i}} + \frac{e^{\frac{5\pi}{8}i}}{e^{\frac{15\pi}{4}i}} + \frac{e^{\frac{7\pi}{8}i}}{e^{\frac{21\pi}{4}i}} \right) = \frac{\pi}{4} e^{\frac{\pi}{2}i} \left(e^{-\frac{5\pi}{8}i} + e^{-\frac{15\pi}{8}i} + e^{-\frac{25\pi}{8}i} + e^{-\frac{35\pi}{8}i} \right) = \\ &= \frac{\pi}{4} \left(e^{-\frac{\pi}{8}i} + e^{-\frac{11\pi}{8}i} + e^{-\frac{21\pi}{8}i} + e^{-\frac{31\pi}{8}i} \right) = \frac{\pi}{4} \left(e^{-\frac{\pi}{8}i} + e^{\frac{5\pi}{8}i} + e^{-\frac{5\pi}{8}i} + e^{\frac{\pi}{8}i} \right) = \\ &= \frac{\pi}{2} \left(\cos\left(\frac{\pi}{8}\right) + \cos\left(\frac{5\pi}{8}\right) \right) = \frac{\pi}{2} \left(\cos\left(\frac{\pi}{8}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{8}\right) \right) = \frac{\pi}{2} \cos\left(\frac{\pi}{8}\right) \left(1 - \tan\left(\frac{\pi}{8}\right) \right). \end{aligned}$$

Vediamo ora un modo di utilizzare i residui per calcolare la somma di alcune serie.

3.7.20 Lemma. Sia $0 \leq a \leq 2\pi$. Per $n \in \mathbb{N}$ consideriamo il quadrato Q_n in \mathbb{C} di vertici $\pm(n+1/2) \pm (n+1/2)i$ (vedi la figura). Allora esiste una costante C tale che

$$\left| \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} \right| \leq C \quad \forall z \in \partial Q_n, \forall n.$$

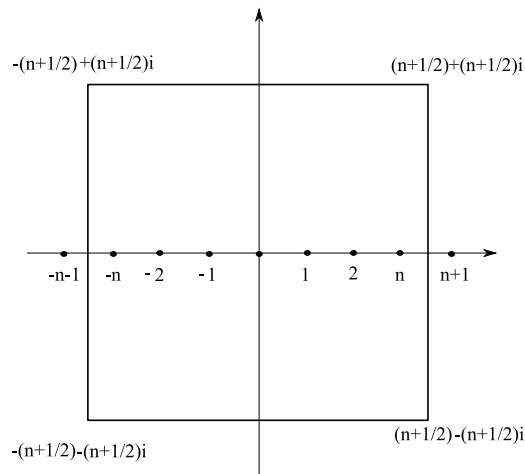


Figura 3.12: il quadrato Q_n

Dimostrazione. Il bordo di Q_n è composto dai quattro lati $L_n^{(o,\pm)}$ e $L_n^{(v,\pm)}$:

$$\begin{aligned} L_n^{(o,\pm)} &:= \{x \pm (n+1/2)i : -(n+1/2) \leq x \leq (n+1/2)\}, \\ L_n^{(v,\pm)} &:= \{\pm(n+1/2) + iy : -(n+1/2) \leq y \leq (n+1/2)\}. \end{aligned}$$

Dimostriamo la limitatezza sul lato orizzontale $L_n^{o,+}$: se $z = x + iy$ con $-(n + 1/2) \leq x \leq (n + 1/2)$ e $y = (n + 1/2)$ si ha:

$$\left| \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} \right| = \left| \frac{e^{iax} e^{-a(n+1/2)}}{e^{2\pi ix} e^{-2\pi(n+1/2)} - 1} \right| \leq \frac{e^{-a(n+1/2)}}{1 - e^{-2\pi(n+1/2)}} =: C_n^+.$$

Si vede allora che

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} C_n^+ = \begin{cases} 0 & \text{se } a \neq 0 \\ 1 & \text{se } a = 0 \end{cases}, \quad \lim_{n \rightarrow -\infty} C_n^+ = \begin{cases} 0 & \text{se } a \neq 2\pi \\ 1 & \text{se } a = 2\pi, \end{cases}$$

e dunque C_n^+ è limitata. Si noti che, se $0 \geq a < 2\pi$, $C_n^+ \rightarrow 0$ per $n \rightarrow \pm\infty$. Consideriamo $L_n^{o,-}$; stavolta dobbiamo prendere $z = x + iy$ con $-(n + 1/2) \leq x \leq (n + 1/2)$ e $y = -(n + 1/2)$. Si ha:

$$\left| \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} \right| = \left| \frac{e^{iax} e^{a(n+1/2)y}}{e^{2\pi ix} e^{2\pi(n+1/2)y} - 1} \right| = \left| \frac{e^{iax} e^{(a-2\pi)(n+1/2)}}{e^{2\pi ix} - e^{-2\pi(n+1/2)}} \right| \leq \frac{e^{(a-2\pi)(n+1/2)}}{1 - e^{-2\pi(n+1/2)}} =: C_n^-$$

e ragionando come per C_n^+ si vede che C_n^- è limitato, anzi tende a zero se $0 < a \leq 2\pi$. Consideriamo ora i lati verticali $L_n^{v,\pm}$ in cui $z = x + iy$ con $x = \pm(n + 1/2)$ e $-(n + 1/2) \leq y \leq (n + 1/2)$. Dato che $e^{\pm 2\pi i(n+1/2)} = e^{\pm \pi i} = -1$ si ha:

$$\left| \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} \right| = \left| \frac{e^{\pm ia(n+1/2)} e^{-ay}}{e^{\pm 2\pi i(n+1/2)} e^{-2\pi y} - 1} \right| = \frac{e^{-ay}}{e^{-2\pi y} + 1} =: C(y)$$

e si vede ancora facilmente che $C(y)$ è limitata (su tutto \mathbb{R}). Si può anche notare che, se $0 < a < 2\pi$, allora la funzione $C(y)$ è integrabile su \mathbb{R} . \square

3.7.21 Proposizione. *Sia $0 \leq a \leq 2\pi$. Siano P e Q due polinomi tali che $\text{grado}(P) \leq \text{grado}(Q) - 2$ e siano z_1, \dots, z_k le radici di Q . Allora*

