

MATERIALE DEL CORSO DI  
**MODELLI E METODI MATEMATICI  
DELLA FISICA**

**Analisi Funzionale: spazi funzionali e di successioni;  
distribuzioni, serie e trasformata di Fourier**

a cura di Paolo Maria Santini

*<http://www.roma1.infn.it/people/santini/>*

---

email: [paolo.santini@roma1.infn.it](mailto:paolo.santini@roma1.infn.it)

ufficio 215, secondo piano, ed. Marconi - tel. 0649914372

---

May 23, 2019

RACCOLTA DI ESERCIZI (fino a serie ed integrale di Fourier inclusi)

# 1 RACCOLTA DI ESERCIZI

Una buona parte degli esercizi qui raccolti, teorici e pratici, sono essenzialmente quelli proposti durante il corso; quindi lo studente deve saperli affrontare con sicurezza. Si consiglia anche di consultare le raccolte di esercizi di autori vari con link all'indirizzo:

<http://www.roma1.infn.it/people/santini/didattica.html>

## 1.1 Richiami di algebra lineare

1) Le matrici  $A$  e i vettori colonna  $\underline{b}$  sono qui sotto presentati nella notazione compatta delle matrici aumentate  $(A : \underline{b})$ . i) Caratterizzare il nucleo  $\mathcal{N}(A)$  ed il range  $\mathcal{R}(\hat{A})$  di  $A$  e trovare le loro dimensioni (si ricordi che  $\dim \mathcal{R}(\hat{A})$  è il rango della matrice  $A$ ). ii) Risolvere, quando possibile, i corrispondenti sistemi omogenei  $A\underline{x} = \underline{0}$ , al variare degli eventuali parametri liberi presenti. ii) Interpretare questo risultato dal punto di vista della dipendenza o indipendenza lineare dei vettori che costituiscono le colonne delle matrici  $A$ ; darne anche un'interpretazione geometrica in  $\mathbb{R}^n$ . iii) Risolvere, in parallelo, anche il problema duale:  $A^\dagger \underline{\phi} = \underline{0}$ . iv) Risolvere, se possibile, il sistema lineare  $A\underline{x} = \underline{b}$  al variare degli eventuali parametri liberi presenti. iv) Determinare il range di  $\mathcal{R}(\hat{A})$ , utilizzando l'equazione  $(\underline{\phi}, \underline{b}) = 0$  che lo caratterizza, e calcolare il rango di  $A$ . v) Calcolare autovalori e autovettori delle matrici quadrate.

$$\begin{aligned}
& \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & & 5 \\ -1 & 1 & & 1 \\ 1 & 1 & & b \end{array} \right), \left( \begin{array}{ccccc|c} 1 & -3 & 3 & 1 & 1 & 34 \\ 2 & -6 & -1 & -2 & -5 & -8 \\ 3 & -9 & -5 & 1 & -11 & -20 \end{array} \right), \left( \begin{array}{cccc|c} 1 & 2 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & 4 & 5 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 0 \end{array} \right), \\
& \left( \begin{array}{ccc|c} 2 & 2 & 1 & b \\ 2 & 3 & 4 & 0 \\ 2 & 1 & -2 & 2 \end{array} \right), \left( \begin{array}{cc|c} 3 & -5 & 1 \\ 6 & 7 & 2 \\ -3 & 39 & a \end{array} \right), \left( \begin{array}{cc|c} 2 & 3 & 6 \\ 2 & 4 & 8 \end{array} \right), \\
& \left( \begin{array}{cc|c} 1 & 6 & 7 \\ 3 & 1 & 4 \end{array} \right), \left( \begin{array}{cc|c} 1 & 3 & 2 \\ 2 & 3 & 7 \end{array} \right), \left( \begin{array}{ccc|c} 4 & 3 & 2 & 0 \\ 1 & -4 & 1 & 1 \end{array} \right), \\
& \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \end{array} \right), \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 3 & 2 \\ 2 & -3 & 4 & 6 \\ 1 & -7 & -2 & 6 \end{array} \right), \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 6 & 6 & -2 & -8 \\ 0 & 3 & -1 & -3 \end{array} \right), \\
& \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 3 & -1 & 5 \\ 3 & 4 & 1 & b \end{array} \right), \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 1 & 1 & 1 \\ a & 0 & 1 & 2 \\ 0 & a & 1 & 2 \end{array} \right), \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & 2 & a & 1 \\ a & a & 0 & 1 \\ a & 3a & 8 & 3 \end{array} \right), \\
& \left( \begin{array}{ccc|c} 1 & -1 & 1 & 4 \\ -1 & 1 & a & 1 \\ a & a & 1 & 3 \end{array} \right), \left( \begin{array}{cc|c} 3 & -5 & 1 \\ 6 & 7 & 2 \\ -3 & 39 & b \end{array} \right), \left( \begin{array}{cc|c} 1 & a & 1 \\ a & 1 & 4 \end{array} \right), \\
& \left( \begin{array}{cc|c} 1 & 2 & 1 \\ a & 2 & 5 \end{array} \right)
\end{aligned} \tag{1}$$

## 1.2 Spazi vettoriali

1) Mostrare che i seguenti insiemi sono spazi vettoriali. Spazi finito - dimensionali: lo spazio dei vettori ordinari in  $\mathbb{R}^3$  e quello dei quadrivettori in  $\mathbb{M}^4$ ; lo spazio  $\mathbb{R}$  dei reali; lo spazio  $\mathbb{R}^n$  delle  $n$ -ple di numeri reali; lo spazio  $\mathbb{C}$  dei numeri complessi; lo spazio  $\mathbb{C}^n$  delle  $n$ -ple di numeri complessi; lo spazio  $Mat(n, \mathbb{R})$  ( $Mat(n, \mathbb{C})$ ) delle matrici  $n \times n$  di elementi reali (complessi); lo spazio  $Mat(m, n, \mathbb{R})$  ( $Mat(m, n, \mathbb{C})$ ) delle matrici  $m \times n$  di elementi reali (complessi); lo spazio  $\mathcal{P}_n$  dei polinomi di grado  $n - 1$  a coefficienti reali (complessi). Spazi infinito - dimensionali: lo spazio  $\mathbb{R}^\infty$  ( $\mathbb{C}^\infty$ ) delle successioni  $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  di numeri reali (complessi); lo spazio delle successioni finite, convergenti a zero, limitate di numeri reali (complessi); gli spazi di successioni  $l_p$ ,  $p > 0$ ; lo spazio  $C_{[a,b]}$  delle funzioni reali continue sull'intervallo reale  $[a, b]$ ; lo spazio delle funzioni analitiche in un dominio  $\mathcal{D}$ ; gli spazi di funzioni  $L_p([a, b])$ ,  $p > 0$ . Lo spazio degli stati  $|\psi\rangle$  (kets) di un sistema fisico in Meccanica Quantistica (esso può essere finito o infinito dimensionale). Individuare la dimensione di questi spazi vettoriali e qualche

base significativa.

**2)** Mostrare che un insieme finito di punti isolati di  $\mathbb{R}^n$  non è uno spazio vettoriale.

**3)** L'introduzione di vincoli sui vettori di uno spazio vettoriale può far sì che il nuovo spazio non sia più vettoriale. Dire se i seguenti spazi sono vettoriali e calcolarne la dimensione. Possiamo immaginare una regola sui vincoli compatibili con le proprietà di uno spazio vettoriale?

i)  $\{\underline{x} = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n; \sum_{k=1}^n x_k^2 = 1\}$ ,    ii)  $\{\underline{x} \in \mathbb{R}^n; x_1 = 0\}$ ,

iii)  $\{\underline{x} \in \mathbb{R}^n; x_1 + 3x_2^k = 0, k \in \mathbb{N}_+\}$ ,    iv)  $\{\underline{x} \in \mathcal{P}_n; \underline{x} = \sum_{k=1}^{n-1} c_k t^k\}$ ,

v)  $\{\underline{x} \in \mathbb{R}^n; x_1 \geq x_k, 2 \leq k \leq n\}$ ,    vi)  $\{x \in \mathbb{R}, x \geq 0\}$ ,

vii)  $\{A \in Mat(n, \mathbb{C}), tr A = 0\}$ ,    viii)  $\{A \in Mat(n, \mathbb{C}), det A = 0\}$

Risp. i) no; ii) sì; iii) sì, se  $k = 1$ , no altrimenti; iv) sì; v) no; vi) no; vii) sì; viii) no.

**4)** Sono dati  $k$  ( $k \leq n$ ) vettori  $\underline{v}^{(j)}$ ,  $j = 1, \dots, k$  di  $\mathbb{C}^n$  ed è definita la matrice  $n \times k$   $M = (\underline{v}^{(1)}, \dots, \underline{v}^{(k)})$  avente come colonne le componenti di tali vettori. Mostrare che, se il rango di  $M$  ( $r(M)$ ) è  $k$ , allora i vettori sono indipendenti; se, invece,  $r(M) < k$ , allora sono dipendenti.

**5)** Dati i vettori  $\underline{v}^{(1)} = \underline{e}^{(1)} + 2\underline{e}^{(2)}$ ,  $\underline{v}^{(2)} = c\underline{e}^{(1)} + \underline{e}^{(2)}$  di uno spazio vettoriale  $V$  di dimensione 2, stabilire per quali valori di  $c \in \mathbb{R}$  tali vettori sono dipendenti e indipendenti. ii) Se, ai vettori  $\underline{v}^{(1)}, \underline{v}^{(2)}$ , si aggiunge  $\underline{v}^{(3)} = \underline{e}^{(1)}$ , stabilire per quali valori di  $c \in \mathbb{R}$  i tre vettori sono dipendenti e indipendenti. Se  $V = \mathbb{R}^2$ , disegnare tali vettori nei due casi.

Risp:  $\underline{v}^{(1)}, \underline{v}^{(2)}$  sono lin. dipendenti per  $c = 1/2$ ; sono lin. indep. per  $c \neq 1/2$ .  $\underline{v}^{(1)}, \underline{v}^{(2)}, \underline{v}^{(3)}$  sono...

**6)** Dati i vettori  $\underline{v}^{(1)} = \underline{e}^{(1)} + 2\underline{e}^{(2)} + 3\underline{e}^{(3)}$ ,  $\underline{v}^{(2)} = 2\underline{e}^{(1)} + c\underline{e}^{(2)} + d\underline{e}^{(3)}$  di uno spazio vettoriale di dimensione 3, stabilire per quali valori di  $c, d \in \mathbb{R}$  tali vettori sono dipendenti e indipendenti. ii) Se, ai vettori  $\underline{v}^{(1)}, \underline{v}^{(2)}$ , si aggiunge  $\underline{v}^{(3)} = \underline{e}^{(3)}$ , stabilire per quali valori di  $c, d \in \mathbb{R}$  i tre vettori sono dipendenti e indipendenti.

R: i) Per  $c = 4$ ,  $d = 6$  i due vettori sono lin. dipendenti, con  $\underline{v}^{(2)} = 2\underline{v}^{(1)}$ . Altrimenti sono lin. indipendenti. ii) Per  $c = 4$  i tre vettori sono lin. dipendenti, con  $\underline{v}^{(2)} = 2\underline{v}^{(1)} + (d - 6)\underline{v}^{(3)}$ . Per  $c \neq 4$  sono lin. indipendenti.

**7)** Dati i vettori  $\underline{v}^{(1)} = (1, 1, 1, c)$ ,  $\underline{v}^{(2)} = (a, 1, 0, 0)$ ,  $\underline{v}^{(3)} = (0, b, 1, 0)$  di  $\mathbb{R}^4$ , determinare per quali valori dei parametri  $a, b, c \in \mathbb{R}$  sono dipendenti o

indipendenti.

R: Se  $a \neq 0$ ,  $b = (a - 1)/a$ ,  $c = 0$  i tre vettori sono lin. dip:  $-a\underline{v}^{(1)} + \underline{v}^{(2)} + a\underline{v}^{(3)} = 0$ . Altrimenti sono indipendenti.

**8)** i) Dati i polinomi  $p_1(t) = 1 + at + 2t^2$ ,  $p_2(t) = 2 + 3t + 4t^2$ , stabilire per quali valori di  $a$  sono dipendenti o indipendenti. ii) Se  $p_3(t) = -1 + 2t + ct^2$ , stabilire per quali valori di  $a, c$  i tre polinomi  $p_j(t)$ ,  $j = 1, 2, 3$  sono linearmente dipendenti o indipendenti.

R: i) per  $a = 3/2$  sono dipendenti, con  $p_2(t) = 2p_1(t)$ ; altrimenti sono indipendenti. ii) sono dipendenti sia per  $a = 3/2$  (ovvio) che per  $c = -2$  sono indipendenti per  $a \neq 3/2$ ,  $c \neq -2$ .

**9)** Dimostrare i) che due qualunque spazi vettoriali reali (complessi) aventi diversa dimensione non possono essere isomorfi; ii) che due qualunque spazi vettoriali reali (complessi) aventi la stessa dimensione  $n$  sono isomorfi e, in particolare, sono isomorfi a  $\mathbb{R}^n$  (a  $\mathbb{C}^n$ ).

**10) Dimensione di spazio vettoriale.** Avendo definito come dimensione  $n$  di uno spazio vettoriale il numero massimo di vettori indipendenti di tale spazio, dimostrare che  $\dim \mathbb{C}^n = n$ .

**11) Base di uno spazio vettoriale finito-dimensionale.** Avendo definito come base nello spazio vettoriale  $V$ , con  $\dim V = n$ , un qualunque insieme di vettori  $\{\underline{e}^{(i)}\}_{i=1}^n$  indipendenti, mostrare che ogni vettore  $\underline{v} \in V$  è esprimibile come combinazione lineare di tali vettori.

**12)** Mostrare che lo sviluppo di un generico vettore  $\underline{v} \in V$  nella base  $\{\underline{e}^{(i)}\}_{i=1}^n$  di  $V$  è unico.

**13) Span.** Avendo definito lo span (involuppo lineare) di un insieme (finito, numerabile, continuo) di vettori di  $V$  come l'insieme di tutte le combinazioni lineari finite di tali vettori, mostrare che lo span di un insieme finito di vettori indipendenti  $\{\underline{v}^{(i)}\}_{i=1}^k$  dello spazio vettoriale  $V$ , di dimensione finita o infinita, è un sotto-spazio vettoriale  $V'$  di  $V$  tale che  $\dim V' = k$ , e che i vettori  $\{\underline{v}^{(i)}\}_{i=1}^k$  ne formano una base.

**14) Somma diretta di spazi complementari.** Avendo definito come complementari due spazi vettoriali  $V_1, V_2$  tali che  $V_1 \cap V_2 = \{\underline{0}\}$ , e avendo definito come somma diretta  $V_1 \oplus V_2$  degli spazi vettoriali complementari  $V_1, V_2$ , quello spazio i cui elementi  $\underline{x} \in V_1 \oplus V_2$  sono decomponibili nella somma  $\underline{x} = \underline{x}_1 + \underline{x}_2$ , dove  $\underline{x}_j \in V_j$ , i) mostrare che tale decomposizione è unica; ii) mostrare che  $\dim(V_1 \oplus V_2) = \dim V_1 + \dim V_2$ .

**15)** Siano  $\underline{v}^{(j)}$ ,  $j = 1, 2, 3$  tre vettori indipendenti di  $\mathbb{R}^3$ . i) Dare una in-

interpretazione geometrica ai sottospazi  $V_j = \text{span}(\underline{v}^{(j)})$ ,  $j = 1, 2, 3$  e  $\Pi_{ij} = \text{span}(\underline{v}^{(i)}, \underline{v}^{(j)})$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ ,  $i \neq j$ . ii) Mostrare che gli spazi  $V_j$ ,  $j = 1, 2, 3$  sono complementari, mentre gli spazi  $V_j$  e  $\Pi_{ij}$ , o gli spazi  $\Pi_{ij}$  e  $\mathbb{R}^3$  non lo sono. iii) Mostrare che  $\mathbb{R}^3 = \text{span}(\{\underline{v}^{(1)}, \underline{v}^{(2)}, \underline{v}^{(3)}\}) = V_1 \oplus V_2 \oplus V_3$ .