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}, Q(n) \neq 0} \frac{P(n)}{Q(n)} e^{ian} = -2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1}, z_j \right).$$

Dimostrazione. Per l'ipotesi sui gradi possiamo trovare una costante M tale che

$$\left| \frac{P(z)}{Q(z)} \right| \leq \frac{M}{|z|^2} \quad \text{per } |z| \text{ grande;}$$

in particolare la serie scritta sopra converge assolutamente. Consideriamo il quadrato Q_n definito prima e prendiamo n in modo che Q_n contenga tutti gli z_j . Consideriamo la funzione $g(z) := \frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1}$; tale funzione è olomorfa in tutto \mathbb{C} tranne $\{z_1, \dots, z_k\} \cup \mathbb{Z}$. Applicando il teorema dei residui:

$$\int_{\partial Q_n} g(z) dz = 2\pi i \left(\sum_{j=1}^k \text{Res}(g, z_j) + \sum_{|h| \leq n, Q(n) \neq 0} \text{Res}(g, h) \right) \quad (3.13)$$

(le radici di Q che sono anche degli interi le mettiamo nella prima sommatoria e non nella seconda). L'integrale scritto a sinistra tende a zero per $n \rightarrow \infty$, infatti se $z \in \partial Q_n$ si ha $|z| \geq (n + 1/2)$ e quindi

$$\left| \int_{\partial Q_n} g(z) dz \right| \leq \frac{M}{(n + 1/2)^2} Cl(\partial Q_n) = \frac{8MC}{(n + 1/2)} \rightarrow 0$$

(la lunghezza di ∂Q_n vale $8(n + 1/2) - C$ è la costante del lemma 3.7.20). Inoltre

$$\text{Res}(g, h) = \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1}, h \right) = \frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{2\pi i e^{2\pi iz}}, hT \Big|_{z=h} = \frac{P(h)}{Q(h)} \frac{e^{iah}}{2\pi i}.$$

Mettendo questi fatti in 3.13 e andando al limite per $n \rightarrow +\infty$ si ottiene la tesi. \square

In realtà, a patto di scrivere bene la tesi, si può anche considerare il caso in cui la differenza dei gradi sia 1. Analogamente a quanto fatto per gli integrali bisogna introdurre il valore principale di una serie:

3.7.22 Definizione. Se $(a_n)_{n \in \mathbb{Z}}$ è una successione con indici in \mathbb{Z} , chiamiamo *valore principale della serie degli a_n* il seguente limite (se esiste)

$$(v.p.) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} a_n := \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=-n}^n a_k.$$

3.7.23 Proposizione. Sia $0 < a < 2\pi$. Siano P e Q due polinomi tali che $\text{grado}(P) \leq \text{grado}(Q) - 1$ e siano z_1, \dots, z_k le radici di Q . Allora

$$(v.p.) \sum_{n \in \mathbb{Z}, Q(n) \neq 0} \frac{P(n)}{Q(n)} e^{ian} = -2\pi i \sum_{j=1}^k \text{Res} \left(\frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1}, z_j \right).$$

Dimostrazione. Per la dimostrazione si ripetono gli stessi ragionamenti del caso precedente e si riesce a concludere se si riesce a dimostrare che $\int_{\partial Q_n} \frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} dz \rightarrow 0$ avendo a disposizione solo che

$$\left| \frac{P(z)}{Q(z)} \right| \leq \frac{M}{|z|} \quad \text{per } |z| \text{ grande.}$$

Per trovare ciò notiamo che, usando le costanti indicate nella dimostrazione di 3.7.20

$$\begin{aligned} \left| \int_{L^{\circ,+}} \frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} dz \right| &\leq \frac{M}{(n + 1/2)} 2(n + 1/2) C_n^+ \rightarrow 0, \\ \left| \int_{L^{\circ,-}} \frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} dz \right| &\leq \frac{M}{(n + 1/2)} 2(n + 1/2) C_n^- \rightarrow 0, \\ \left| \int_{L^{v,\pm}} \frac{P(z)}{Q(z)} \frac{e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} dz \right| &\leq \frac{M}{(n + 1/2)} \int_{-n-1/2}^{n+1/2} C(y) dy \rightarrow 0 \end{aligned}$$

($0 < a < 2\pi$!) dove l'ultimo limite è conseguenza del fatto che $\int_{-\infty}^{+\infty} C(y) dy < +\infty$. \square

3.7.24 Esempio. Siano $P(z) := 1$ e $Q(z) := z^2 + 1$. Allora se $0 \leq a \leq 2\pi$ si ha:

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{e^{ina}}{n^2 + 1} &= -2\pi i \left(\text{Res} \left(\frac{e^{iaz}}{(z^2 + 1)(e^{2\pi iz} - 1)}, i \right) + \text{Res} \left(\frac{e^{iaz}}{(z^2 + 1)(e^{2\pi iz} - 1)}, -i \right) \right) = \\ &= -2\pi i \left(\frac{e^{iaz}}{2z(e^{2\pi iz} - 1)} \Big|_{z=i} + \frac{e^{iaz}}{2z(e^{2\pi iz} - 1)} \Big|_{z=-i} \right) = -\pi \left(\frac{e^{-a}}{(e^{-2\pi} - 1)} - \frac{e^a}{(e^{2\pi} - 1)} \right) = \\ &= \pi \frac{e^a(e^{-2\pi} - 1) - e^{-a}(e^{2\pi} - 1)}{(e^{-2\pi} - 1)(e^{2\pi} - 1)} = \pi \frac{e^{a-2\pi} - e^a - e^{2\pi-a} + e^{-a}}{2 - e^{-2\pi} - e^{2\pi}} = \pi \frac{\sinh(2\pi - a) + \sinh(a)}{\cosh(2\pi) - 1}. \end{aligned}$$

In particolare, prendendo $a = 0$ (e sfruttando la parità di $n^2 + 1$)

$$2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2 + 1} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{n^2 + 1} + 1 = \pi \frac{\sinh(2\pi)}{\cosh(2\pi) - 1} + 1$$

da cui:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n^2 + 1} = \frac{\pi}{2} \frac{\sinh(2\pi)}{\cosh(2\pi) - 1} + \frac{1}{2}.$$

Se invece si prende $a = \pi$

$$2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2 + 1} = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-1)^n}{n^2 + 1} + 1 = \pi \frac{2 \sinh(\pi)}{\cosh(2\pi) - 1} + 1$$

da cui:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2 + 1} = \pi \frac{\sinh(\pi)}{\cosh(2\pi) - 1} + \frac{1}{2}.$$

3.7.25 Esempio. Siano $P(z) := 1$ e $Q(z) := z^2$. Allora per ogni a con $0 \leq a \leq 2\pi$ si ha:

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{e^{ina}}{n^2} = -2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{e^{iaz}}{z^2(e^{2\pi iz} - 1)}, 0 \right) = -\operatorname{Res}(f, 0) \quad \text{dove } f(z) := \frac{2\pi i e^{iaz}}{z^2(e^{2\pi iz} - 1)}.$$

Lo zero è (purtroppo) un polo triplo per la funzione f e la parte analitica di f è

$$h(z) := \frac{2\pi iz e^{iaz}}{e^{2\pi iz} - 1} = \frac{e^{iaz}}{g(2\pi iz)} = \frac{e^{iaz}}{\tilde{g}(z)} = e^{iaz} \tilde{g}(z)^{-1},$$

dove abbiamo posto $g(z) := \frac{e^z - 1}{z}$ e $\tilde{g}(z) = g(2\pi iz)$.

Per trovare il residuo in zero dobbiamo calcolare $h''(0)/2$. Per questo calcoliamo le derivate di g in zero; dato che

$$g(z) = \frac{1}{z} \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!} - 1 \right) = \frac{1}{z} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n!} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^{n-1}}{n!} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{(n+1)!}.$$

si deduce che

$$g^{(k)}(0) = \frac{k!}{(k+1)!} = \frac{1}{k+1} \Leftrightarrow \tilde{g}^{(k)}(0) = \frac{(2\pi i)^k}{k+1}. \quad (3.14)$$

Allora in particolare:

$$\tilde{g}(0) = 1, \quad \tilde{g}'(0) = \frac{2\pi i}{2} = \pi i, \quad \tilde{g}''(0) = -\frac{4\pi^2}{3}.$$

Ne segue che

$$\begin{aligned} h'(z) &= ia e^{iaz} \tilde{g}(z)^{-1} - e^{iaz} \tilde{g}'(z) \tilde{g}(z)^{-2}, \\ h''(z) &= (ia)^2 e^{iaz} \tilde{g}(z)^{-1} - ia e^{iaz} \tilde{g}'(z) \tilde{g}(z)^{-2} - ia e^{iaz} \tilde{g}'(z) \tilde{g}(z)^{-2} - e^{iaz} \tilde{g}''(z) \tilde{g}(z)^{-2} + \\ &\quad 2e^{iaz} \tilde{g}'(z)^2 \tilde{g}(z)^{-3} = e^{iaz} [-a^2 \tilde{g}(z)^{-1} - (2ia \tilde{g}'(z) + \tilde{g}''(z)) \tilde{g}(z)^{-2} + 2\tilde{g}'(z)^2 \tilde{g}(z)^{-3}] \end{aligned}$$

Allora:

$$h''(0) = -a^2 - \left(2ia\pi i - \frac{4\pi^2}{3} \right) + 2(\pi i)^2 = -a^2 + 2\pi a - \frac{2\pi^2}{3}.$$

da cui:

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{e^{ina}}{n^2} = -\frac{h''(0)}{2} = \frac{a^2}{2} - \pi a + \frac{\pi^2}{3} \quad \forall a \in [0, 2\pi].$$

Notiamo che

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{e^{ina}}{n^2} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{ina}}{n^2} + \frac{e^{-ina}}{n^2} \right) = 2 \sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{\cos(na)}{n^2},$$

e quindi il risultato trovato sopra si può esprimere:

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{\cos(na)}{n^2} = \frac{a^2}{4} - \frac{\pi a}{2} + \frac{\pi^2}{6} \quad \forall a \in [0, 2\pi].$$

Prendendo $a = 0$ o $a = \pi$ si trovano le due formule:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n^2} = -\frac{\pi^2}{12}.$$

3.7.26 Esempio. Con ragionamenti analoghi a quelli dell'esempio precedente, ma usando la proposizione 3.7.23, si trova:

$$(v.p.) \sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{e^{ina}}{n} = -2\pi i \operatorname{Res} \left(\frac{e^{iaz}}{z(e^{2\pi iz} - 1)}, 0 \right) = -\operatorname{Res}(f, 0) \quad \forall a \in]0, 2\pi[$$

dove (con le stesse notazioni dell'esempio precedente)

$$f(z) := \frac{2\pi i e^{iaz}}{z(e^{2\pi iz} - 1)} = \frac{e^{iaz}}{z^2 \tilde{g}(z)} = \frac{h(z)}{z^2}.$$

Stavolta il polo $z = 0$ è doppio e il residuo da calcolare è pari ad $h'(0)$; tale valore si trova subito usando i calcoli dell'esempio precedente: $h'(0) = ia - \pi i$, da cui

$$(v.p.) \sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{e^{ina}}{n} = -h'(0) = -ia + i\pi. \quad \forall a \in]0, 2\pi].$$

Notiamo che

$$(v.p.) \sum_{n \in \mathbb{Z}, n \neq 0} \frac{e^{ina}}{n} = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n \in \mathbb{N}, 0 < |n| \leq k} \frac{e^{ina}}{n} = \lim_{k \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^k \left(\frac{e^{ian}}{n} + \frac{e^{-ian}}{-n} \right) = 2i \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(an)}{n},$$

da cui la relazione precedente diventa

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(an)}{n} = \frac{\pi - a}{2} \quad \forall a \in]0, 2\pi[.$$