### 1.3 Spazi normati finito ed infinito-dimensionali

1) Dimostrare la disuguaglianza di Young:

$$ab \leq \frac{a^p}{p} + \frac{b^q}{q}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, \quad a, b > 0, \quad p, q \geq 1 \quad (2)$$

ed usarla per dimostrare la disuguaglianza di Holder

$$\begin{aligned} \sum_k |x_k y_k| &\leq (\sum_k |x_k|^p)^{1/p} (\sum_k |y_k|^q)^{1/q}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, \\ \int_a^b |f(t)g(t)| dt &\leq \left( \int_a^b |f(t)|^p dt \right)^{1/p} \left( \int_a^b |g(t)|^q dt \right)^{1/q}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1, \end{aligned} \quad (3)$$

R. Per la prima, scegliere  $a = \frac{|x_k|}{\|x\|}$  e  $b = \frac{|y_k|}{\|y\|}$ . Per la seconda, scegliere  $a = \frac{|f(t)|}{\|f\|_p}$  e  $b = \frac{|g(t)|}{\|g\|_q}$ .

2) Dimostrare le seguenti disuguaglianze

$$\begin{aligned} \sum_k |x_k y_k| &\leq (\sum_k |x_k|^p)^{1/p} (\sum_k |y_k|^q)^{1/q}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1 \quad \text{Holder (discreta)}, \\ \int_a^b |f(t)g(t)| dt &\leq \left( \int_a^b |f(t)|^p dt \right)^{1/p} \left( \int_a^b |g(t)|^q dt \right)^{1/q}, \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1 \quad \text{Holder (continua)}, \\ (\sum_k |x_k + y_k|^p)^{1/p} &\leq (\sum_k |x_k|^p)^{1/p} + (\sum_k |y_k|^p)^{1/p}, \quad \text{Minkowski (discreta)} \\ \left( \int_a^b |f(t) + g(t)|^p dt \right)^{1/p} &\leq \left( \int_a^b |f(t)|^p dt \right)^{1/p} + \left( \int_a^b |g(t)|^p dt \right)^{1/p}, \quad \text{Minkowski (continua)}. \end{aligned} \quad (4)$$

3) Mostrare che, se  $\underline{x} \in \mathbb{C}^n$ ,

$$\|\underline{x}\|_\infty := \max_{1 \leq k \leq n} |x_k|, \quad \|\underline{x}\|_p := \left( \sum_{k=1}^n |x_k|^p \right)^{1/p}, \quad 1 \leq p < \infty$$

sono norme; e che quindi gli spazi  $\mathbb{C}_\infty^n := (\mathbb{C}^n, \|\cdot\|_\infty)$ ;  $\mathbb{C}_p^n := (\mathbb{C}^n, \|\cdot\|_p)$ .  $1 \leq p < \infty$  sono spazi vettoriali finito-dimensionali normati (nel caso di  $\|\cdot\|_p$  usare le disuguaglianze di Holder e Minkowski).

4) Dimostrare le disuguaglianze

$$\|\underline{x}\|_\infty \leq \|\underline{x}\|_p \leq n^{1/p} \|\underline{x}\|_\infty, \quad \underline{x} \in \mathbb{C}^n, \quad (5)$$

5) Dato il vettore  $\underline{x} \in \mathbb{R}^n$ , di componenti  $x_k = 1/2^k$ ,  $1 \leq k \leq n$ , calcolare  $\|\underline{x}\|_\infty$  e  $\|\underline{x}\|_p$ ,  $1 \leq p < \infty$ .

Risp.  $\|\underline{x}\|_\infty = 1/2$ ,  $\|\underline{x}\|_p = \frac{1}{2^n} \left( \frac{2^{pn}-1}{2^p-1} \right)^{1/p}$

6) Disegnare e confrontare tra di loro le palle chiuse  $\|\underline{x}\|_\infty \leq 1$  e  $\|\underline{x}\|_p \leq 1$ ,  $p \geq 1$ , per  $\underline{x} \in \mathbb{R}^2$  e  $\underline{x} \in \mathbb{R}^3$ . A che figure geometriche corrispondono?

Risp.  $\mathbb{R}^2$ : rombo di lato  $\sqrt{2}$  ( $p = 1$ ), circonferenza di raggio 1 ( $p = 2$ ), ..., quadrato di lato 2 ( $p = \infty$ ).  $\mathbb{R}^3$ : ottaedro di lato  $\sqrt{2}$  ( $p = 1$ ), sfera di raggio 1 ( $p = 2$ ), ..., cubo di lato 2 ( $p = \infty$ ).

7) Stabilire che, se  $V$  è uno spazio vettoriale di dimensione  $n$ , le norme  $\|\underline{x}\|_\infty$  e  $\|\underline{x}\|_p$ ,  $1 \leq p < \infty$  sono equivalenti, cioè che esistono  $a, b, c \in \mathbb{R}_+$  tali che:  $a \|\underline{x}\|_p \leq \|\underline{x}\|_\infty \leq b \|\underline{x}\|_p \leq c \|\underline{x}\|_\infty$ .

Risp.  $n^{-1/p} \|\underline{x}\|_p \leq \|\underline{x}\|_\infty \leq \|\underline{x}\|_p \leq n^{1/p} \|\underline{x}\|_\infty$ ,  $\underline{x} \in \mathbb{C}^n$

8) Usare la disuguaglianza di Holder per mostrare che

i)  $\|\underline{x}\|_1 \leq \sqrt[n]{n} \|\underline{x}\|_p$   $\underline{x} \in \mathbb{C}^n$

ii)  $(\|\underline{x}\|_2)^2 \leq \|\underline{x}\|_p \|\underline{x}\|_q$

Risp. scegliere: i)  $y_k = 1$ . ii)  $y_k = x_k$

### Spazi infinito-dimensionali

9) i) Mostrare che, se la funzione  $f(x) \geq 0$  è monotona non crescente nell'intervallo  $[n, N+1]$ , allora

$$\int_n^{N+1} f(x) dx \leq \sum_{k=n}^N f(k) \leq f(n) + \int_n^N f(x) dx, \quad n, N \in \mathbb{N}. \quad (6)$$

ii) Discutere le implicazioni di queste disuguaglianze per  $N \rightarrow \infty$  e  $n$  finito o nullo, mostrando, in particolare, che la convergenza della somma  $\sum_{k=0}^{\infty} f(k)$

implica ed è implicata dalla convergenza dell'integrale  $\int_0^{\infty} f(x) dx$ . iii) Come generalizzare questi risultati al caso di  $x < 0$ ?

10) Mostrare che gli spazi  $(l_p, \|\cdot\|_p)$ ,  $1 \leq p < \infty$  (delle successioni di  $\mathbb{R}^\infty$  (di  $\mathbb{C}^\infty$ ) tali che  $\|\underline{x}\|_p < \infty$ ) e lo spazio  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$  (delle successioni di  $\mathbb{R}^\infty$  (di  $\mathbb{C}^\infty$ ) limitate, cioè tali che  $\|\underline{x}\|_\infty < \infty$  sono spazi vettoriali normati.

**11)** Sia  $\underline{x} \in \mathbb{R}^\infty$ , con componenti  $x_k = 1/a^k$ ,  $a > 1$ ,  $k \in \mathbb{N}$ . Calcolare  $\|\underline{x}\|_p$  e  $\|\underline{x}\|_\infty$ .

Risp.  $\|\underline{x}\|_\infty = 1/a$ ,  $\|\underline{x}\|_p = (a^p - 1)^{-1/p}$

**12)** Siano  $\underline{x}^\pm = \{x_n^\pm\}_{n \in \mathbb{N}_+}$ ,  $x_n^\pm = (n \pm 1)/n$ . i) A quale spazio di successioni appartengono? ii) Mostrare che  $\|\underline{x}^+\|_\infty = 2$ ,  $\|\underline{x}^-\|_\infty = 1$ .

**13)** Dato l'insieme delle successioni finite  $\{\underline{e}^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}$ , con  $e_k^{(n)} = \delta_{kn}$ , calcolare  $\|\underline{e}^{(n)} - \underline{e}^{(m)}\|_p$  e  $\|\underline{e}^{(n)} - \underline{e}^{(m)}\|_\infty$ , per  $m \neq n$ .

Risp.  $\|\underline{e}^{(n)} - \underline{e}^{(m)}\|_p = 2^{1/p}$ ,  $\|\underline{e}^{(n)} - \underline{e}^{(m)}\|_\infty = 1$ .

**14)** Data la successione  $\{\underline{x}^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}_+} \subset \mathbb{C}^\infty$ , tale che  $x_k^{(n)} = \frac{n^2}{a^{n+k}}$ ,  $n, k \in \mathbb{N}_+$ ,  $a > 1$ , calcolare  $\|\underline{x}^{(2)}\|_\infty$ ,  $\|\underline{x}^{(2)}\|_5$ ,  $\|\underline{x}^{(5)}\|_\infty$ ,  $\|\underline{x}^{(5)}\|_3$ .

R  $\|\underline{x}^{(2)}\|_\infty = \frac{4}{a^3}$ ,  $\|\underline{x}^{(2)}\|_5 = \frac{4}{a^2} \left(\frac{1}{a^5-1}\right)^{1/5}$ ,  $\|\underline{x}^{(5)}\|_\infty = \frac{25}{a^6}$ ,  $\|\underline{x}^{(5)}\|_3 = \frac{25}{a^5} \left(\frac{1}{a^3-1}\right)^{1/3}$ .

**15)** Siano  $l_f$  e  $l_0$  gli spazi delle successioni reali (o complesse) rispettivamente finite e convergenti a 0. Dimostrare le seguenti inclusioni:

$$l_f \subset l_1 \subset l_2 \subset \dots \subset l_0 \subset l_\infty \subset \mathbb{C}^\infty.$$

**16)** Dare un esempio di successione appartenente a  $l_2$ , ma non a  $l_1$ ; a  $l_3$  ma non a  $l_2$ .

Risp.  $\{1/k\}_{k \in \mathbb{N}_+} \in l_2, \notin l_1$ ;  $\{1/\sqrt{k}\}_{k \in \mathbb{N}_+} \in l_3, \notin l_2$

**17)** Dire se le norme  $\|\cdot\|_p$  sono definibili negli spazi i)  $l_\infty$ , ii)  $l_f$ , iii)  $l_0$ .

Risp. i) no; ii) sì; iii) no.

**18)** Mostrare che:

i)  $\|\underline{x}\|_\infty \leq \|\underline{x}\|_p$ ,

ii) a differenza del caso finito-dimensionale, le norme  $\|\cdot\|_p$  e  $\|\cdot\|_\infty$  non sono equivalenti, nel senso che non posso maggiorare la norma  $p$  con la norma del sup.

**19)** Individuare i valori del parametro reale  $\alpha$  tali che le seguenti successioni appartengono a  $l_p$ .

i)  $\frac{1}{n^\alpha + 1}$ ; ii)  $\sin(1/n^\alpha)$ ; iii)  $n^\alpha e^{-n^2}$ ; iv)  $n^\alpha e^{\alpha n^2}$ ; v)  $\frac{n}{(1+n^2)^\alpha}$ ;

vi)  $\left(\frac{|\sin n|}{n}\right)^\alpha$ .



Risp. i) e ii):  $\alpha > 1/p$ , iii)  $\alpha \in \mathbb{R}$ , iv)  $\alpha < 0$ , v)  $\alpha > \frac{p+1}{2p}$ , vi)  $\alpha > 1/p$

**20)** Definiti gli spazi normati  $C_p[a, b] = (C_{[a,b]}, \|\cdot\|_p)$  delle funzioni continue nell'intervallo  $[a, b]$  tali che

$$\|f(t)\|_p := \left( \int_a^b |f(t)|^p dt \right)^{1/p} < \infty,$$

e lo spazio normato  $C_\infty[a, b] := (C_{[a,b]}, \|\cdot\|_\infty)$  delle funzioni continue in  $[a, b]$  con la norma del sup (uniforme)

$$\|f(t)\|_\infty := \sup_{t \in [a,b]} |f(t)|,$$

dimostrare che:

i)  $C_p(\mathbb{R}) \subset C_q(\mathbb{R})$ ,  $1 \leq p < q$ .

ii)  $\|f(t)\|_p \leq (b-a)^{1/p} \|f(t)\|_\infty$ ,  $f \in C_{[a,b]}$ .

iii) A differenza del caso finito dimensionale, le due norme non sono equivalenti.

iv) Dedurre che la convergenza uniforme della successione di funzioni  $f_n(t) \in C_{[a,b]}$  a  $f(t)$  implica sia la convergenza nella norma  $\|\cdot\|_p$  che la convergenza puntuale  $\forall t \in [a, b]$ .

**21)** Dato lo spazio delle funzioni continue in un intervallo limitato  $[a, b]$ , ad eccezione di un insieme finito di punti  $t_i \in [a, b]$ , intorno ai quali vale la disuguaglianza

$$|f(t)| < \frac{c_i}{|t - t_i|^{\alpha_i}},$$

mostrare che, se  $f \in L_p[a, b]$ , allora  $f \in L_q[a, b]$ ,  $p > q$ .

**22)** Consideriamo l'insieme dei monomi  $\{t^n\}_{n \in \mathbb{N}} \subset C[0, 1]$ . Mostrare che  $t^n$  converge a 0 in media quadratica:  $\|t^n - 0\|_2 = (2n+1)^{-1/2} \rightarrow 0$ , mentre non converge a 0 nella norma uniforme:  $\|t^n - 0\|_\infty = 1$ . Spiegare questa differenza tra le due norme mostrando che  $t^n$  converge puntualmente ad una funzione discontinua in  $[0, 1]$ .

**23)** Individuare i valori dei parametri reali  $\alpha$  tali che le funzioni indicate appartengano a  $L_1(\mathbb{R})$ ,  $L_2(\mathbb{R})$ .

$$i) |x|^\alpha e^{-x^2}; \quad ii) |x|^\alpha e^{\alpha x^2}; \quad iii) \frac{x}{(1+x^2)^\alpha}; \quad iv) \left( \frac{|\sin x|}{|x|} \right)^\alpha;$$

Risp. (i)  $L_1(\mathbb{R})$ :  $\alpha > -1$ ,  $L_2(\mathbb{R})$ :  $\alpha > -1/2$ ; (ii)  $L_1(\mathbb{R})$ :  $-1 < \alpha < 0$ ,  $L_2(\mathbb{R})$ :  $-1/2 < \alpha < 0$ ; (iii)  $L_1(\mathbb{R})$ :  $\alpha > 1$ ,  $L_2(\mathbb{R})$ :  $\alpha > 3/4$ ; (iv)  $L_1(\mathbb{R})$ :  $\alpha > 1$ ,  $L_2(\mathbb{R})$ :  $\alpha > 1/2$ .