Capitolo 4

Integrazione e norme integrali

4.1 Proprietà principali dell'integrale di Lebesgue

Per quanto segue ci serviranno varie proprietà di passaggio al limite degli integrali. Sfortunatamente tali proprietà non sono vere in generale per l'integrale di Riemann a cui siamo abituati. Siamo perciò costretti a estendere la nozione di integrale, considerando la definizione di misura e di integrale secondo Lebesgue. Tali definizioni sono sostanzialmente basate sull'approssimazione di un insieme generico mediante dei plurintevalli (=unione di rettangoli) numerabili, anziché finiti come si fa con Riemann. Alla fine si perviene ad una nozione di integrale che però coincide con quello solito su tutte le funzioni (continue, discontinue solo su un numero finito di punti, ...) con cui abbiamo abitualmente a che fare, ma che ha senso su una classe assai più ampia di funzioni (avendo in questa classe delle buone proprietà di passaggio al limite). La situazione è molto simile a quella in cui si trova quando si sceglie di usare i numeri reali per studiare l'analisi: i razionali (che sono gli unici numeri con cui normalmente interagiamo) non sono stabili rispetto al passaggio al limite (successioni di razionali possono tendere a oggetti che non sono numeri razionali). Si costruiscono allora i reali come un sopra-insieme dei razionali che è stabile per passaggio al limite, in modo che la teoria che ci si fa sopra sia più semplice da sviluppare, ben sapendo che poi (quasi sempre) i numeri con cui avremo a che fare saranno (alcuni tra i) razionali

Introduciamo allora, in questo paragrafo, le nozioni di misura e di integrale in \mathbb{R}^N . Non dimostreremo praticamente nulla, ma cercheremo di enucleare le proprietà fondamentali che si possono provare, dandone se possibile l'idea geometrica.

Ricordiamo prima di tutto alcune notazioni che useremo ne seguito.

Un intervallo è un sottoinsieme di \mathbb{R} individuato da una qualunque delle forme

$$\{x \in \mathbb{R} : a \leq x \leq b\}, \{x \in \mathbb{R} : a \leq x < b\}, \{x \in \mathbb{R} : a < x \leq b\}, \{x \in \mathbb{R} : a < x < b\}$$

dove a e b possono essere numeri reali oppure $\pm\infty$ e sono detti gli estremi dell'intervallo. Dato un intervallo I di estremi a e b la lunghezza di I è il numero positivo $b - a$ (che può essere zero se $b = a$, cioè se l'intervallo si riduce a un punto o $+\infty$ se l'intervallo è illimitato). Indicheremo con $|I|$ la lunghezza di I .

Sia data una funzione $f : \mathbb{R}^N \rightarrow [0, +\infty]$. Chiamiamo *epigrafico* di f il sottoinsieme di \mathbb{R}^{N+1}

$$\text{epi}(f) := \{(x, y) : x \in \mathbb{R}^n, y \in \mathbb{R}, 0 \leq f(x) \leq y\}$$

Chiamiamo *supporto* di f l'insieme

$$\text{spt}(f) := \text{chiusura di } \{x \in \mathbb{R}^N : f(x) \neq 0\}$$

Ricordiamo anche che, dato un qualunque numero reale x si introducono x^+ detto *parte positiva* di x e x^- detto *parte negativa* di x mediante

$$x^+ := \begin{cases} x & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x \leq 0 \end{cases}, \quad x^- := \begin{cases} 0 & \text{se } x \geq 0 \\ -x & \text{se } x \leq 0 \end{cases}$$

di modo che $x^+ \geq 0$, $x^- \geq 0$, $x = x^+ - x^-$ mentre $|x| = x^+ + x^-$.

Il punto di partenza per la nozione di misura (area/volume) e quindi di integrale è la misura dei rettangoli. Chiameremo rettangolo in \mathbb{R}^N un insieme R della forma

$$R = I_1 \times I_2 \times \cdots \times I_N \quad I_1, I_2, \dots, I_N \text{ intervalli}$$

e chiameremo misura del rettangolo R il numero (in $[0, +\infty]$)

$$|R| := |I_1| \cdot |I_2| \cdots |I_N|.$$

Quindi se $N = 2$ la misura è l'area (base \times altezza), se $N = 3$ la misura è il volume.

4.1.1 Definizione. Chiamiamo *plurirettangolo finito* una unione finita di rettangoli disgiunti, cioè un insieme P di \mathbb{R}^N esprimibile come:

$$P = \bigcup_{j=1}^k R_j \quad R_j \text{ rettangoli, } R_j \cap R_h = \emptyset \text{ se } j \neq h.$$

Chiamiamo misura di P la somma delle misure di tutti i rettangoli che compongono P :

$$|P| = \sum_{j=1}^k |R_j|.$$

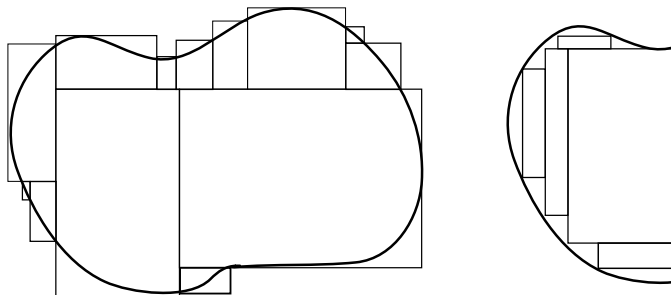
Si può dimostrare che $|P|$ è indipendente dal modo (che non è chiaramente unico) in cui P è scomposto in rettangoli disgiunti.

Per completezza ricordiamo velocemente la definizione di integrale di Riemann in \mathbb{R}^N .

4.1.2 Definizione (misura e integrale di Riemann). Sia A un insieme limitato di \mathbb{R}^N . Poniamo:

$$m_R^*(A) := \inf \{ |P| : A \text{ plurirettangolo finito } A \subset P \}$$

$$m_{R*}(A) := \sup \{ |P| : A \text{ plurirettangolo finito } P \subset A \}$$



$m_R^*(A)$ e $m_{R^*}(A)$ si dicono rispettivamente la misura esterna secondo Riemann (o secondo Peano) e la misura interna secondo Riemann dell'insieme A . Si dice che A è *misurabile secondo Riemann* se $m_R^*(A) = m_{R^*}(A)$, cioè se approssimando A con plurirettangoli inscritti o con plurirettangoli circoscritti si giunge al medesimo risultato. Se A è misurabile indichiamo con $m_R(A)$ il valore comune delle due misure (interna ed esterna).