**24)** Indidulare i valori dei parametri reali  $\alpha$  e  $\beta$  tali che le seguenti funzioni siano  $L_1$ ,  $L_2$  negli intervalli specificati.

$$i) \frac{1}{\sqrt{1+x}} \frac{1}{|3-x^2|^\alpha}, [0, \infty); \quad ii) \frac{e^{-x^2}}{|2-x^2|^\alpha}, (-\infty, \infty);$$

$$iii) \frac{e^{\frac{\alpha}{1-x^2}}}{|1-x|^\beta}, [-1, 1]; \quad iv) |x|^\alpha \sin x, [0, \infty); \quad v) \frac{|x|^\alpha}{x^4 + 8x^2 + 1}, (-\infty, \infty);$$

$$vi) |x^2 + 2\alpha x - 3\alpha|^\alpha, (-\infty, \infty); \quad vii) \frac{|x|^{2\alpha} e^{\beta x}}{1 - \cosh x}, (-\infty, \infty);$$

$$viii) \frac{e^{-(1+\alpha)x^2}}{\sqrt{|x^2 - x - \alpha|}}, (-\infty, \infty); \quad ix) \frac{e^{-2x} \cosh(\alpha x)}{x^2 + \pi/2 + \alpha}, [0, \infty);$$

$$x) \frac{e^{-x} \sinh(\alpha x)}{x + \alpha}, [0, \infty); \quad xi) |2x^2 - (3 + 2\alpha)x + 3\alpha|^\alpha, [-2, 0];$$

$$xii) \frac{|x|^{3\alpha}}{x^4 + 8x^2 + \alpha};$$

Risp. *i)*  $L_1[0, \infty) : 1/4 < \alpha < 1$ ,  $L_2[0, \infty) : 0 < \alpha < 1/2$ ; *ii)*  $L_1(\mathbb{R}) : \alpha < 1$ ,  $L_2(\mathbb{R}) : \alpha < 1/2$ ; *iii)*  $L_1[-1, 1], L_2[-1, 1] : \alpha < 0, \forall \beta$ ;  
*iv)*  $L_1[0, \infty) : -2 < \alpha < -1$ ,  $L_2[0, \infty) : -\frac{3}{2} < \alpha < -\frac{1}{2}$ ; *v)*  $L_1(\mathbb{R}) : -1 < \alpha < 3$ ,  $L_2(\mathbb{R}) : -1/2 < \alpha < 7/2$ ; *vi)*  $L_1(\mathbb{R}) : -3 < \alpha < -1/2$ ,  $L_2(\mathbb{R}) : -3 < \alpha < -1/4$ ; *vii)*  $L_1(\mathbb{R}) : -1 < \beta < 1$ ,  $\alpha > 1/2$ ,  $L_2(\mathbb{R}) : -1 < \beta < 1$ ,  $\alpha > 3/4$ ; *viii)*  $L_1(\mathbb{R}) : -1 < \alpha$ ,  $L_2(\mathbb{R}) : -1 \leq \alpha < -1/4; \dots$

**25)** Indidulare i valori dei parametri reali  $\alpha$  e  $\beta$  tali che le seguenti funzioni siano  $L_1$  negli intervalli specificati.

$$i) x^\alpha \ln x, (0, 1); \quad ii) x^{-\alpha} \ln x, (1, \infty)$$

Risp. *i)*  $\alpha > -1$ ; *ii)*  $\alpha < -1$

**26)** Indidulare i valori del parametro reale  $\alpha$  tali che le seguenti funzioni appartengano a  $L_1$  negli intervalli specificati.

$$i) \frac{1}{x(\ln x)^\alpha}, (2, \infty); \quad ii) \frac{1}{x(\ln x)^\alpha}, (0, 1/2); \quad iii) \frac{1}{x(\ln x)^\alpha}, (1/2, 1)$$

Risp. *i)*  $\alpha > 1$ ; *ii)*  $\alpha > 1$ ; *iii)*  $\alpha < 1$

## 1.4 Spazi metrici; proprietà metriche di spazi vettoriali normati; densità, completezza, basi

1) Mostrare che  $\{\underline{x} \in \mathbb{R}^n; \|\underline{x}\|_2 = 1\}$  è uno spazio metrico, definendo come distanza la lunghezza dell'arco di geodetica congiungente ogni coppia di punti dello spazio, ma non è uno spazio vettoriale normato.

2) Mostrare che un insieme  $I$  di punti isolati di  $\mathbb{R}$  è uno spazio metrico, definendo come distanza, ad esempio, quella euclidea:  $d(x, y) = |x - y|$ ,  $x, y \in I$ , ma non è uno spazio vettoriale normato.

3) Mostrare che uno spazio vettoriale normato è anche uno spazio metrico dotato della distanza  $d(\underline{x}, \underline{y}) = \|\underline{x} - \underline{y}\|$ .

4) Dato lo spazio metrico  $(M, d)$ , si definisce **palla aperta**  $\mathcal{B}(\underline{x}_0, r)$  di centro  $\underline{x}_0 \in M$  e raggio  $r > 0$  l'insieme dei punti  $\mathcal{B}(\underline{x}_0, r) = \{\underline{x} \in M; d(\underline{x}, \underline{x}_0) < r\}$ ; **palla chiusa**  $\overline{\mathcal{B}}(\underline{x}_0, r)$  di centro  $\underline{x}_0 \in M$  e raggio  $r > 0$  l'insieme dei punti  $\overline{\mathcal{B}}(\underline{x}_0, r) = \{\underline{x} \in M; d(\underline{x}, \underline{x}_0) \leq r\}$ .

4a) Disegnare le palle aperte e chiuse di  $M = \mathbb{R}^2$  e di  $M = \{\underline{x} \in \mathbb{R}^2 : |x_1| \leq 1, |x_2| < 1\}$ , con  $d$  distanza euclidea, e confrontarle in modo critico.

4b) **Insiemi aperti e chiusi.** Sia  $(M, d)$  uno spazio metrico e  $X \subset M$  un sotto-insieme di  $M$  (che eredita la metrica di  $M$ ), allora:  
 $X$  è aperto se,  $\forall \underline{x} \in X$ , esiste  $\varepsilon > 0$  tale che  $B(\underline{x}, \varepsilon) \subset X$ .  
 $X$  è chiuso se il suo complemento  $X^C = M - X$  è aperto.

4c) Si osservi che lo spazio metrico  $(M, d)$  ambiente è sia aperto che chiuso, e si mostri che la palla aperta di  $(M, d)$  è un insieme aperto e la palla chiusa di  $(M, d)$  è un insieme chiuso.

4d) Sia  $(M, d)$  uno spazio metrico e  $X \subset M$ .

La **parte interna** di  $X$ :  $X_{int}$  è l'unione degli aperti contenuti in  $X$  (cioè l'aperto più grande contenuto in  $X$ ).

La **chiusura** di  $X$ :  $\overline{X}$  è l'intersezione dei chiusi contenenti  $X$  (cioè il chiuso più piccolo contenente  $X$ ).

La **frontiera** di  $X$ :  $\partial X := \overline{X} - X_{int}$  (l'insieme dei punti  $\underline{x} \in M$  tali che  $B(\underline{x}, \varepsilon)$  contiene sia elementi di  $X$  che elementi dell'insieme complementare  $X^C = M - X$ ).

4e) Mostrare che

$$X \text{ chiuso} \Leftrightarrow X = \overline{X} \quad (7)$$

4f) Si consideri l'insieme di punti del piano  $X = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : 0 < x_1 \leq 1, 0 \leq x_2 < 1\}$ , inteso come sott'insieme di  $M_1 = \mathbb{R}^2$ , oppure di

$M_2 = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : |x_1| \leq 1, |x_2| < 1\}$ , sempre con metrica euclidea. Caratterizzare e disegnare, nei due casi,  $X_{int}, \overline{X}, X^C, \partial X$ , e valutare criticamente le differenze.

**4g)** Si consideri l'insieme di punti del piano  $X = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x_1 < 1, x_2 = 0\}$ , inteso come sott'insieme di  $M_1 = \mathbb{R}^2$ , oppure di  $M_2 = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_1 < 1, x_2 = 0\}$ , sempre con metrica euclidea. Caratterizzare e disegnare, nei due casi,  $X_{int}, \overline{X}, X^C, \partial X$ , e valutare criticamente le differenze.

**4h)** Si consideri l'insieme di punti del piano  $X = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : 0 < x_1 < 1, x_2 = 0\}$ , inteso come sott'insieme di  $M_1 = \mathbb{R}^2$ , oppure di  $M_2 = \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_1 < 1, x_2 = 0\}$ , sempre con metrica euclidea. Caratterizzare e disegnare, nei due casi,  $X_{int}, \overline{X}, X^C, \partial X$ , e valutare criticamente le differenze.

**4i) Punto di aderenza e di accumulazione.** Sia  $(M, d)$  uno spazio metrico e  $X \subset M$ .  $\underline{x} \in M$  è punto d'aderenza di  $X$  se la palla  $B(\underline{x}, \varepsilon)$  contiene almeno un punto di  $X$ ,  $\forall \varepsilon > 0$ . Se  $\underline{x} \in M$  è anche contenuto in  $X$ ,  $\underline{x}$  è sempre di aderenza, anche se è un punto isolato di  $X$  (in questo caso è l'unico punto di cui sopra, per  $\varepsilon$  suff. piccolo). Se  $\underline{x} \in M$  (ma  $\underline{x} \notin X$ ) è punto di aderenza, è allora possibile costruire una successione di punti di  $X$  che converge a  $\underline{x}$  nel seguente modo. Per un certo  $\varepsilon = \varepsilon_1$  scelgo un  $\underline{x}_1 \in X$  contenuto in  $B(\underline{x}, \varepsilon_1)$  (che esiste, per definizione); scelgo poi un  $\underline{x}_2 \in X$  contenuto in  $B(\underline{x}, \varepsilon_2 = \varepsilon_1/2)$ , e così via, generando una successione di punti  $\{\underline{x}_n\}_{n \in \mathbb{N}^+} \subset X$  tale che  $d(\underline{x}_n, \underline{x}) < \varepsilon_n = \varepsilon/2^{n-1}$ . In questo caso il punto di aderenza è chiamato, per ovvie ragioni, punto di accumulazione (o punto limite).

**4l)** Mostrare che

i)  $\overline{X} = \{\text{insieme dei punti di aderenza di } X\}$ .

ii) Mostrare che, se lo spazio metrico è anche uno spazio vettoriale, esso non contiene punti isolati. Quindi, in questo caso, i punti di aderenza sono punti di accumulazione, e:

$\overline{X} = \{\text{insieme dei punti di accumulazione di } X\}$ .

**5)** Un sottoinsieme  $(S, d) \subset (M, d)$  è detto i) "limitato" se è contenuto in qualche palla; ii) "totalmente limitato" se,  $\forall \epsilon > 0$ , esiste un insieme finito di punti  $X_\epsilon = \{\underline{x}_1, \dots, \underline{x}_n\}$ ,  $\underline{x}_j \in X_\epsilon$ ,  $j = 1, \dots, n$  (detto  $\epsilon$ -reticolo) tali che,  $\forall \underline{x} \in S$ ,  $d(\underline{x}, \underline{x}_j) < \epsilon$ , per qualche  $\underline{x}_j \in X_\epsilon$  (ovvero  $S$  ha il ricoprimento finito:  $S \subset \bigcup_{k=1}^n \mathcal{B}(\underline{x}_k, \epsilon)$ ).

i) L'insieme dei punti  $\{(m, n), -10 \leq m, n \leq 10\} \subset \mathbb{R}^2$  è un  $\epsilon$ -reticolo per quale valore di  $\epsilon$ ? ii) Mostrare che, se  $S$  è totalmente limitato,

a)  $S$  è limitato; b) non si può costruire una successione  $\{\underline{y}^{(j)}\}_{j \in \mathbb{N}} \subset S$  tale che  $d(\underline{y}^{(i)}, \underline{y}^{(j)}) \geq \epsilon_0$ , per ogni  $\epsilon_0$ .

**6)** Mentre, nel caso finito dimensionale, un insieme limitato è anche totalmente limitato, nel caso infinito dimensionale ciò non è vero. Mostrare infatti che la palla  $\overline{\mathcal{B}(\underline{0}, 1)}$  è un insieme limitato ma non totalmente limitato in  $(l_p, \|\cdot\|_p)$  e/o in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$  (si utilizzi la successione  $\{\underline{e}^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}$ , con  $e_m^{(n)} = \delta_{nm}$ ).

**7)** Mostrare che, in uno spazio metrico  $(M, d)$  completo, le nozioni di sottoinsieme  $S \subset M$  chiuso e completo coincidono.

**8)** i) Mostrare che, in uno spazio metrico  $(M, d)$ , un sottoinsieme  $S \subset M$  è compatto se e solo se è completo e totalmente limitato (questo risultato generalizza, al caso infinito - dimensionale, il teorema di Heine - Borel, che afferma che un insieme  $S \subset \mathbb{R}^n$  è compatto se e solo se è chiuso e limitato).

**9)** i) Dare un esempio di insieme chiuso e limitato che non è compatto (vedere gli esercizi 6 e 8). ii) Dare un esempio di sottoinsieme che non è aperto, né chiuso e né compatto. iii) Mostrare esempi di sottoinsiemi chiusi, ma non compatti.

**10)** Mostrare che ogni sottoinsieme  $S$  chiuso dello spazio metrico  $(M, d)$  compatto è compatto.

**11)** Mostrare che: i)  $l_f$  non è chiuso né in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ , né in  $(l_p, \|\cdot\|_p)$ ; ii)  $l_p$  non è chiuso in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ ; iii)  $l_0$  è chiuso in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ ; iv)  $l_0$  è la chiusura di  $l_p$  in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ ; v)  $l_q$  è la chiusura di  $l_p$ ,  $p < q$ , in  $(l_q, \|\cdot\|_q)$ .

**12)** Data la successione di successioni  $\underline{x}^{(n)}$ , con  $x_k^{(n)} = \frac{n}{k^{1/3} + nk^{1/6}}$ , i) qual'è lo spazio  $l_p$ ,  $p \geq 1$  più piccolo a cui appartiene? ii) Determinare la successione  $\underline{x} = \{x_k\}$  alla quale converge per componenti (puntualmente), ed individuare lo spazio  $l_q$ ,  $q \geq 1$  più piccolo a cui  $\underline{x}$  appartiene. iii) Mostrare che  $\|\underline{x}^{(n)} - \underline{x}\|_\infty \rightarrow 0$  per  $n \rightarrow \infty$  e dedurre qualcosa sulle proprietà di chiusura di  $l_p$  in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ .

R. i)  $l_4$ ; ii)  $\{k^{-1/6}\}_{k \in \mathbb{N}_+} \in l_7$ ; iii)  $\|\underline{x}^{(n)} - \underline{x}\|_\infty = 1/(n+1) \rightarrow 0$ ,  $l_4$  non è chiuso in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$

**13)** Utilizzando la completezza di  $\mathbb{R}$  e  $\mathbb{C}$ , dimostrare che  $\mathbb{R}_p^n$  e  $\mathbb{C}_p^n$  sono completi.

**14)** Utilizzando la completezza di  $\mathbb{C}$ , mostrare che gli spazi  $(l_p, \|\cdot\|_p)$ ,  $p \geq 1$ , e  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$  sono completi.

**15)** Mostrare che lo spazio  $C_\infty[a, b] = (C_{[a, b]}, \|\cdot\|_\infty)$  è completo, mentre

lo spazio  $C_p[a, b] = (C_{[a, b]}, \|\cdot\|_p)$  non lo è (per quest'ultimo punto basta trovare una successione di Cauchy  $\{f_n(t)\} \subset C_{[a, b]}$  che converge puntualmente ad una funzione discontinua). Qual'è allora il completamento di  $C_p[a, b]$ ? Vedere i prossimi esercizi.

**16)** *Gli spazi  $L_p[a, b]$  come completamento degli spazi  $C_p[a, b]$ .*

**a)** Sia  $\chi_E(x)$  la funzione caratteristica dell'insieme misurabile  $E \subset \mathbb{R}$ :  $\chi_E(x) = 0$ ,  $x \notin E$ ,  $\chi_E(x) = 1$ ,  $x \in E$ . Si definisce *funzione  $\mu$ -semplice* la funzione

$$f_\mu(x) = \sum_k c_k \chi_{E_k}(x),$$

dove gli insiemi  $E_k$  sono disgiunti e la loro unione coincide con  $[a, b]$ . Le funzioni  $\mu$ -semplici coincidono con le funzioni costanti a tratti, quando gli insiemi misurabili  $E_k$  sono intervalli ordinari di  $[a, b]$ . Vale il seguente risultato (da giustificare in modo qualitativo):

*Ogni funzione  $f(x) \in L_2[a, b]$  è approssimabile in media quadratica (in norma  $\|\cdot\|_2$ ) da successioni di funzioni  $\mu$ -semplici  $f_\mu(x)$  (cioè lo spazio delle funzioni  $\mu$ -semplici è denso in  $L_2$  nella norma  $\|\cdot\|_2$ ).*

**b)** Mostrare che, per ogni funzione  $f(x)$  costante a tratti (o, più in generale, per ogni funzione  $\mu$ -semplice), esiste una successione  $\{f_n(x)\}$  di funzioni continue che converge ad essa nella norma  $\|\cdot\|_2$  (in media quadratica), ma non nella norma uniforme  $\|\cdot\|_\infty$ . Cioè lo spazio delle funzioni continue è denso, rispetto alla norma  $\|\cdot\|_2$ , nello spazio delle funzioni  $\mu$ -semplici. Suggerimento: per convincersi di ciò, basta mostrarlo per la funzione gradino  $H(x)$ :  $H(x) = 0$ ,  $x < 0$ ,  $H(x) = 1$ ,  $x > 0$ , scegliendo la successione:

$$f_n(x) = \begin{cases} 0, & x \leq -\frac{1}{n}, \\ \frac{n}{2}x + \frac{1}{2}, & -\frac{1}{n} \leq x \leq \frac{1}{n}, \\ 1, & x \geq \frac{1}{n}. \end{cases} \quad (8)$$

Allora:  $\|f_n - H\|_2 \rightarrow 0$ ,  $n \rightarrow \infty$ , mentre  $\|f_n - H\|_\infty = 1/2$ ,  $\forall n$ . Dedurre che lo spazio delle funzioni continue è denso in  $L_2$ :  $\overline{C[a, b]} = L_2[a, b]$

**c)** Mostrare che lo spazio  $\{f \in C[-\pi, \pi], f(-\pi) = f(\pi)\}$  è denso  $C_2[-\pi, \pi]$  e, quindi, in  $L_2[-\pi, \pi]$ .

**17)** Mostrare che, se in uno spazio metrico  $(M, d)$  i sottoinsiemi  $A \subset B \subset C$  sono tali che  $A$  è denso in  $B$  e  $B$  è denso in  $C$ , allora  $A$  è denso in  $C$ .

**18)** Mostrare che  $l_f$  è denso sia in  $(l_0, \|\cdot\|_\infty)$  che in  $(l_p, \|\cdot\|_p)$ ; ma non è denso in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ .

**19)** Dimostrare (con l'ausilio di qualche libro di testo) i due teoremi di Weierstrass qui sotto riportati sull'approssimazione di funzioni continue mediante

polinomi e polinomi trigonometrici.

*Il primo teorema di Weierstrass.* Se  $f(t) \in C[0, 1]$ , allora la successione di polinomi  $\{P_n(t)\}$  definita da

$$P_n(t) = \sum_{k=0}^n f\left(\frac{k}{n}\right) \binom{n}{k} t^k (1-t)^{n-k}$$

converge uniformemente (cioè, nella norma del sup) a  $f(t)$ , su tutto l'intervallo  $[0, 1]$ . Cioè lo spazio dei polinomi è denso in  $(C_{[0,1]}, \|\cdot\|_\infty)$ , e quindi anche in  $C_p[0, 1]$ .

*Il secondo teorema di Weierstrass.* Se  $f(t) \in C[-\pi, \pi]$  ed è periodica di periodo  $2\pi$ , allora,  $\forall \epsilon > 0$ , esiste una successione di polinomi trigonometrici:

$$F_n(t) = \frac{a_0}{\sqrt{2\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \sum_{k=1}^n a_k \cos kt + \sum_{k=1}^n b_k \sin kt \right)$$

tale che  $|f(t) - F_n(t)| < \epsilon$ , uniformemente in  $t \in [-\pi, \pi]$ . Cioè lo spazio dei polinomi trigonometrici è denso in  $\{f \in C_{[-\pi, \pi]}; f(-\pi) = f(\pi)\}$  nella norma uniforme, e quindi, dall'esercizio 3.0.3 - 15), anche rispetto a  $\|\cdot\|_p$ .

### Insiemi completi di vettori, basi e separabilità

**20)** Qual'è lo span dei seguenti insiemi di vettori?

- i)  $\text{span}\{\underline{e}^{(j)}\}_1^k \subset \mathbb{C}^n$ ,  $e_l^{(j)} = \delta_{jl}$ ,  $k < n$ ,
- ii)  $\text{span}\{\underline{e}^{(j)}\}_1^n \subset \mathbb{C}^n$ ,  $e_l^{(j)} = \delta_{jl}$ ,
- iii)  $\text{span}\{\underline{e}^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}$ ,  $e_k^{(n)} = \delta_{nk}$ ,
- iv)  $\text{span}\{t^k\}_{k=0, \dots, n-1}$ ,
- v)  $\text{span}\{t^n\}_{n \in \mathbb{N}}$ .

Risp. i)  $\{\underline{x} = (x_1, \dots, x_k, 0, \dots, 0) \in \mathbb{C}^n, x_j \in \mathbb{C}\} \subset \mathbb{C}^n$ , isomorfo a  $\mathbb{C}^k$ ,  $k < n$ ;  
 ii)  $\mathbb{C}^n$ ; iii) insieme  $l_f$  delle successioni finite; iv) insieme  $\mathcal{P}_n$  dei polinomi di grado  $n - 1$ ; v) insieme dei polinomi.

**21)** Mostrare che

- i)  $\text{span}(\{\underline{e}^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}) = l_f$  è denso negli spazi  $(l_0, \|\cdot\|_\infty)$  e  $(l_p, \|\cdot\|_p)$ , ma non in  $(l_\infty, \|\cdot\|_\infty)$ .
- ii) L'insieme dei vettori  $\{\underline{e}^{(n)}\}_{n \in \mathbb{N}}$  è una buona base di  $(l_0, \|\cdot\|_\infty)$  e  $(l_p, \|\cdot\|_p)$ .

**22)** Mostrare che:

- i)  $\text{span}(\{t^n\}_{n \in \mathbb{N}}) = \text{spazio dei polinomi}$  è denso in  $C_\infty[a, b]$ , e quindi anche in  $C_p[a, b]$ .
- ii) L'insieme dei monomi  $\{t^n\}_{n \in \mathbb{N}}$  è una buona base di  $C_\infty[a, b]$  (e quindi di  $C_p[a, b]$ ).

**23) La base di Fourier.** Mostrare che:

- i)  $\text{span}(\{e^{int}\}_{n \in \mathbb{Z}})$  = spazio dei polinomi trigonometrici è denso in  $\{f \in C[-\pi, \pi], f(-\pi) = f(\pi)\}$  nella norma uniforme, e quindi anche rispetto a  $\|\cdot\|_p$ .
- ii) L'insieme dei monomi trigonometrici  $\{e^{int}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  è una buona base di  $\{f \in C[-\pi, \pi], f(-\pi) = f(\pi)\}$ , nella norma uniforme e in quella  $\|\cdot\|_p$ .
- iii) Poichè lo spazio  $\{f \in C_2[-\pi, \pi], f(-\pi) = f(\pi)\}$  è denso  $C_2[-\pi, \pi]$  e, quindi, in  $L_2[-\pi, \pi]$ ; dedurre che l'insieme dei monomi trigonometrici è una buona base (la base di Fourier) in  $L_2[-\pi, \pi]$ .

**24)** Mostrare che gli spazi metrici i)  $\mathbb{R}_p$ , ii)  $\mathbb{R}_p^n$ , iii)  $\mathbb{C}_p$ , iv)  $\mathbb{C}_p^n$ , v)  $l_p$ , vi)  $C_{[a,b]}$ , vii)  $C_p[a,b]$  sono spazi metrici separabili.

Risp. i corrispondenti sottoinsiemi densi e numerabili sono i)  $\mathbb{Q}$ , ii)  $\mathbb{Q}^n$ , v) l'insieme delle successioni limitate di razionali; vi), vii) l'insieme dei polinomi a coefficienti razionali.

**25)** *Convergenza uniforme ed in media per spazi di successioni.*

Mostrare che, dalla disuguaglianza  $\|\underline{x}\|_\infty \leq \|\underline{x}\|_p$ ,  $\underline{x} \in l_p$ , segue che, per spazi di successioni, la convergenza in media implica la convergenza uniforme.

**26)** Mostrare che i) la successione  $\underline{x}^{(n)}$ ,  $x_k^{(n)} = \frac{k}{n(k+1)}$  converge uniformemente alla successione  $\underline{0}$ , ma non appartiene a  $l_p$ ; ii) la successione  $\underline{x}^{(n)} \in l_f$ ,  $x_k^{(n)} = \frac{1}{n^a}$ ,  $a > 0$ ,  $k \leq n$ ,  $x_k^{(n)} = 0$ ,  $k > n$  converge uniformemente alla successione  $\underline{0}$ , mentre converge a  $\underline{0}$  in norma  $p$  solo se  $a > 1/p$ ; iii) la successione  $\underline{x}^{(n)} \in l_f$ ,  $x_k^{(n)} = 1$ ,  $k \leq n$ ,  $x_k^{(n)} = 0$ ,  $k > n$  è tale che  $\|\underline{x}^{(n)}\|_\infty = 1$  e  $\|\underline{x}^{(n)}\|_p = n^{1/p}$ . Verificare che, in tutti questi casi, la disuguaglianza  $\|\underline{x}\|_\infty \leq \|\underline{x}\|_p$ ,  $\underline{x} \in l_p$  dell'esercizio precedente è verificata.

**27)** *Convergenza uniforme, in media, in media quadratica e puntuale per spazi funzionali.*

i) Usando le disuguaglianze  $\|f(t)\|_p \leq (b-a)^{1/p} \|f(t)\|_\infty$  e  $\|f\|_1 \leq \sqrt{b-a} \|f\|_2$ ,  $f \in C[a,b]$  (per la seconda, si usi la disuguaglianza di Cauchy - Schwartz), mostrare a) che la convergenza uniforme (nella norma del sup) in  $[a,b]$  implica sia la convergenza puntuale che quella in  $L_p[a,b]$ ,  $1 \leq p$ ; ii) che la convergenza in media quadratica implica la convergenza in media.

ii) Mostrare che la convergenza in  $L_p[a,b]$  non implica né la convergenza uniforme né quella puntuale.

iii) Mostrare che la convergenza puntuale non implica quella uniforme e neppure quella in media.

Sugg. Per il punto ii), considerare i seguenti esempi. a) la successione di funzioni  $f_n(x) = e^{-nx}$  in  $(0,1)$ , mostrando che:  $\|f_n - 0\|_p = (1 - e^{-np})/(np) \rightarrow$



0,  $n \rightarrow \infty$ , mentre  $\|f_n - 0\|_\infty = 1, \forall n$  (in questo caso,  $f_n(x)$  converge a 0 in  $(0, 1)$  anche puntualmente). b) La successione  $f_n(x)$  delle somme parziali di Fourier; essa converge a  $f(x) \in L_2[a, b]$  in media quadratica:  $\|f_n(x) - f(x)\|_2 \rightarrow 0$  ma, in generale, non converge puntualmente (basta scegliere  $f(x)$  discontinuo), e quindi non c'è neppure convergenza uniforme.

c) La successione di funzioni

$\{f_1^{(1)}, f_1^{(2)}, f_2^{(2)}, f_1^{(3)}, f_2^{(3)}, f_3^{(3)}, f_1^{(4)}, f_2^{(4)}, f_3^{(4)}, f_4^{(4)}, f_1^{(5)}, \dots\}$  definita così:

$$f_i^{(k)}(x) = \begin{cases} 1 & x \in I, \quad I = (\frac{i-1}{k}, \frac{i}{k}], \\ 0 & x \notin I, \end{cases} \quad (9)$$

mostrando che  $f_i^{(k)}(x)$  converge a 0 in media quadratica:  $\|f_i^{(k)}(x) - 0\|_2 \rightarrow 0$ , ma *non converge in nessun punto* dell'intervallo, poichè, per ogni  $x \in [0, 1]$ , esiste un valore di  $(i, k)$  arbitrariamente grande tale che  $f_i^{(k)}(x) = 1$  oppure  $f_i^{(k)}(x) = 0$ ; inoltre  $\|f_i^{(k)}(x) - 0\|_\infty = 1$ . Per il punto iii), si consideri infine la successione

$$f_n(x) = \begin{cases} \sqrt{n} & x \in (0, \frac{1}{n}], \\ 0 & x \notin (0, \frac{1}{n}], \end{cases} \quad (10)$$

mostrando che  $f_n(x)$  converge a 0 puntualmente in  $(0, 1)$ , mentre  $\|f_n - 0\|_2 \rightarrow 1$  e  $\|f_n - 0\|_\infty = \sqrt{n} \rightarrow \infty$ .

## 1.5 Spazi euclidei

1) Mostrare che i vettori  $\underline{v}^{(1)} = (1, 1)$ ,  $\underline{v}^{(2)} = (2, -i) \in \mathbb{C}^2$  sono indipendenti; quindi ortonormalizzarli.

R.  $\underline{e}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1)$ ,  $\underline{e}^{(2)} = \sqrt{\frac{2}{5}}(1 + \frac{i}{2})(1, -1)$

2) Mostrare che i vettori  $\underline{v}^{(1)} = (1, 0, -1)$ ,  $\underline{v}^{(2)} = (3, -2i, -1)$ ,  $\underline{v}^{(3)} = (4 + i, -1 - 6i, 2 + i) \in \mathbb{C}^3$  sono indipendenti; quindi ortonormalizzarli.

R.  $\underline{e}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 0, -1)$ ,  $\underline{e}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{6}}(1, -2i, 1)$ ,  $\underline{e}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i, -1, i)$

3) i) Mostrare che i vettori  $\underline{v}^{(1)} = (1, 0, 0)$ ,  $\underline{v}^{(2)} = (a, 1, 0)$ ,  $\underline{v}^{(3)} = (c, b, 1) \in \mathbb{C}^3$ ,  $a, b, c \in \mathbb{C}$  sono indipendenti; quindi ortonormalizzarli. ii) Mostrare che i vettori  $\underline{v}^{(1)} = (1, 0, -1)$ ,  $\underline{v}^{(2)} = (3, -2i, 1)$ ,  $\underline{v}^{(3)} = (4 + i, -1 - 6i, 2 + i) \in \mathbb{C}^3$  sono indipendenti; quindi ortonormalizzarli.

R. i)  $\{\underline{e}^{(j)}\}_1^3$ ,  $e_k^{(j)} = \delta_{jk}$ ; ii)  $\underline{e}^{(1)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 0, -1)$ ,  $\underline{e}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}}(1, -i, 1)$ ,  $\underline{e}^{(3)} = \frac{3-2i}{\sqrt{78}}(1, 2i, 1)$

4) i) Mostrare che i vettori  $\underline{v}^{(1)} = (0, 0, 1)$ ,  $\underline{v}^{(2)} = (1, i, a)$ ,  $\underline{v}^{(3)} = (b, i(b - 2), c) \in \mathbb{C}^3$ ,  $a, b, c \in \mathbb{C}$  sono indipendenti; quindi ortonormalizzarli. ii)

Mostrare che le funzioni  $f = e^{-x}$ ,  $g = xe^{-x}$  sono indipendenti in  $L_2[0, \infty)$ , e ortonormalizzarle

R. i)  $\underline{e}^{(1)} = (0, 0, 1)$ ,  $\underline{e}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, i, 0)$ ,  $\underline{e}^{(3)} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -i, 0)$ . ii)  $e^{(1)}(x) = 2e^{-x}$ ,  $e^{(2)}(x) = 2\sqrt{2}(x - \frac{1}{2})e^{-x}$ .

**5)** Dimostrare la disuguaglianza di Cauchy-Schwartz:  $|(y, \underline{x})|^2 \leq (y, y)(\underline{x}, \underline{x})$  e usarla per mostrare che  $\|\underline{x}\| := \sqrt{(\underline{x}, \underline{x})}$  è una norma; dedurre che uno spazio euclideo è anche normato e metrico, con distanza  $d(\underline{x}, \underline{y}) = \|\underline{x} - \underline{y}\|$

**6)** Dimostrare il teorema di Pitagora: *Se i vettori  $\{\underline{x}^{(k)}\}_1^n$  sono ortogonali, allora*

$$\|\sum_{k=1}^n \underline{x}^{(k)}\|^2 = \sum_{k=1}^n \|\underline{x}^{(k)}\|^2. \quad (11)$$

**7) Tensore metrico** i) Mostrare che, se la base  $\{\underline{e}^{(j)}\}_1^n$  di uno spazio euclideo  $E$  non è ortonormale, allora,  $\forall \underline{x}, \underline{y} \in E$ ,

$$(\underline{x}, \underline{y}) = \sum_{i,j=1}^n g_{ij} \bar{x}_i y_j, \quad g_{ij} := (\underline{e}^{(i)}, \underline{e}^{(j)}). \quad (12)$$

ii) mostrare che la matrice  $(n \times n)$   $g = (g_{ij})$  è hermitiana non negativa (si verifichi che  $(\underline{x}, \underline{x}) \geq 0$ ,  $\forall \underline{x}_j \in \mathbb{C}$ ).