Sia ora $f : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione limitata e a supporto limitato. Diciamo che f è misurabile secondo Riemann se gli epigrafici $\text{epi}(f^+)$ e $\text{epi}(f^-)$ sono insiemi misurabili secondo Riemann. In questo caso chiamiamo *integrale di Riemann* di f il numero

$$\int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx := m_R(\text{epi}(f^+)) - m_R(\text{epi}(f^-))$$

Infine se A è un insieme misurabile e $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione limitata possiamo dire che f è integrabile su A se la funzione \tilde{f} che è eguale a f su A e vale zero fuori di A è misurabile e in questo caso si definisce l'integrale di f su A come

$$\int_A f(x) dx := \int_{\mathbb{R}^N} \tilde{f}(x) dx.$$

Si potrebbe ora dimostrare una serie di proprietà per gli integrali; per esempio si può vedere che se A e B sono due insiemi misurabili disgiunti, allora la loro unione è misurabile e $m_R(A \cup B) = m_R(A) + m_R(B)$ (questo non è vero se A e B non sono misurabili). Oppure si potrebbe vedere che se f e g sono integrabili, allora la loro somma è integrabile e $\int_{\mathbb{R}^N} (f+g) = \int_{\mathbb{R}^N} f + \int_{\mathbb{R}^N} g$. Queste proprietà (e le varie altre che si possono dimostrare) fanno sì che la misura e l'integrale di Riemann siano un'ottimo modello matematico per l'idea di area o volume in questioni di geometria elementare. Tali nozioni hanno però alcuni difetti che si manifestano quando si cominciano a tirare in ballo i limiti. Un piccolo difetto è il fatto che si misurano solo insiemi limitati e si integrano funzioni limitate a supporto limitato. A questo però si potrebbe tentare di rimediare considerando gli integrali impropri (anche se in \mathbb{R}^N le cose non sono così chiare). Il grosso problema però è la *stabilità* degli insiemi misurabili e delle funzioni integrabili rispetto ad operazioni di limite. Non è per esempio vero (e invece servirebbe) che l'unione di una successione di insiemi misurabili è misurabile.

Per superare questo tipo di difficoltà considereremo una definizione più generale di misura, detta misura secondo Lebesgue, che chiameremo semplicemente misura.

4.1.3 Definizione. Chiamiamo *plurirettangolo numerabile* l'unione di una successione di rettangoli disgiunti, cioè un insieme P di \mathbb{R}^N esprimibile come:

$$P = \bigcup_{j \in \mathbb{N}} R_j \quad R_j \text{ rettangoli, } R_j \cap R_h = \emptyset \text{ se } j \neq h.$$

Chiamiamo misura di P la serie (eventualmente infinita) delle misure di tutti i rettangoli che compongono P :

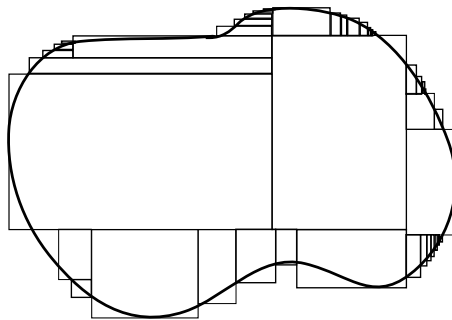
$$|P| = \sum_{j \in \mathbb{N}} |R_j|.$$

Si può dimostrare (ed è complicato) che $|P|$ è indipendente dal modo in cui P è scomposto in rettangoli disgiunti.

4.1.4 Definizione (misura e integrale secondo Lebesgue). Sia A un sottoinsieme di \mathbb{R}^N . Poniamo:

$$m^*(A) := \inf \{|P| : A \text{ plurirettangolo numerabile } A \subset P\}$$

$m^*(A)$, che può essere finita o $+\infty$, è chiamata la misura esterna secondo Lebesgue dell'insieme A .



Diremo che A è *misurabile secondo Lebesgue* se

$$m^*(E) = m^*(A \cap E) + m^*(A \setminus E) \quad \text{per ogni sottoinsieme } E \text{ di } \mathbb{R}^N$$

Questa proprietà dice che A *spezza bene* ogni altro sottoinsieme E - non è una proprietà intuitiva come quella usata per fare la misura di Riemann e per la verità non ne parleremo praticamente mai. L'importante è che questa proprietà individua una classe di insiemi buoni, di cui metteremo in evidenza le caratteristiche.

Indicheremo con \mathcal{M} la classe degli insiemi misurabili. Se $A \in \mathcal{M}$, cioè se A è misurabile, scriviamo $m(A)$ invece di $m^*(A)$ e chiamiamo $m(A)$ la *misura* (secondo Lebesgue) di A . Sia ora $f : \mathbb{R}^N \rightarrow [0, +\infty]$ una funzione (positiva a valori reali estesi). Diciamo che f è *misurabile* secondo Lebesgue se $\text{epi}(f)$ è un insieme misurabile. Per una tale f chiamiamo *integrale* di f l'espressione

$$\int f = \int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx := m(\text{epi}(f))$$

Tale integrale può benissimo essere $+\infty$.

Se invece si considera una funzione $f : \mathbb{R}^N \rightarrow [-\infty, \infty]$ diremo che essa è misurabile se le due funzioni parte positiva f^+ e parte negativa f^- sono entrambe misurabili. Diremo che f è *integrabile* se f è misurabile e se $\int f^+ < +\infty$ e $\int f^- < +\infty$ e in tal caso chiameremo integrale di f l'espressione

$$\int f = \int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx := \int_{\mathbb{R}^N} f^+(x) dx - \int_{\mathbb{R}^N} f^-(x) dx$$

Notiamo dunque che le funzioni misurabili positive hanno sempre integrale (eventualmente infinito) mentre le funzioni a segno variabile hanno integrale solo quando questo è finito. Infine se A è un insieme misurabile e $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ è una funzione possiamo dire che f è misurabile (integrabile) su A se la funzione \tilde{f} che è eguale a f su A e vale zero fuori di A è misurabile (integrabile). Si definisce inoltre l'integrale di f su A come

$$\int_A f(x) dx := \int_{\mathbb{R}^N} \tilde{f}(x) dx.$$

Notiamo che insiemi misurabili o funzioni integrabili non sono necessariamente limitati. Vediamo ora le proprietà principali degli insiemi e delle funzioni misurabili.

4.1.5 Proposizione (proprietà degli insiemi misurabili).

1. L'insieme vuoto e tutto lo spazio \mathbb{R}^N sono misurabili.
2. I plurirettangoli sono misurabili e la loro misura coincide con quella di partenza.