La matrice  $(g_{ij})$  è detta “tensore metrico”. Se  $E$  è uno spazio pseudo-euclideo (come lo spazio di Minkovski), la matrice  $g$  è solo hermitiana.

**8)** Mostrare che:

i)  $\mathbb{C}_2^n$  è uno spazio euclideo, con prodotto scalare

$$(\underline{\xi}, \underline{\eta}) := \sum_{k=1}^n \bar{\xi}_k \eta_k, \quad \underline{\xi}, \underline{\eta} \in \mathbb{C}^n. \quad (13)$$

ii) La sua base ortonormale canonica è data dai vettori  $\{\underline{e}^{(j)}\}_1^n$ ,  $e_i^{(j)} = \delta_{ji}$ .

iii) Valgono le seguenti disuguaglianze:

$$\begin{aligned} |\sum_{k=1}^n \bar{\xi}_k \eta_k|^2 &\leq \left( \sum_{k=1}^n |\xi_k|^2 \right) \left( \sum_{k=1}^n |\eta_k|^2 \right), \quad \text{disug. di Cauchy-Schwartz} \\ \left( \sum_{k=1}^n |\xi_k + \eta_k|^2 \right)^{1/2} &\leq \left( \sum_{k=1}^n |\xi_k|^2 \right)^{1/2} + \left( \sum_{k=1}^n |\eta_k|^2 \right)^{1/2}, \quad \text{disug. di Minkowski} \end{aligned} \quad (14)$$

**9)** Mostrare che:

i) lo spazio  $l_2$  è euclideo, con

$$(\underline{\xi}, \underline{\eta}) := \sum_{k=1}^{\infty} \bar{\xi}_k \eta_k, \quad \underline{\xi}, \underline{\eta} \in l_2. \quad (15)$$

ii) La sua base ortonormale canonica è data dai vettori  $\{\underline{e}^{(j)}\}_1^n$ ,  $e_i^{(j)} = \delta_{ji}$  e valgono le disuguaglianze presenti nell'esercizio precedente, sostituendo  $n$  con  $\infty$ .

**10)** Mostrare che:

i) lo spazio  $\text{Mat}(n, \mathbb{C})$  delle matrici  $(n \times n)$  a coefficienti complessi è uno spazio euclideo, con prodotto scalare

$$(X, Y) := \text{tr}(X^\dagger Y) \quad \left( = \sum_{i,j=1}^n \bar{X}_{ij} Y_{ij} \right), \quad X, Y \in \text{Mat}(n, \mathbb{C}), \quad (16)$$

dove  $X^\dagger = \overline{X^T}$  è la matrice hermitiana coniugata (aggiunta) della matrice  $X$ , di componenti  $(X^\dagger)_{ij} = \bar{X}_{ji}$ ;

ii) la norma e la distanza euclidea di matrici sono quindi date da:

$$\begin{aligned} \|X\|_2 &= \left( \sum_{i,j=1}^n |X_{ij}|^2 \right)^{1/2}, \\ \|X - Y\|_2 &= \left( \sum_{i,j=1}^n |X_{ij} - Y_{ij}|^2 \right)^{1/2}; \end{aligned} \quad (17)$$

iii) valgono le seguenti disuguaglianze:

$$\begin{aligned} \left| \sum_{i,j=1}^n \bar{X}_{ij} Y_{ij} \right|^2 &\leq \left( \sum_{i,j=1}^n |X_{ij}|^2 \right) \left( \sum_{i,j=1}^n |Y_{ij}|^2 \right), \quad \text{Cauchy-Schwartz} \\ \left( \sum_{i,j=1}^n |X_{ij} + Y_{ij}|^2 \right)^{1/2} &\leq \left( \sum_{i,j=1}^n |X_{ij}|^2 \right)^{1/2} + \left( \sum_{i,j=1}^n |Y_{ij}|^2 \right)^{1/2}, \quad \text{Minkowski}; \end{aligned} \quad (18)$$

iv) la base ortonormale naturale è  $\{E^{(i,j)}\}_{i,j=1}^n$ , dove

$$(E^{(i,j)})_{kl} = \delta_{ik} \delta_{jl}. \quad (19)$$

**11)** Mostrare che:

i) lo spazio  $\mathcal{P}_n$  dei polinomi di grado  $(n - 1)$  è uno spazio euclideo di dimensione  $n$ , con il prodotto scalare

$$(f, g) = \int_a^b \overline{f(t)}g(t)dt; \quad (20)$$

ii) la norma e la distanza euclidea sono quindi date da:

$$\begin{aligned} \|f\|_2 = (f, f)^{1/2} &= \left( \int_a^b |f(t)|^2 dt \right)^{1/2}, \\ d_2(f, g) = \|f - g\|_2 = (f - g, f - g)^{1/2} &= \left( \int_a^b |f(t) - g(t)|^2 dt \right)^{1/2}; \end{aligned} \quad (21)$$

iii) valgono le seguenti disuguaglianze:

$$\begin{aligned} \left| \int_a^b \overline{f(t)}g(t)dt \right|^2 &\leq \left( \int_a^b |f(t)|^2 dt \right) \left( \int_a^b |g(t)|^2 dt \right), \quad \text{Cauchy-Schwartz} \\ \left( \int_a^b |f(t) + g(t)|^2 dt \right)^{1/2} &\leq \left( \int_a^b |f(t)|^2 dt \right)^{1/2} + \left( \int_a^b |g(t)|^2 dt \right)^{1/2}, \quad \text{Minkowski.} \end{aligned} \quad (22)$$

iv) i vettori  $\{t^{j-1}\}_1^n$  sono indipendenti (mostrarlo) (quindi formano una base) ma non ortogonali.

v) Ortogonalizzarli, nell'intervallo  $[-1, 1]$ , ottenendo:

$$1, t, t^2 - \frac{1}{3}, t^3 - \frac{3}{5}t, ..$$

vi) Verificare che questi polinomi ortogonali coincidono, a meno di costanti moltiplicative, con i polinomi di Legendre  $L_k(t)$  (che sono ortogonali ma non ortonormali):

$$L_k(t) := \frac{1}{2^k k!} \frac{d^k}{dt^k} (t^2 - 1)^k, \quad k = 0, 1, ..$$

che sono ortogonali:  $\int_{-1}^1 L_m(t)L_n(t)dt = 0$ , se  $m \neq n$  (verificarlo!), ma non ortonormali.

vii) Costruire infine la base ortonormale  $\{P_j(t)\}_{j \in \mathbb{N}}$ :

$$e_0(t) = 1, \quad e_1(t) = \sqrt{\frac{3}{2}}t, \quad e_2(t) = \frac{3}{2}\sqrt{\frac{5}{2}}\left(t^2 - \frac{1}{3}\right), \quad e_3(t) = \frac{5}{2}\sqrt{\frac{7}{2}}\left(t^3 - \frac{3}{5}t\right), \quad ..$$

**12)** Mostrare che gli spazi  $C_2[a, b]$  e  $L_2[a, b]$  sono euclidei rispetto al prodotto scalare definito nell'esercizio precedente, nel quale sono indicate anche le corrispondenti norma e distanza, e le disuguaglianze di Cauchy-Schwartz e Minkowski.

**13)** Usare la disuguaglianza di Cauchy-Schwartz  $|(f, g)| \leq \|f\|_2 \|g\|_2$  per ottenere le disuguaglianze:

$$\|fg\|_1 \leq \|f\|_2 \|g\|_2, \quad \|f\|_1 \leq \sqrt{b-a} \|f\|_2, \quad f, g \in L_2$$

e dedurre che i)  $f, g \in L_2 \Rightarrow fg \in L_1$ ; ii)  $f \in L_2[a, b] \Rightarrow f \in L_1[a, b]$ .

R. Scegliere i)  $g(t) = \frac{f(t)}{|f(t)|} |g(t)|$  e ii)  $g(t) = \frac{f(t)}{|f(t)|}$ .

**14)** Dimostrare che, se lo spazio euclideo è separabile, allora esiste in esso una base ortonormale. (Suggerimento: la separabilità implica l'esistenza di una base numerabile  $\{\underline{x}^{(j)}\}_{j \in \mathbb{N}}$ ; da essa, usando il procedimento di Gram-Schmidt, trovare un insieme di vettori ortonormali  $\{\underline{e}^{(j)}\}_{j \in \mathbb{N}}$ , mostrando che, ad ogni passo finito  $n$ ,  $\text{span}(\{\underline{x}^{(j)}\}_1^n) = \text{span}(\{\underline{e}^{(j)}\}_1^n)$ , e che quindi l'insieme di vettori  $\{\underline{e}^{(j)}\}_{j \in \mathbb{N}}$  è la base ortonormale cercata).

**15)** Sia  $S$  un sottospazio dello spazio euclideo  $E$ , e sia  $\{\underline{e}^{(j)}\}_{j=1}^N$  ( $N$  finito o infinito) una base ortonormale di  $S$ . Mostrare che, dato il generico vettore  $\underline{x} \in E$ ,

i) il vettore di  $S$  che meglio approssima  $\underline{x}$  è

$$\begin{aligned} \underline{x}^{(N)} &= \sum_{i=1}^N \xi_i \underline{e}^{(i)}, \\ \xi_i &:= (\underline{e}^{(i)}, \underline{x}), \quad \text{coefficienti di Fourier di } \underline{x} \text{ rispetto a } \{\underline{e}^{(j)}\}_{j=1}^N. \end{aligned} \quad (23)$$

ii) il vettore  $\underline{x}^{(N)}$  è la "proiezione ortogonale" di  $\underline{x} \in E$  su  $S$ , verificando cioè che il vettore  $(\underline{x} - \underline{x}^{(N)})$  è ortogonale a tutti i vettori di  $S$ ;

iii) vale la disuguaglianza di Bessel:

$$\|\underline{x}\|^2 \geq \sum_{i=1}^N |\xi_i|^2. \quad (24)$$

iv) Se,  $\forall \underline{x} \in E$ , vale la relazione di Parseval:

$$\|\underline{x}\|^2 = \sum_{i=1}^{\infty} |\xi_i|^2, \quad (25)$$

il sistema di vettori  $\{\underline{e}^{(j)}\}_{j=1}^{\infty}$  è una base ortonormale di  $E$ .

**16)** Dimostrare il seguente teorema: CNES affinché gli elementi della successione numerica  $\{\xi_k\}_1^\infty$  siano i coefficienti di Fourier di un certo  $\underline{x}$  appartenente allo spazio di Hilbert  $H$  separabile, rispetto ad una base ortonormale  $\{\underline{e}^{(j)}\}_{j=1}^\infty$ , è che  $\{\xi_k\}_1^\infty \in l_2$ .

**17)** Il teorema precedente mostra che, introdotta una base ortonormale  $\{\underline{e}^{(j)}\}_{j=1}^\infty$  nello spazio di Hilbert  $H$  separabile, viene stabilita una corrispondenza biunivoca tra  $H$  e  $l_2$ :

$$\underline{x} \in H \quad \Leftrightarrow \quad \{x_k\}_1^\infty \in l_2, \quad x_k := (\underline{e}^{(k)}, \underline{x}). \quad (26)$$

Mostrare che tale corrispondenza biunivoca è un isomorfismo sia lineare:

$$\alpha \underline{x} + \beta \underline{y} \in H \quad \Leftrightarrow \quad \{\alpha x_k + \beta y_k\}_1^\infty \in l_2 \quad (27)$$

che euclideo:

$$(\underline{x}, \underline{y}) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{x}_k y_k. \quad (28)$$

**18) Complemento ortogonale.** Definire il complemento ortogonale  $S^\perp$  di  $S \subset E$ , rispetto allo spazio euclideo  $E$ , come l'insieme dei vettori di  $E$  ortogonali a tutti i vettori di  $S$ , e dimostrare che:

i)  $S \cap S^\perp = \{0\}$ ,

ii) ogni vettore  $\underline{x} \in E$  è esprimibile in modo univoco nella forma  $\underline{y} + \underline{z}$ , con  $\underline{y} \in S$ ,  $\underline{z} \in S^\perp$  (quindi:  $E = S \oplus S^\perp$ ),

iii)  $S^\perp$  è un sottospazio chiuso di  $E$ .

## 1.6 Funzionali lineari e distribuzioni

**1)** Un funzionale lineare sullo spazio vettoriale  $V$  è un operatore  $f : V \rightarrow \mathbb{C}$  tale che:

$$f(\alpha \underline{x} + \beta \underline{y}) = \alpha f(\underline{x}) + \beta f(\underline{y}), \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \quad \underline{x}, \underline{y} \in V.$$

a) Se  $\underline{x} \in \mathbb{C}^n$  e  $\{\underline{e}^{(k)}\}_1^n$  è una base di  $\mathbb{C}^n$ , con  $\underline{x} = \sum_{k=1}^n x_k \underline{e}^{(k)}$ , mostrare che l'operatore  $e_j$  che, applicato a  $\underline{x}$ , ne seleziona la componente  $j$ -esima  $x_j$  (rispetto alla base  $\{\underline{e}^{(k)}\}$ ):

$$e_j(\underline{x}) = x_j \quad (29)$$

è un funzionale lineare.

b) Poiché il generico funzionale  $f$  sul generico  $\underline{x} \in \mathbb{C}^n$  agisce nel seguente modo:

$$f(\underline{x}) = \sum_k^n f_k x_k, \quad f_k \in \mathbb{C},$$

esso è esprimibile come combinazione lineare dei funzionali  $e_j$ :

$$f = \sum_k^n f_k e_k.$$

L'insieme dei funzionali  $\{e_j\}_1^n$  è quindi una buona base nello spazio dei funzionali su  $\mathbb{C}^n$ ; essendo inoltre soddisfatte le condizioni

$$e_j(\underline{e}^{(k)}) = \delta_{jk},$$

questa base è detta la *base duale* della base  $\{\underline{e}^{(k)}\}_1^n$  di  $\mathbb{C}^n$  e gli  $\{f_k\}_{k=1}^n$  sono le componenti del funzionale rispetto alla base  $\{e_j\}_1^n$ .

**2) i)** Usare i risultati dell'esercizio 1 per mostrare che l'insieme dei funzionali lineari sullo spazio vettoriale  $V$  è esso stesso uno spazio vettoriale  $V^*$ , detto il duale di  $V$ , tale che, se  $f^{(1)}, f^{(2)} \in V^*$ , allora:

$$(\alpha f^{(1)} + \beta f^{(2)})(\underline{x}) = \alpha f^{(1)}(\underline{x}) + \beta f^{(2)}(\underline{x}), \quad \forall \underline{x} \in V, \alpha, \beta \in \mathbb{C}.$$

ii) Se  $\{\underline{e}^{(k)}\}_1^n$  è una base di  $V$  e  $\{e_j\}_1^n$  è la base duale di  $V^*$ , allora il generico funzionale  $f = \sum_k^n f_k e_k$  è rappresentato, nella base  $\{e_j\}_1^n$ , dal "vettore riga"

$(f_1, \dots, f_n)$ , mentre il generico vettore  $\underline{x} \in V$ :  $\underline{x} = \sum_{k=1}^n x_k \underline{e}^{(k)}$  è rappresentato dal "vettore colonna"  $(x_1, \dots, x_n)^T$ , e l'azione di  $f$  su  $\underline{x}$

$$f(\underline{x}) = \sum_k^n f_k x_k$$

è descritta dal prodotto riga per colonna.