3. Se $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ è una famiglia di sottoinsiemi misurabili di \mathbb{R}^N , allora

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{M} \quad , \quad \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{M}.$$

Inoltre si ha (varie forme di additività numerabile):

(a) Se gli A_n sono a due a due disgiunti: $A_i \cap A_j = \emptyset$ per $i \neq j$, allora

$$m \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} m(A_n)$$

(b) Se $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ è crescente: $A_n \subset A_{n+1}$, allora

$$m \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(A_n)$$

(c) Se $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ è decrescente: $A_{n+1} \subset A_n$, e se $m(A_1) < +\infty$ allora

$$m \left(\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} m(A_n)$$

4. Se $A \in \mathcal{M}$ e $B \in \mathcal{M}$, allora $A \setminus B \in \mathcal{M}$. Inoltre, se $m(A \cap B) < +\infty$, allora $m(A \setminus B) = m(A) - m(A \cap B)$. In particolare se $B \subset A$ si deduce $m(B) \leq m(A)$.

4.1.6 Definizione. Diremo che un sottoinsieme E di \mathbb{R}^N è trascurabile se $m^*(E) = 0$.

4.1.7 Proposizione. 1. Se E è trascurabile, allora $E \in \mathcal{M}$ (e $m(E) = 0$).

2. Se E è trascurabile ed $E_1 \subset E$, allora E_1 è trascurabile.

3. Se $(E_n)_{n \in \mathbb{N}}$ è una successione di insiemi trascurabili, allora $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n$ è trascurabile.

4.1.8 Definizione. Nel seguito diremo che una proprietà $P(x)$ è vera quasi ovunque in \mathbb{R}^N o per quasi ogni x di \mathbb{R}^N , se l'insieme delle x di \mathbb{R}^N per cui $P(x)$ è falsa è trascurabile. Per esempio diremo che una funzione f è quasi ovunque nulla o equivalentemente che $f(x) = 0$ per quasi ogni x , intendendo con questo che l'insieme $\{x : f(x) \neq 0\}$ ha misura zero. Analogamente diremo che due funzioni f e g sono eguali quasi ovunque se la loro differenza è quasi ovunque nulla.

Analoghe proprietà valgono per le funzioni misurabili/integrabili.

4.1.9 Proposizione (proprietà delle funzioni misurabili).

1. Se f e g sono misurabili allora $f + g$ e fg sono misurabili¹. Inoltre se f e g sono integrabili, e $c \in \mathbb{R}$, allora $f + g$ e cf sono integrabili e si ha

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^N} (f(x) + g(x)) dx &= \int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx + \int_{\mathbb{R}^N} g(x) dx, \\ \int_{\mathbb{R}^N} (cf(x)) dx &= c \int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx. \end{aligned}$$

¹bisognerebbe dire cosa si intende per $f(x) + g(x)$ se $f(x) = +\infty$ e $g(x) = -\infty$, o viceversa; si vede però che si può decidere di porre tale somma eguale ad un valore arbitrario e i risultati scritti sono veri - nel caso poi dell'integrabilità si può vedere che tali x costituiscono un insieme trascurabile che non influenza il valore dell'integrale.

2. Se f è misurabile allora $|f|$ è misurabile (il viceversa non è vero).
Se f è misurabile allora f è integrabile se e solo se $|f|$ è integrabile.
3. Se f è misurabile, g è integrabile e $|f| \leq g$, allora f è integrabile e

$$\left| \int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx \right| \leq \int_{\mathbb{R}^N} |f(x)| dx \leq \int_{\mathbb{R}^N} g(x) dx.$$

4. Se f è integrabile ed è positiva allora

$$\int_{\mathbb{R}^N} f(x) dx = 0 \Rightarrow f(x) = 0 \text{ per quasi ogni } x \quad (f = 0 \text{ quasi ovunque}).$$

5. f è misurabile se e solo se tutti gli insiemi $E_c := \{x : f(x) \leq c\}$ con $c \in \mathbb{R}$ sono misurabili.
6. Se f è misurabile e $g = f$ quasi ovunque, allora g è misurabile.
Se f è integrabile e $g = f$ quasi ovunque, allora g è integrabile e gli integrali sono gli stessi.
7. Se (f_n) è una successione di funzioni misurabili che tendono puntualmente ad una funzione $f: f_n(x) \rightarrow f(x)$ per ogni x , allora f è misurabile. Lo stesso è vero se $f_n \rightarrow f$ quasi ovunque, cioè se si rimpiazza il “per ogni x ” con “per quasi ogni x ”.

4.1.10 Proposizione (confronto con Riemann). Valgono i fatti seguenti.

- Se A è un insieme limitato misurabile secondo Riemann, allora A è misurabile e $m_{\mathbb{R}}(A) = m(A)$.
- Se f è una funzione limitata con supporto compatto integrabile secondo Riemann, allora è integrabile e le due definizioni di integrale coincidono.
- Se f è assolutamente integrabile in senso improprio secondo Riemann (su un intervallo di \mathbb{R}) allora è integrabile e l'integrale improprio coincide con l'integrale.

In particolare le funzioni continue o continue a tratti sono certamente misurabili e sono integrabili sugli intervalli chiusi e limitati.

Invece le funzioni integrabili in senso improprio secondo Riemann che non siano assolutamente integrabili non sono integrabili secondo Lebesgue (perché parte positiva e parte negativa hanno entrambe integrale infinito). Per esempio $f(x) = \frac{\sin(x)}{x}$ non è integrabile secondo Lebesgue su \mathbb{R} .

4.1.11 Teorema (di Lebesgue o della convergenza dominata).

Sia (f_n) una successione di funzioni integrabili in un insieme misurabile A .

Supponiamo che esista g integrabile in \mathbb{R}^N con la proprietà $|f_n(x)| \leq g(x)$ per ogni n in \mathbb{N} e per ogni (o per quasi ogni) x in A .

Supponiamo anche che per ogni (o per quasi ogni) x esista $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ che possiamo indicare con $f(x)$.

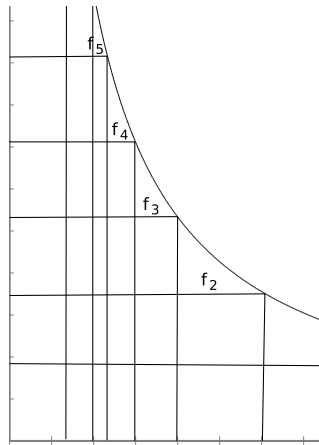
Allora la funzione f (definita arbitrariamente nelle x in cui non esiste il limite) è integrabile e

$$\int_A f(x) dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_A f_n(x) dx.$$

4.1.12 Esempio. Abbiamo già visto che la convergenza puntuale in generale non implica la convergenza degli integrali. Mostriamo ora un altro controesempio di questo fatto, confrontandolo con il teorema precedente. Possiamo considerare la seguente successione di funzioni su \mathbb{R} :

$$f_n(x) := \begin{cases} n & \text{se } 0 < x \leq \frac{1}{n} \\ 0 & \text{se } x \leq 0 \text{ oppure } x > \frac{1}{n} \end{cases}$$

Si vede facilmente che $\int_{\mathbb{R}} f_n(x) dx = \int_0^{1/n} n dx = \frac{1}{n}n = 1$ ma che per ogni x fissato $f_n(x) = 0$ se $x \leq 0$ o se $x > 0$ e $n > 1/x$; ne segue che $f_n(x) \rightarrow 0$ e dunque l'integrale non passa al limite. In effetti il teorema di convergenza dominata non può valere dato che "l'inviluppo" delle f_n è la funzione $1/x$ che non è integrabile.



Dal teorema di Lebesgue si deducono i seguenti teoremi di passaggio al limite sotto il segno di integrale. Notiamo che, tra le ipotesi scritte sotto, quella di misurabilità (che pure dobbiamo mettere) è verificata praticamente sempre - lo è per esempio non appena la funzione è continua (o continua a tratti). L'ipotesi cruciale è il fatto che gli integrandi siano **dominati** uniformemente rispetto al parametro.

4.1.13 Teorema. Sia A un aperto di \mathbb{R}^N e sia $F : A \times \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione tale che

- per ogni y fissato in \mathbb{R}^M la funzione $x \mapsto F(x, y)$ è continua in A ;
- per ogni x fissato in A la funzione $y \mapsto F(x, y)$ è misurabile;
- esiste $g : \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R}$ integrabile tale che $|F(x, y)| \leq g(y) \quad \forall x, \forall y$.

(la terza proprietà si può interpretare dicendo che la funzione $y \mapsto F(x, y)$ è integrabile in y "uniformemente rispetto a x in A ").

Allora la funzione $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ definita da

$$f(x) := \int_{\mathbb{R}^M} F(x, y) dy$$

è continua, cioè per ogni x_0 in I :

$$\lim_{x \rightarrow x_0} \int_{\mathbb{R}^M} F(x, y) dy = \int_{\mathbb{R}^M} F(x_0, y) dy$$

Supponiamo ora che k sia tra 1 ed N e che, oltre alle precedenti, si abbia:

- per ogni y fissato in \mathbb{R}^M $x \mapsto F(x, y)$ ha derivata parziale k -esima continua;
- per ogni x fissato in A la funzione $y \mapsto \frac{\partial}{\partial x_k} F(x, y)$ è misurabile;
- esiste $g_1 : \mathbb{R}^M \rightarrow \mathbb{R}$ integrabile tale che $\left| \frac{\partial}{\partial x_k} F(x, y) \right| \leq g_1(y) \quad \forall x, \forall y$.

Allora la funzione f è derivabile rispetto a x_k e si può derivare sotto il segno di integrale:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} f(x) = \int_{\mathbb{R}^M} \frac{\partial}{\partial x_k} F(x, y) dy.$$

Un altro teorema di passaggio al limite, questa volta sotto il segno di serie, si ottiene dal teorema di Lebesgue ricordando che una serie $\sum_{n \in \mathbb{N}} a_n$ si può sempre vedere come l'integrale su $[0, +\infty[$ della funzione costante a tratti $f(x) := a_{[x]}$. Si ha allora:

4.1.14 Teorema (Teorema di Lebesgue per le serie). *Sia $(a_{n,m})$ una successione a due indici. Supponiamo che*

- per ogni n esiste $a_n := \lim_{m \rightarrow \infty} a_{n,m}$;
- esista una successione (b_n) tale che $b_n \geq 0$ e

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} b_n < +\infty, \quad |a_{n,m}| \leq b_n \quad \forall n, m.$$

Allora (a_n) è sommabile e

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n \in \mathbb{N}} a_{n,m} = \sum_{n \in \mathbb{N}} a_n.$$

I seguenti teoremi stabiliscono che gli integrali in \mathbb{R}^N sono degli “integrali multipli”. È importante che il primo teorema, che parla di funzioni positive, vale comunque, anche se gli integrali sono infiniti. Questo teorema allora può essere usato come criterio di integrabilità.

4.1.15 Teorema (di Tonelli). *Supponiamo che la funzione $f : \mathbb{R}^{N+M} \rightarrow [0, +\infty]$ sia misurabile. Allora:*

- per quasi ogni y in \mathbb{R}^M si ha che $x \mapsto f(x, y)$ è misurabile su \mathbb{R}^N ;
- la funzione $y \mapsto \int_{\mathbb{R}^N} f(x, y) dx$, definita a piacere nei punti in cui l'integrale non ha senso, è misurabile su \mathbb{R}^M ;
- si ha

$$\int_{\mathbb{R}^{N+M}} f(x, y) dx dy = \int_{\mathbb{R}^M} \left(\int_{\mathbb{R}^N} f(x, y) dx \right) dy$$

Notiamo che, in particolare, scambiando x e y , si vede che gli integrali fatti nell'ordine inverso portano allo stesso risultato.

4.1.16 *Osservazione* (principio di Cavalieri). Sia A un insieme misurabile di \mathbb{R}^{N+M} e per ogni y_0 in \mathbb{R}^M indichiamo con A_{y_0} l'insieme $A \cap \{(x, y) : y = y_0\}$ cioè la sezione di A fatta tramite l'iperpiano di equazione $y = y_0$. Allora (come si vede facilmente applicando il teorema di Tonelli alla funzione che vale 1 su A e zero fuori di A):

- per quasi ogni y in \mathbb{R}^M si ha che A_y è un sottoinsieme misurabile di \mathbb{R}^N ;
- la funzione $y \mapsto m(A_y)$, definita a piacere dove non ha senso, è misurabile su \mathbb{R}^M ;
- si ha

$$m(A) = \int_{\mathbb{R}^M} m(A_y) \, dy.$$

4.1.17 *Osservazione*. Si deduce dal teorema di Tonelli che tratti rettilinei sono trascurabili nel piano: per esempio l'asse x è trascurabile in quanto la misura della sua sezione con una qualunque parallela all'asse y è trascurabile (essendo fatta da un singolo punto).