### 3) Altri esempi di funzionali lineari.

a) Se  $\underline{x} = \{x_k\}_1^\infty \in l_2$ ,

$$f(\underline{x}) = \sum_{k=1}^\infty f_k x_k,$$

con  $\{f_k\}_1^\infty \in l_2$ , è un buon funzionale lineare.

b) Il generico funzionale lineare su  $\varphi(t) \in C[a, b]$  è descritto dall'integrale:

$$F(\varphi) = \int_a^b f(t)\varphi(t)dt, \quad f(t) \in C[a, b].$$

c) Nello spazio euclideo  $\mathbb{C}_2^n$ , il prodotto scalare

$$(\underline{a}, \underline{x}) = \sum_{k=1}^n \bar{a}_k x_k$$

è un buon funzionale lineare. Che relazione intercorre tra le componenti del vettore  $\underline{a}$  e le componenti del funzionale lineare  $f$ ? (R.  $f_k = \bar{a}_k$ )

d) Nello spazio euclideo  $l_2$ , il prodotto scalare

$$(\underline{a}, \underline{x}) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{a}_k x_k$$

è un buon funzionale lineare.

e) Negli spazi euclidei  $C_2[a, b]$ ,  $L_2[a, b]$ , il prodotto scalare

$$F(\varphi) = (a, \varphi) = \int_a^b \overline{a(t)} \varphi(t) dt, \quad a(t), \varphi(t) \in C_2[a, b].$$

è un buon esempio di funzionale lineare.

f) l'operatore  $\delta_{x_0} : C[a, b] \rightarrow \mathbb{C}$  definito dalla

$$\delta_{x_0}(\varphi) := \varphi(x_0), \quad \varphi(x) \in C[a, b], \quad x_0 \in [a, b], \quad (30)$$

è un buon funzionale lineare, detto "delta di Dirac".

**4)** Sia  $f : N \rightarrow \mathbb{C}$  un funzionale lineare sullo spazio vettoriale normato  $N$ ;  
i) dare le definizioni di continuità e limitatezza del funzionale. ii) Mostrare che: a) se  $f$  è continuo in  $\underline{0}$ , allora è continuo in  $N$ ; b)  $f$  è continuo se e solo se è limitato sulla sfera unitaria:  $\sup_{\|\underline{x}\| \leq 1} |f(\underline{x})| < \infty$ .

**5)** Mostrare che l'insieme dei funzionali lineari limitati sullo spazio vettoriale normato  $N$  forma uno spazio vettoriale, con:

$$(\alpha f_1 + \beta f_2)(\underline{x}) = \alpha f_1(\underline{x}) + \beta f_2(\underline{x}), \quad \forall \underline{x} \in N, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}.$$

esso stesso normato, il duale  $N^*$  di  $N$ , la cui norma, è definita così:

$$\|f\|_{N^*} = \sup_{\|\underline{x}\|_N \neq 0} \frac{|f(\underline{x})|}{\|\underline{x}\|_N} = \sup_{\|\underline{x}\|_N \neq 0} \left| f\left(\frac{\underline{x}}{\|\underline{x}\|_N}\right) \right| = \sup_{\|\underline{x}\|_N = 1} |f(\underline{x})|; \quad (31)$$

da cui segue la disuguaglianza:

$$|f(\underline{x})| \leq \|f\|_{N^*} \|\underline{x}\|_N, \quad \|\underline{x}\|_N \neq 0. \quad (32)$$



**6) Le norme di funzionali importanti.**

- i) Mostrare che, se  $\underline{x} \in \mathbb{C}_2^n$ , e  $f(\underline{x}) = (\underline{a}, \underline{x})$ , con  $\underline{a} \in \mathbb{C}_2^n$ , allora  $\|f\| = \|\underline{a}\|_2$ .
- ii) Mostrare che, se  $\varphi \in C_\infty[a, b]$ , e  $F(\varphi) = \int_a^b \varphi(t) dt$ , allora  $\|F\| = b - a$ .
- iii) Mostrare che, se  $\varphi \in C_\infty[a, b]$ , e  $F(\varphi) = \int_a^b f(t)\varphi(t) dt$ , con  $f \in C_{[a, b]}$ , allora  $\|F\| = \|f\|_1$ .
- iv) Mostrare che, se  $\varphi \in C_\infty[a, b]$ , e  $\delta_{x_0}(\varphi) = \varphi(x_0)$ , allora  $\|\delta_{x_0}\| = 1$ .
- v) Mostrare che, se  $\varphi \in L_2[a, b]$ , e  $\delta_{x_0}(\varphi) = \varphi(x_0)$ , allora  $\delta_{x_0}$  non è limitato.

**7) Norma indotta da  $N$  su  $N^*$ . Dati i funzionali lineari**

$$f(\underline{x}) = \sum_k f_k x_k, \quad F(\varphi) = \int_a^b f(t)\varphi(t), \quad (33)$$

dove le  $f_k$  sono le componenti del funzionale  $f$  e  $f(t)$  è la funzione che rappresenta il funzionale  $F$ , mostrare che: i) se  $\{x_k\}_{k \in \mathbb{N}} \in l_p = N$ , allora  $\|f\| = \|f\|_q$ , con  $1/p + 1/q = 1$ ; cioè che  $f \in l_q = N^*$ . Trattare anche i casi degeneri in cui  $p = 1, q = \infty$  e  $p = \infty, q = 1$ . ii) Se  $\varphi(t) \in L_p[a, b]$ , allora  $\|F\| = \|f\|_q$ ; cioè  $N^* = L_q[a, b]$ . Trattare anche i casi degeneri in cui  $p = 1, q = \infty$  e  $p = \infty, q = 1$ . Suggerimento: usare la disuguaglianza di Holder...

**8) Convergenza forte e debole di vettori.** Una successione di elementi  $\{\underline{x}^{(n)}\}$  dello spazio normato  $N$

a) converge fortemente, o in norma, a  $\underline{x}$  se:

$$\|\underline{x}^{(n)} - \underline{x}\| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

b) converge debolmente, o per componenti, a  $\underline{x}$  se, per ogni funzionale lineare  $f \in N^*$ :

$$|f(\underline{x}^{(n)}) - f(\underline{x})| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

**9)** Mostrare che, in  $l_p$  o in  $\mathbb{C}^n$ , se si scelgono come funzionali gli elementi della base duale  $\{e_j\}$ , allora la convergenza debole coincide con la convergenza “per componenti”:

$$|e_j(\underline{x}^{(n)}) - e_j(\underline{x})| = |x_j^{(n)} - x_j| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty, \quad \forall j.$$

**10)** Mostrare che la convergenza forte implica la convergenza debole, essendo:

$$|f(\underline{x}^{(n)}) - f(\underline{x})| = |f(\underline{x}^{(n)} - \underline{x})| \leq \|f\| \|\underline{x}^{(n)} - \underline{x}\|,$$

- iii) Dare un esempio in cui la convergenza debole non implica quella forte.  
 iv) Mostrare che, se lo spazio è finito - dimensionale, la convergenza debole implica quella forte.

**11) Convergenza forte e debole di funzionali lineari.** Data una successione di funzionali lineari  $\{f^{(n)}\} \subset N^*$  su  $N$ ; essa:

a) converge debolmente a  $f \in N^*$  se,  $\forall \underline{x} \in N$ :

$$|f^{(n)}(\underline{x}) - f(\underline{x})| = |(f^{(n)} - f)(\underline{x})| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$$

b) converge fortemente, o nella norma di  $N^*$ , se  $\|f^{(n)} - f\| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty.$

i) Mostrare che la convergenza forte implica quella debole, usando la disuguaglianza  $|f(\underline{x})| \leq \|f\|_{N^*} \|\underline{x}\|_N$  dell'esercizio 5, ma che il contrario non è vero.

ii) Mostrare che la successione di funzionali  $\{f^{(n)}\}$  converge debolmente al funzionale  $f$  se e solo se  $|f^{(n)}(\underline{e}^{(j)}) - f(\underline{e}^{(j)})| = |(f^{(n)} - f)(\underline{e}^{(j)})| \rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty,$  per ogni elemento della base  $\{\underline{e}^{(j)}\}$  di  $N$ .

**12) Lemma di Riemann - Lebesgue.** i) Mostrare che le successioni di funzionali lineari  $\{S_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  e  $\{C_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ , definite da:

$$S_n(\varphi) = \int_{-\pi}^{\pi} \sin(nx)\varphi(x)dx, \quad C_n(\varphi) = \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx)\varphi(x)dx$$

convergono debolmente a 0, se lo spazio delle funzioni di prova  $\varphi \in L_1[-\pi, \pi]$ . Suggestivo: conviene scegliere  $\varphi$  in  $C^1[-\pi, \pi]$  (che è denso su  $L_1[-\pi, \pi]$  nella norma  $\|\cdot\|_1$ ) e integrare per parti. ii) Mostrare invece che  $\{S_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  e  $\{C_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  non convergono fortemente a 0 (mostrando, ad esempio, che  $\|\cos(nx)\|_1 = 4$  e  $\|\cos(nx)\|_\infty = 1$ ). iii) Usare il risultato dimostrato in i) per mostrare che le successioni di funzionali lineari  $\{S_n\}_{n \in \mathbb{N}}$  e  $\{C_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ , definite da:

$$S_n(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} \sin(nx)\varphi(x)dx, \quad C_n(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} \cos(nx)\varphi(x)dx$$

convergono debolmente a 0, se lo spazio delle funzioni di prova  $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$ .

**13) Distribuzioni come funzionali lineari.** i) Un funzionale lineare è una trasformazione lineare  $F$  da un opportuno spazio vettoriale di funzioni, non necessariamente normato, come, ad esempio, lo spazio di Schwartz  $\mathcal{S}$  delle funzioni  $C^\infty(\mathcal{R})$  che vanno a zero per  $|x| \rightarrow \infty$  più rapidamente di ogni potenza, o come lo spazio  $\mathcal{K}$  delle funzioni  $C^\infty(\mathcal{R})$  che si annullano con

tutte le derivate al di fuori di un intervallo  $I$ . Tale trasformazione è ben rappresentata dall'integrale:

$$F(\varphi) = \int_{\mathcal{R}} f(x)\varphi(x)dx, \quad \varphi \in \mathcal{S} (\in \mathcal{K}),$$

Quindi c'è una corrispondenza biunivoca tra il funzionale  $F$  e la funzione  $f(x)$  sotto integrale; se  $f(x)$  è “regolare”, allora il funzionale è detto regolare; altrimenti è detto “singolare”. Funzionali lineari regolari e singolari sono anche detti “distribuzioni regolari e singolari”.

La funzione  $\varphi(x) \in \mathcal{S} (\in \mathcal{K})$  è detta “funzione di prova”. Gli spazi in questione sono così ristretti da non essere normati; ma più è ristretto lo spazio delle  $\varphi$  e più ricche sono le proprietà dei funzionali lineari (distribuzioni) definibili su di esso. Pur non essendo normati, negli spazi di cui sopra è definita una nozione di convergenza. Ad esempio, Una successione  $\{\varphi_n\}$  di  $\mathcal{K}$  converge a una funzione  $\varphi \in \mathcal{K}$  ( $\varphi_n \rightarrow \varphi$ ), se:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{d^k \varphi_n(t)}{dt^k} = \frac{d^k \varphi(t)}{dt^k}, \quad k = 0, 1, ..$$

uniformemente in  $I$ . Allora un funzionale lineare su  $\mathcal{K}$  è continuo, se

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |F(\varphi_n) - F(\varphi)| = 0$$

quando  $\varphi_n \rightarrow \varphi$ .

i) Mostrare che, se  $f(t) \in L_1(\mathbb{R})$ , allora il funzionale  $f$  è continuo, stabilendo la disuguaglianza:

$$|f(\varphi_n) - f(\varphi)| = \left| \int_{\mathbb{R}} dt f(t)(\varphi_n(t) - \varphi(t)) \right| \leq \max_{t \in I} |\varphi_n(t) - \varphi(t)| \|f\|_1.$$

### **Punto materiale, carica puntiforme, forza impulsiva e delta di Dirac.**

**14)** Si mostri, attraverso un procedimento di limite opportuno, che la densità di massa di un punto materiale, la densità di carica di una carica puntiforme e una forza impulsiva sono manifestazioni diverse della delta di Dirac. Per fare questo:

i) Si consideri una massa unitaria, distribuita uniformemente su un segmento di lunghezza  $\epsilon = 2/n$  centrato intorno ad un punto qualsiasi  $x_0$ ; la corrispondente densità di massa vale:

$$\delta_n(x - x_0) = \begin{cases} \frac{n}{2}, & \text{se } |x - x_0| < \frac{1}{n} \\ 0, & \text{se } |x - x_0| > \frac{1}{n}. \end{cases} \quad (34)$$

che dà in effetti una massa unitaria:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \delta_n(x - x_0) = \int_{-\frac{1}{n}}^{\frac{1}{n}} dy \delta_n(y) = 1.$$

ii) Si osservi che, mentre il limite puntuale, per  $n \rightarrow \infty$ , della successione di funzioni  $\delta_n(x)$  non è ben definito, in quanto:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n(x - x_0) = \begin{cases} \infty, & \text{se } x = x_0, \\ 0, & \text{se } x \neq x_0, \end{cases} \quad (35)$$

l'integrale di  $\delta_n(x)$  (la massa) resta ben definito anche nel limite, continuando a valere 1:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx \delta_n(x) = 1.$$

iii) Si mostri che:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} dx \delta_n(x - x_0) \varphi(x) = \varphi(x_0). \quad (a)$$

dove  $\varphi(x)$  è una qualunque funzione di  $L_1(\mathbb{R})$  e continua in  $x_0$ . I fisici introducono la “funzione generalizzata”, o “distribuzione”,  $\delta(x - x_0)$  (detta “ $\delta$ ” di Dirac) come quell’oggetto matematico definito dall’equazione precedente:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \delta(x - x_0) \varphi(x) = \varphi(x_0), \quad (b)$$

immaginando di passare al limite sotto il segno di integrale nella formula (a) ed identificando:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \delta_n(x - x_0) = \delta(x - x_0)$$

(cosa delicata, dal punto di vista matematico, dato che tale limite non esiste, come già notato, in senso stretto). Il fisico con una buona base matematica sa, comunque, che l’espressione (b) va interpretata nel senso della formula (a). In questo senso si dice che *la successione di funzioni  $\delta_n(x - x_0)$  è una rappresentazione della  $\delta(x - x_0)$  di Dirac per  $n \rightarrow \infty$ .*

iv) Mostrare che:

$$\int_a^b dx \delta(x - x_0) \varphi(x) = \begin{cases} \varphi(x_0), & a < x_0 < b; \\ 0, & x_0 < a, \quad x_0 > b. \end{cases} \quad (36)$$

Riepilogando, in modo più rigoroso, la successione di funzionali

$$\delta_{x_0}^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} \delta_n(x - x_0)\varphi(x)dx \quad (37)$$

a) converge debolmente (o sotto integrale, o nel senso delle distribuzioni) al funzionale  $\delta_{x_0}$ , detto “delta di Dirac”, definito dalla sua azione sulla funzione di prova  $\varphi$ :

$$\delta_{x_0}(\varphi) = \varphi(x_0);$$

b) non converge in senso forte (o in norma); basta infatti mostrare che la successione di funzioni  $\{\delta_n(x - x_0)\}$  non è di Cauchy. Per  $\varphi \in (C(\mathbb{R}), \|\cdot\|_{\infty})$ , allora  $\|\delta_n(x) - \delta_m(x)\|_1 = 1$ ; per  $\varphi \in (C(\mathbb{R}), \|\cdot\|_1)$ , allora  $\|\delta_n(x) - \delta_m(x)\|_{\infty} = |n - m|/2$ .

c) la successione di funzioni  $\{\delta_n(x - x_0)\}$  non converge puntualmente a nessuna funzione legittima;

d) Il funzionale  $\delta_{x_0}$  è “singolare”, poichè non esiste una funzione  $f(x)$  “regolare” tale che  $\int_{\mathbb{R}} f(x)\varphi(x)dt = \varphi(x_0)$ .