4.1.18 *Osservazione*. Il teorema di Tonelli può essere usato come criterio di integrabilità: per verificare se una $f(x, y)$ è integrabile su \mathbb{R}^{N+M} basta controllare se

$$\int_{\mathbb{R}^M} \left(\int_{\mathbb{R}^N} |f(x, y)| \, dx \right) \, dy < +\infty$$

dato che f è integrabile se e solo se $|f|$ è integrabile.

La differenza tra il teorema che segue e il precedente è che ora si suppone che f sia integrabile.

4.1.19 Teorema (di Fubini). *Sia $f : \mathbb{R}^{N+M} \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione integrabile. Allora:*

- per quasi ogni y di \mathbb{R}^M la funzione $x \mapsto f(x, y)$ della variabile x è integrabile su \mathbb{R}^N ;
- la funzione $y \mapsto \int_{\mathbb{R}^N} f(x, y) \, dx$ definita a piacere dove l'integrale non esiste, è integrabile su \mathbb{R}^M ;
- si ha:

$$\int_{\mathbb{R}^{N+M}} f(x, y) \, dx \, dy = \int_{\mathbb{R}^M} \left(\int_{\mathbb{R}^N} f(x, y) \, dx \right) \, dy.$$

Anche in questo caso (se vale l'ipotesi che ora è l'integrabilità di f) gli integrali iterati non dipendono dall'ordine in cui sono svolti.

4.1.20 Teorema (di cambio di variabile). *Supponiamo che A sia un aperto di \mathbb{R}^N e che $\Phi : A \rightarrow \mathbb{R}^N$ sia una applicazione iniettiva e $C^1(A)$.*

Allora ogni sottoinsieme misurabile E di A di cui ha che $\Phi(E)$ è misurabile, Inoltre se $f : \Phi(E) \rightarrow [-\infty, +\infty]$ è integrabile si ha

$$\int_{\Phi(E)} f(x) \, dx = \int_E f(\Phi(y)) |\det(J_\Phi(y))| \, dy$$

dove J_Φ indica la matrice Jacobiana di Φ : $(J_\Phi)_{i,j}(y) = \frac{\partial}{\partial y_i} \Phi_j(y)$.

4.1.21 Esempio (coordinate polari). Consideriamo $\Phi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ definita da $\Phi(\rho, \theta) = (\rho \cos(\theta), \rho \sin(\theta))$. È immediato verificare che:

$$J_{\Phi}(\rho, \theta) = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin \theta \\ -\rho \sin(\theta) & \rho \cos(\theta) \end{pmatrix} \Rightarrow \det J_{\Phi} = \rho.$$

Peraltro Φ non è iniettiva come si vede subito, sia perché $\Phi(0, \theta) = (0, 0)$ per qualunque θ , sia perché $\Phi(\rho, \theta + 2\pi k) = \Phi(\rho, \theta)$ per k intero. Se prendiamo $A := \{\rho > 0, 0 < \theta < 2\pi\}$ si vede facilmente che A è un aperto e che Φ è iniettiva su A ; peraltro l'immagine di A è $B := \mathbb{R}^2 \setminus \{0\} \times [0, +\infty[$ che non esaurisce tutto \mathbb{R}^2 . Se invece prendiamo $A_1 := \{\rho \geq 0, 0 \leq \theta \leq 2\pi\}$ ($A_1 = \bar{A}$) allora immagine di A_1 è tutto \mathbb{R}^2 (ma A_1 non è aperto e Φ non è iniettiva su A_1). Notiamo però che $A_1 \setminus A$ è trascurabile in quanto formato da tratti rettilinei (anche se alcuni illimitati) e per lo stesso motivo è trascurabile $\mathbb{R}^2 \setminus B = \{0\} \times [0, +\infty[$.

A questo punto prendiamo un insieme misurabile F in \mathbb{R}^2 e una funzione $f : F \rightarrow [-\infty, +\infty]$ integrabile. Definiamo $E := \{(\rho, \theta) \in A_1 : \Phi(\rho, \theta) \in F\} = \Phi^{-1}(F) \cap A_1$; poniamo anche $F^* := F \setminus \{0\} \times [0, +\infty[= F \cap B$ ed $E^* := \{(\rho, \theta) \in A : \Phi(\rho, \theta) \in F^*\} = \Phi^{-1}(F) \cap A$. Dunque $\Phi(E) = F$ e $\Phi(E^*) = F^*$ e si ha:

$$\begin{aligned} \int_F f(x, y) dx dy &= \int_{F^*} f(x, y) dx dy = \int_{\Phi(E^*)} f(x, y) dx dy = \\ &= \int_{E^*} f(\Phi(\rho, \theta)) \rho d\rho d\theta = \int_E f(\Phi(\rho, \theta)) \rho d\rho d\theta \end{aligned}$$

(nel primo e nell'ultimo passaggio abbiamo sfruttato la trascurabilità di $F \setminus F^* \subset \mathbb{R}^2 \setminus B$ e di $E \setminus E^* \subset A_1 \setminus A$ mentre nel passaggio tra la prima riga e la seconda abbiamo usato il teorema di cambio di variabile).

4.1.22 Esempio. Consideriamo la funzione $f(x, y) = e^{-(x^2+y^2)}$. Passando in coordinate polari (A_1 è quello di prima) e poi applicando Fubini-Tonelli:

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)} dx dy &= \int_{A_1} \rho e^{-\rho^2} d\rho d\theta = \int_0^{2\pi} \left(\int_0^{+\infty} \rho e^{-\rho^2} \right) d\theta = \\ &= 2\pi \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} e^{-t} dt = \pi [-e^{-t}]_0^{+\infty} = \pi \end{aligned}$$

Notiamo peraltro che (sempre per Fubini-Tonelli):

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^2} e^{-(x^2+y^2)} dx dy &= \int_{\mathbb{R}^2} e^{-x^2} e^{-y^2} dx dy = \\ &= \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-x^2} dx \right) \left(\int_{\mathbb{R}} e^{-y^2} dy \right) = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2} dx \right)^2 \end{aligned}$$

da cui

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}$$