**15) Limitatezza e non del funzionale  $\delta$  di Dirac** Mostrare che il funzionale delta di Dirac  $\delta_{x_0}$  i) è continuo (limitato) per  $\varphi \in (C[a, b], \|\cdot\|_{\infty})$ . (La disuguaglianza:

$$|\delta_{x_0}(\varphi)| = |\varphi(x_0)| \leq \|\varphi\|_{\infty}.$$

implica la limitatezza e anche la continuità). ii) Si mostri che  $\delta_{x_0}$  non è un funzionale limitato se  $\varphi(x)$  appartiene a  $(L_2[a, b], \|\cdot\|_2)$ , considerando la successione di funzioni continue

$$\varphi_n(x) = \left(\frac{n}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\frac{n}{2}(x-x_0)^2} \in L_2(\mathbb{R})$$

e mostrando che  $\|\varphi_n(x)\|_2 = 1$ , mentre  $|\delta_{x_0}(\varphi_n)| = (n/\pi)^{1/4}$ .

**16) Rappresentazioni della  $\delta$  di Dirac.** Si mostri che, data la funzione  $p(x)$ , pari e “regolare” sull’asse reale e tale che

$$\int_{\mathcal{R}} p(x)dx = 1,$$

allora la successione di funzionali

$$\delta_{x_0}^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} np(n(x - x_0))\varphi(x)dx \quad (38)$$

a) converge debolmente (o sotto integrale, o nel senso delle distribuzioni) al funzionale  $\delta_{x_0}$ , detto “delta di Dirac”, definito dalla sua azione sulla funzione di prova  $\varphi$ :

$$\delta_{x_0}(\varphi) = \varphi(x_0);$$

b) non converge in senso forte (o in norma); basta infatti mostrare che la successione  $\{np(nx)\}$  non è di Cauchy. Per  $\varphi \in (C(\mathbb{R}), \|\cdot\|_\infty)$ , allora

$$\|np(n(x-x_0)) - mp(m(x-x_0))\|_1 = \int_{\mathbb{R}} \left| p(y) - \frac{m}{n} p\left(\frac{m}{n}y\right) \right| dy, \quad (39)$$

che non tende a 0 per  $n, m$  sufficientemente grandi; si scelga, ad esempio,  $m = n/2$  per avere

$$\int_{\mathbb{R}} \left| p(y) - \frac{m}{n} p\left(\frac{m}{n}y\right) \right| dy = \int_{\mathbb{R}} \left| p(y) - \frac{1}{2} p\left(\frac{y}{2}\right) \right| dy \neq 0. \quad (40)$$

Per  $\varphi \in (C(\mathbb{R}), \|\cdot\|_1)$ , allora  $\|\delta_n(x) - \delta_m(x)\|_\infty = O(|n-m|)$  e, con la stessa scelta,  $\|\delta_n(x) - \delta_m(x)\|_\infty = O(n)$ .

c) La successione  $\{np(nx)\}$  non converge puntualmente a nessuna funzione legittima.

**17) i)** Verificare che le seguenti funzioni:

$$i) H(1-2|x|); \quad ii) e^{-x^2}/\sqrt{\pi}; \quad iii) \frac{1}{\pi(1+x^2)}; \quad iv) \frac{\sin x}{\pi x}$$

godono delle proprietà elencate nell’esercizio precedente. ii) Ottenere le corrispondenti successioni di funzioni che rappresentano  $\delta(x)$  e graficarle. iii) Dimostrare che esse sono delle buone rappresentazioni della delta di Dirac anche senza passare al limite sotto il segno di integrale, scegliendo opportunamente lo spazio delle funzioni di prova. Per gli esempi i)-iii) si scelga lo spazio delle funzioni  $L_1(\mathbb{R})$  continue in 0; per l’esempio iv) si scelga una  $\varphi$  tale che:

$$\begin{aligned} i) \frac{\varphi(x+y)-\varphi(x)}{y} &\text{ è assolutamente convergente in ogni intervallo finito} \\ &\text{(condizione del Dini);} \\ ii) \varphi(x) &\rightarrow 0, \quad |x| \rightarrow \infty. \text{ come } |\varphi(x)| \leq \frac{c}{|x|^\epsilon}. \end{aligned} \quad (41)$$

**18)** Trovare i valori dei parametri  $\alpha, \beta, \gamma$  affinché le seguenti successioni di funzioni siano buone rappresentazioni della  $\delta(x)$ .

$$i) \frac{\alpha n}{\beta^2 + n^\gamma x^2}; \quad ii) \alpha n^\gamma e^{-\beta n^\gamma |x|}.$$

**19) Ancora sulla  $\delta$ .** Si mostri che, nel senso delle distribuzioni:

*i*)  $\delta(x) = \delta(-x)$ ; *ii*)  $\delta(ax) = \frac{1}{|a|}\delta(x)$ ,  $a \in \mathbb{R}$ ; *iii*)  $\delta'(-x) = -\delta'(x)$ ; *iv*)  $\delta(g(x)) = \sum_n \frac{\delta(x_n)}{|g'(x_n)|}$ ,  $g(x_n) = 0$ ,  $g'(x_n) \neq 0$

**20)** Si mostri che, nel senso delle distribuzioni:

*i*)  $H(x) + H(-x) = 1$ ; *ii*)  $x\delta(x) = 0$ ; *iii*)  $g(x)\delta(x - x_0) = g(x_0)\delta(x - x_0)$ ; *iv*)  $\delta(x^2 - 1) = \frac{1}{2}[\delta(x - 1) + \delta(x + 1)]$ ; *v*)  $\delta(\sin x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta(x - n\pi)$ ; *vi*)  $\delta(\cos x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta(x - (n + 1/2)\pi)$

**21)** Si mostri che:

$$\int_{-1}^1 dx \delta(2x) \cos x = \frac{1}{2}; \quad \int_0^{\infty} dx \delta(x^2 - 1) \varphi(x) = \frac{1}{2} \varphi(1); \quad \int_{-1}^4 dx \delta(\sin x) \cos x = 0;$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \delta(\sin x e^{-x}) \frac{\sin x}{x - \pi} = -e^{\pi};$$

$$\int_0^{\infty} dx \delta(\cos x) e^{-x} = \frac{1}{2 \sinh \frac{\pi}{2}}; \quad \int_{-1}^{\infty} dx \delta(\sin x) e^{-x} = \frac{1}{1 - e^{-\pi}}$$

$$\int_0^{\infty} dx \delta(\sin x) e^{-x} = \frac{1}{2 \tanh \frac{\pi}{2}}$$

**22)** Si mostri che  $\int_{-\infty}^x \delta(y) dy = H(x)$ .

**23) Derivata di una distribuzione.** Data la distribuzione (regolare o singolare)  $D$  definita dal funzionale lineare

$$D(\varphi) = \int_{\mathcal{R}} D(x) \varphi(x) dx, \quad \varphi \in \mathcal{S},$$

si definisce derivata  $D'$  della distribuzione  $D$  il funzionale lineare:

$$D'(\varphi) = -D(\varphi') = - \int_{\mathcal{R}} D(x) \varphi'(x) dx.$$

Si verifichi che questa definizione è consistente con la ben nota regola di integrazione per parti, valida per funzionali regolari.

**24)** Si mostri che, se  $D$  è una distribuzione (regolare o singolare) rappresentata dall'integrale:

$$D(\varphi) = \int_{\mathcal{R}} D(x) \varphi(x) dx, \quad \varphi \in \mathcal{S},$$

la sua derivata  $n$ -sima è definita dalla formula:

$$D^{(n)}(\varphi) = (-)^n D(\varphi^{(n)}) = (-)^n \int_{\mathcal{R}} D(x)\varphi^{(n)}(x)dx.$$

**25)** Si verifichi che, nel senso delle distribuzioni:

$$\begin{aligned} H'(x) &= \delta(x); & dH(-x)/dx &= -\delta(x); \\ (H(x) \sin x)' &= H(x) \cos x; & (H(x) \cos x)' &= H(x) - H(x) \sin x, \\ \delta'(g(x)) &= \frac{1}{g'(x)} \frac{d\delta(g(x))}{dx} \\ g(x)\delta'(x-x_0) &= g(x_0)\delta'(x-x_0) - g'(x_0)\delta(x-x_0); \\ g(x)\delta''(x-x_0) &= g(x_0)\delta''(x-x_0) - 2g'(x_0)\delta'(x-x_0) + g''(x_0)\delta(x-x_0); \\ g(x)\delta^{(n)}(x-x_0) &= \sum_{k=0}^n (-1)^k \binom{n}{k} g^{(k)}(x_0)\delta^{(n-k)}(x-x_0) \end{aligned} \tag{42}$$

**26)** Data la funzione discontinua

$$F(x) = \begin{cases} f(x), & x < x_0, \\ g(x), & x > x_0, \end{cases} \tag{43}$$

con  $f, g \in C^1$  nei rispettivi intervalli, avente la discontinuità (il salto)  $\Delta = g(x_0) - f(x_0)$  nel punto di discontinuità  $x_0$ ,

i) riscrivere  $F(x)$  attraverso la funzione gradino  $H$  nel seguente modo:

$$F(x) = f(x)H(x_0 - x) + g(x)H(x - x_0). \tag{44}$$

ii) Utilizzare tale espressione e l'esercizio precedente per mostrare che

$$F'(x) = f'(x)H(x_0 - x) + g'(x)H(x - x_0) + \Delta\delta(x - x_0). \tag{45}$$

**27)** i) Mostrare che, se la funzione  $f(x)$  è periodica:  $f(x+2) = f(x)$  e vale  $x$  nell'intervallo  $-1 \leq x < 1$ , allora:

$$f'(x) = 1 + 2 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(x - (2n+1)).$$

ii) Mostrare che  $([x])' = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta(x - n)$ , dove  $[x]$  è la parte intera di  $x$  (con, ad esempio:  $[1/2] = 0$ ,  $[-1/2] = -1$ ).

**28)** Si mostri che:

$$\int_a^b dx \frac{d}{dx} (\delta(x-x_0)) \sin(x) = -H(b-x_0)H(x_0-a) \cos x_0 = -H((b-x_0)(x_0-a)) \cos x_0;$$



$$(H(x)(x^2 + 1))' = \delta(x) + 2xH(x); \quad \int_0^{\infty} dx \frac{d}{dx} [H(x) \tanh x] = 1;$$

$$\int_0^{\infty} \frac{d}{dx} (\delta(x^2 - 4)) \varphi(x) dx = -\frac{1}{4} \varphi'(2); \quad \int_0^{\infty} \delta'(x^2 - 4) \varphi(x) dx = \frac{1}{16} \left( \frac{\varphi(2)}{2} - \varphi'(2) \right).$$

**29) Altre distribuzioni rilevanti.** Stabilire la validità delle seguenti relazioni, nel senso delle distribuzioni.

$$\frac{1}{x - x_0 \pm i\epsilon} = P \left( \frac{1}{x - x_0} \right) \pm i\pi \delta(x - x_0); \quad (\ln |x|)' = P \left( \frac{1}{x} \right);$$

$$(|x|)' = \text{sign } x; \quad \lim_{\epsilon \rightarrow 0, t \rightarrow \infty} \frac{e^{ixt}}{x \pm i\epsilon} = \mp 2\pi i \delta(x) H(\mp t).$$

**30)** a) Mostrare che, data la successione di funzionali  $\{f^{(n)}\}$ , con  $f^{(n)}(\varphi) = \int_0^{\infty} e^{-nx} \varphi(x) dx$ , i) la successione  $\{e^{-nx}\}$  converge a 0 puntualmente in  $(0, \infty)$ , ii)  $\{f^{(n)}\} \rightarrow 0$  debolmente, ma non fortemente nella norma  $\|\cdot\|_{\infty}$ .  
b) Mostrare che, data la successione di funzionali  $\{f^{(n)}\}$ , con  $f^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} \tanh nx \varphi(x) dx$ , i) la successione  $\{\tanh nx\}$  converge a  $\text{sgn } x$  puntualmente in  $\mathbb{R} - 0$ , ii)  $\{f^{(n)}\}$  converge debolmente al funzionale  $(\int_0^{\infty} - \int_{-\infty}^0) dx \varphi(x)$ , ma non fortemente ad esso nella norma  $\|\cdot\|_{\infty}$ .

c) Verificare i seguenti limiti, per  $n \rightarrow \infty$ , nel senso delle distribuzioni:

$$\begin{aligned} -\frac{n^3 x}{4\sqrt{\pi}} e^{-\frac{n^2 x^2}{4}} &\rightarrow \delta'(x), \quad ne^{-n|x|} \rightarrow \delta(x), \quad \text{in } \mathbb{R}; \\ e^{-n|x|} &\rightarrow 0 \quad \text{in } \mathbb{R}^+. \end{aligned} \quad (46)$$

**31)** Data la successione di funzionali  $\{F_{\alpha}^{(n)}\}$ , con  $F_{\alpha}^{(n)}(\varphi) = \int_0^{\infty} n^{\alpha} e^{-nx} \varphi(x) dx$ , studiare, al variare di  $\alpha \geq 0$ , i) la convergenza puntuale della successione di funzioni  $\{n^{\alpha} e^{-nx}\}$ ; ii) la convergenza debole della successione di funzionali  $\{F_{\alpha}^{(n)}\}$ ,

iii) la convergenza forte, nei due casi in cui  $\varphi \in L_1$  e  $\varphi \in L_{\infty}$ .

R. i) se  $x \neq 0$ :  $n^{\alpha} e^{-nx} \rightarrow 0$ ,  $\forall \alpha$ ; se  $x = 0$ ,  $n^{\alpha} e^{-nx} \rightarrow 1$ , per  $\alpha = 0$ , e  $n^{\alpha} e^{-nx} \rightarrow \infty$  per  $\alpha > 0$ . ii)  $F_{\alpha}^{(n)}(\varphi) \rightarrow 0$  per  $0 \leq \alpha < 1$ ,  $\rightarrow \phi(0)$  per  $\alpha = 1$ ,  $\rightarrow \infty$  per  $\alpha > 1$ .

**32)** Data la successione di funzionali  $\{F_j^{(n)}\}$ , con  $F_j^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} f_j^{(n)}(x)\varphi(x)dx$ , con  $f_j^{(n)}(x)$  definito in uno dei seguenti modi:

$$n^j H(1 - 2n|x|), \quad \frac{n^j}{\sqrt{\pi}} e^{-n^2 x^2}, \quad \frac{n^j}{\pi(1 + n^2 x^2)}, \quad j = 0, 1, 2,$$

studiare, al variare di  $j$ , i) la convergenza debole della successione di funzionali  $\{F_j^{(n)}\}$

, ii) la convergenza forte, nei due casi in cui  $\varphi \in L_1$  e  $\varphi \in L_\infty$ . Studiare infine la convergenza puntuale della successione di funzioni  $\{f_j^{(n)}\}$ .

**33) Basi ortonormali e rappresentazioni della delta.** Si mostri che, se  $\{e^{(n)}(x)\}_1^\infty$  è una base ortonormale di  $L_2[a, b]$ , allora la completezza di tale insieme di funzioni equivale alla condizione che la successione delle somme parziali

$$\delta_n(x, y) := \sum_{k=1}^n \bar{e}^{(k)}(y) e^{(k)}(x)$$

converge debolmente alla  $\delta(x - y)$ , generando la cosiddetta “relazione di completezza”:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^N \bar{e}^{(k)}(y) e^{(k)}(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \bar{e}^{(k)}(y) e^{(k)}(x) = \delta(x - y)$$

Si confronti la relazione di completezza con la condizione di ortonormalità:

$$\int_a^b \overline{e^{(j)}(x)} e^{(k)}(x) dx = \delta_{jk} \quad (47)$$

**34) Equazioni algebriche e differenziali con distribuzioni.** Dimostrare i seguenti risultati, nel senso delle distribuzioni.

$$\begin{aligned} (x - a)y(x) = 0 &\Rightarrow y(x) = c\delta(x - a); \\ (x - a)y(x) = x^2 - a^2 &\Rightarrow y(x) = c\delta(x - a) + x + a; \\ xy(x) = 1 &\Rightarrow y(x) = c\delta(x) + P\left(\frac{1}{x}\right); \\ xy'(x) = 0 &\Rightarrow y(x) = c\theta(x) + d; \\ xy'(x) = \delta(x) &\Rightarrow y(x) = cH\theta(x) + d - \delta(x); \\ (xy'(x))' = 0 &\Rightarrow y(x) = a\theta(x) + b \ln|x|. \end{aligned} \quad (48)$$

**35)** Trovare la soluzione dell’equazione di Schrödinger stazionaria con potenziale di tipo delta

$$-y''(x) + a\delta(x)y(x) = k^2y(x)$$

**36) La delta di Dirac in  $\mathbb{R}^n$ .** Il funzionale “delta di Dirac” si definisce in modo naturale anche in  $\mathbb{R}^n$ , attraverso la

$$\delta_{\underline{x}_0}(\varphi) = \varphi(\underline{x}_0), \quad (49)$$

per ogni  $\varphi(\underline{x})$  appartenente, ad esempio, allo spazio di Schwarz:  $\varphi \in S(\mathbb{R}^n)$ . Nella notazione più fisica, allora abbiamo:

$$\int_{\mathbb{R}^n} \delta(\underline{x} - \underline{x}_0) \varphi(\underline{x}) d\underline{x} = \varphi(\underline{x}_0), \quad (50)$$

$$\delta(\underline{x} - \underline{x}_0) \equiv \delta(x_1 - x_{10}) \delta(x_2 - x_{20}) \dots \delta(x_n - x_{n0}).$$

**37)** Determinare la soluzione  $G(\underline{x} - \underline{y})$  dell’equazione differenziale

$$\Delta G(\underline{x} - \underline{y}) = \delta(\underline{x} - \underline{y}), \quad \underline{x} \in \mathbb{R}^n, \quad n = 1, 2, 3, \quad (51)$$

dove  $\Delta$  è l’operatore Laplaciano. Come si vedrà più avanti, la funzione  $G(\underline{x})$  prende il nome di funzione di Green del Laplaciano.

## 1.7 Serie di Fourier

1) *La completezza della base discreta di Fourier* Ricordando che la successione di funzioni  $\{e_n(x)\}$  ortonormali in  $L_2[a, b]$ :

$$(e_n, e_m) = \int_a^b dx \overline{e_n(x)} e_m(x) = \delta_{nm}$$

costituisce un sistema completo (una base) in  $L_2[a, b]$  se e solo se:

$$\sum_n \overline{e_n(y)} e_n(x) = \delta(x - y), \quad x, y \in [a, b],$$

si mostri che le funzioni  $\{\frac{e^{inx}}{\sqrt{2\pi}}\}_{n \in \mathcal{Z}}$  costituiscono un sistema ortonormale e completo (una base ortonormale) di  $L_2(-\pi, \pi)$ ; cioè si verifichi che:

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{dx}{2\pi} e^{i(n-m)x} = \delta_{nm}, \text{ ortonormalità}$$

$$\sum_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{in(x-y)}}{2\pi} = \delta(x - y), \text{ completezza.}$$

Suggerimento: si mostri che

$$\sum_{-N}^N e^{inx} = e^{-iNx} (1 + \dots + e^{2iNx}) = e^{-iNx} \frac{1 - e^{i(2N+1)x}}{1 - e^{ix}} =$$

$$= \frac{\sin(N + \frac{1}{2})x}{\sin \frac{x}{2}} = 2\pi \frac{\sin(\nu x)}{\pi x} \frac{(x/2)}{\sin(x/2)}, \quad \nu = N + \frac{1}{2}$$

e si ricordi che  $\delta_\nu(x) = \sin(\nu x)/(\pi x)$  rappresenta  $\delta(x)$ , nel limite  $\nu \rightarrow \infty$ .

**2)** i) Nello spazio euclideo  $L_2[-\pi, \pi]$ , dotato di prodotto scalare  $(x, y) = \int_{-\pi}^{\pi} x(t)y(t)dt$ , si consideri il sottospazio finito-dimensionale  $M$  generato dai polinomi trigonometrici di ordine  $n$ :

$\{1, \cos t, \sin t, \cos 2t, \sin 2t, \dots, \cos nt, \sin nt\}$  ( $\dim M = 2n + 1$ ). i) Si mostri che la corrispondente base ortonormale è:

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \frac{\cos t}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin t}{\sqrt{\pi}}, \frac{\cos 2t}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin 2t}{\sqrt{\pi}}, \dots, \frac{\cos nt}{\sqrt{\pi}}, \frac{\sin nt}{\sqrt{\pi}} \right\}.$$

ii) Si mostri che la proiezione ortogonale  $f_n(t)$  di una generica funzione di  $L_2[-\pi, \pi]$  sul sottospazio  $M$  generato dai polinomi trigonometrici di ordine  $n$  è proprio la serie di Fourier troncata all'ordine  $n$ :

$$f_n(t) = \frac{a_0}{\sqrt{2\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left( \sum_{k=1}^n a_k \cos kt + \sum_{k=1}^n b_k \sin kt \right),$$

$$a_0 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{2\pi} dt f(t), \quad a_k = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{2\pi} dt \cos kt f(t), \quad b_k = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^{2\pi} dt \sin kt f(t) dt$$
(52)

La serie di Fourier troncata è quindi il polinomio trigonometrico *più vicino*, nella norma  $\|\cdot\|_2$ , alla funzione continua da rappresentare.

iii) Volendo usare invece la base ortonormale degli esponenziali:

$$\left\{ \frac{e^{ikt}}{\sqrt{2\pi}} \right\}_{k=0}^n$$
(53)

mostrare che si ottiene:

$$f_n(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=-n}^n g_k e^{ikt}, \quad g_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} e^{-ikt} f(t) dt.$$
(54)

### 3) Sviluppo in serie di Fourier

i) Si usi il risultato precedente per mostrare che un funzione  $f(x) \in L_2(-\pi, \pi)$  è sviluppabile in serie di Fourier:

$$f(x) = \sum_{n \in \mathcal{Z}} f_n e^{inx} = \sum_{n \in \mathcal{Z}} \frac{f_n}{\sqrt{2\pi}} e^{inx}$$

$$= c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \{s_n \sin(nx) + c_n \cos(nx)\}$$
(55)

$$= \frac{a_0}{\sqrt{2\pi}} + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{n=1}^{\infty} \{b_n \sin(nx) + a_n \cos(nx)\},$$

$$\begin{aligned}
f_n &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dx}{2\pi} e^{-inx} f(x), & \tilde{f}_n &= \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dx}{\sqrt{2\pi}} e^{-inx} f(x), \\
c_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, & c_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) f(x) dx, & s_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(nx) f(x) dx, \\
a_0 &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx, & c_n &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} \cos(nx) f(x) dx, & s_n &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\pi}^{\pi} \sin(nx) f(x) dx
\end{aligned} \tag{56}$$

dove gli  $\{\tilde{f}_n\}$ ,  $n \in \mathbb{Z}$  e i  $\{a_n, b_n\}$   $n \in \mathbb{N}$  sono i coefficienti di Fourier di  $f(x)$ , con  $c_0 = a_0/\sqrt{2\pi}$ ,  $c_n = a_n/\sqrt{\pi}$ ,  $s_n = b_n/\sqrt{\pi}$ ,  $f_n = g_n/\sqrt{2\pi}$ .

ii) Si verifichi l'equivalenza tra lo sviluppo in esponenziali e quello in seni e coseni, trovando le seguenti relazioni tra i coefficienti  $c_0, c_n, s_n$  e i coefficienti  $f_n$ :

$$c_0 = f_0, \quad c_n = f_n + f_{-n}, \quad s_n = i(f_n - f_{-n}).$$

Quando converrà usare l'uno o l'altro sviluppo?

**4) Proprietà di convergenza della serie di Fourier.** Dimostrare che la serie di Fourier gode delle seguenti proprietà di convergenza.

i) La serie di Fourier converge in norma  $\|\cdot\|_2$  a  $f(x) \in L_2[-\pi, \pi]$ ; cioè:

$$\begin{aligned}
\|f(x) - f^{(n)}(x)\|_2 &\rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty, \\
f^{(n)}(x) &:= \sum_{k=-n}^n f_k e^{ikx}, \quad f_k = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{dx}{2\pi} e^{-ikx} f(x),
\end{aligned} \tag{57}$$

ii) Essa converge puntualmente a  $f(x)$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |f_n(x) - f(x)| = 0$$

in ogni punto  $x \in (-\pi, \pi)$  in cui  $f(x)$  è continua e soddisfa alla condizione del Dini (l'assoluta convergenza del rapporto incrementale

$$\frac{f(y+x) - f(x)}{y} \tag{58}$$

nell'intorno  $y \in (-\delta, \delta)$  di quel punto). Converge infine uniformemente a  $f(x)$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|f^{(n)}(x) - f(x)\|_{\infty} = 0$$

in ogni punto  $x \in (-\pi, \pi)$  in cui  $f(x)$  è continua e la condizione del Dini è soddisfatta uniformemente.

iii) Se  $f(x)$  è discontinua in  $x_0 \in [-\pi, \pi]$ , ma esistono i limiti destro e sinistro:

$$f_{\pm}(x_0) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} f(x_0 \pm \epsilon)$$

e la condizione del Dini è soddisfatta per i rapporti incrementali destro e sinistro, allora

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(n)}(x_0) = \frac{f_+(x_0) + f_-(x_0)}{2}.$$

In particolare, se  $f$  non è periodica:  $f(\pi) \neq f(-\pi)$ , allora

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f^{(n)}(\pm\pi) = \frac{f_-(\pi) + f_+(-\pi)}{2}.$$

### 5) Altre proprietà della serie di Fourier.

i) Mostrare che, nell'intorno di una discontinuità del tipo descritto in iii) si verifica il cosiddetto "fenomeno di Gibbs". Cioè la somma parziale  $f_n(x)$ , per  $n \gg 1$ , oscilla molto rapidamente, a destra e a sinistra della discontinuità, in una regione dell'ordine di  $O(n^{-1})$ ; il massimo di tale oscillazione si verifica per  $x_M^\pm \sim x_0 \pm \pi/n$  e la differenza  $|f_n(x_M^\pm) - f_\pm(x_0)| \sim 0.09|f_+(x_0) - f_-(x_0)|$  resta finita per  $n \rightarrow \infty$ . Dopo aver disegnato questo massimo, il grafico di  $f_n(x)$  si raccorda con continuità, assumendo in  $x_0$  il valor medio del limite destro e sinistro (come già visto in iii)).

ii) Dimostrare che, se la funzione  $f(x)$ , periodica di periodo  $2\pi$ , ha derivate continue fino all'ordine  $(k-1)$  anch'esse periodiche, e la derivata  $k$ -esima appartiene a  $L_1[-\pi, \pi]$ , allora i coefficienti  $c_n, s_n$  della corrispondente serie di Fourier vanno a zero, per  $n \rightarrow \infty$ , più rapidamente di  $n^{-k}$ :

$$|c_n|, |s_n| = o(n^{-k}), \quad n \gg 1$$

Dedurre che le derivate  $f^{(j)}(x), j = 1, \dots, k$  della funzione  $f(x)$  ammettono la rappresentazione in serie di Fourier ottenuta scambiando gli operatori di derivazione con la somma della serie.

6) *Formule di Parseval* Dimostrare le seguenti formule:

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^{\pi} dx \bar{f}(x)g(x) &= 2\pi \sum_{n \in \mathcal{Z}} \bar{f}_n g_n = \sum_{n \in \mathcal{Z}} \bar{\tilde{f}}_n \tilde{g}_n \\ &= 2\pi \bar{c}_0 c'_0 + \pi \sum_1^{\infty} \{\bar{c}_n c'_n + \bar{s}_n s'_n\} \\ &= \bar{a}_0 a'_0 + \sum_1^{\infty} \{\bar{a}_n a'_n + \bar{b}_n b'_n\} \end{aligned} \quad (59)$$

dove  $f_n, g_n, n \in \mathcal{Z}$  sono i coefficienti di Fourier di  $f(x), g(x)$  nello sviluppo in esponenziali e  $\{c_n, s_n\}, \{c'_n, s'_n\}$  sono i coefficienti di Fourier di  $f(x), g(x)$  rispettivamente nello sviluppo in seni e coseni (vedere l'esercizio 3). Dedurre,

in particolare, che:

$$\int_{-\pi}^{\pi} dx |f(x)|^2 = 2\pi \sum_{n \in \mathbb{Z}} |f_n|^2 = 2\pi |c_0|^2 + \pi \sum_1^{\infty} \{|c_n|^2 + |s_n|^2\}; \quad (60)$$

$$\|f\|_2^2 = 2\pi \|f_n\|_2^2 = \|\tilde{f}_n\|_2^2.$$

**7) Teorema di convoluzione** Dimostrare che il prodotto di convoluzione  $R(x)$  di due funzioni  $G(x)$  e  $I(x)$ :

$$R(x) = \int_{-\pi}^{\pi} dx' G(x-x') I(x')$$

equivale alla semplice moltiplicazione dei corrispondenti coefficienti di Fourier:

$$R_n = 2\pi G_n I_n, \quad (\tilde{R}_n = \tilde{G}_n \tilde{I}_n)$$

**8) a)** Sviluppare le seguenti funzioni  $f(x)$ :

*i) x; ii) x<sup>2</sup>; iii) |x|; iv) sign x; v) δ(x); vi) H(x); vii) c<sub>1</sub>H(-x)+c<sub>2</sub>H(x); viii) (H(x) - H(-x)) cos x; ix) cosh(x/π); x)  $\frac{\pi \text{sign}(x)-x}{2}$*

in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$  ed utilizzare (quando possibile) le relative formule di Parseval (o dei limiti notevoli dello sviluppo) per ottenere le somme di opportune serie numeriche. b) Disegnare e confrontare i grafici delle funzioni e delle somme delle corrispondenti serie su tutto  $\mathbb{R}$ . c) Trovate le serie di Fourier, vedere se sono assolutamente convergenti, e se e dove convergono puntualmente e uniformemente a  $f(x)$  in  $[-\pi, \pi]$ ; mettere queste

proprietà in relazione con le proprietà di regolarità della funzione  $f(x)$ .

$$\begin{aligned}
 i) \quad x &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^{n+1}}{n} \sin nx, \quad \text{Parseval} : \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}, \quad \sum_0^{\infty} \frac{(-)^n}{2n+1} = \frac{\pi}{4} \quad (x = \frac{\pi}{2}) \\
 ii) \quad x^2 &= \frac{\pi^2}{3} + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{n^2} \cos nx, \quad \text{Parseval} : \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi^4}{90}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{n^2} = -\frac{\pi^2}{12} \quad (x = 0), \\
 iii) \quad |x| &= \frac{\pi}{2} - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\cos((2n+1)x)}{(2n+1)^2}, \quad \text{Parseval} : \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^4} = \frac{1}{6} \left(\frac{\pi}{2}\right)^4, \\
 iv) \quad \text{sign } x &= \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin((2n+1)x)}{2n+1}, \quad \text{Parseval} : \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2}{8}, \\
 v) \quad \delta(x) &= \frac{1}{2\pi} + \frac{1}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \cos nx, \\
 vi) \quad H(x) &= \frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)x}{2n+1}, \quad \text{Parseval} : \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} = \frac{\pi^2}{8}, \quad \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-)^n}{2n+1} = \frac{\pi}{4} \quad (x = \frac{\pi}{2}), \\
 vii) \quad c_1 H(-x) + c_2 H(x) &= \frac{c_1+c_2}{2} - \frac{2(c_1-c_2)}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)x}{2n+1}, \\
 viii) \quad (H(x) - H(-x)) \cos x &= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{8k}{\pi(4k^2-1)} \sin 2kx, \quad \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-)^k(2p+1)}{4(2p+1)^2-1} = \frac{\pi}{8\sqrt{2}} \quad (x = \frac{\pi}{4}); \\
 ix) \quad \cosh \frac{x}{\pi} &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-)^n \sinh(1)}{1+(\pi n)^2} e^{inx}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{1+(\pi n)^2} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\sinh(1)} - 1 \right) \quad (x = 0); \\
 x) \quad \frac{\pi \text{sign}(x)-x}{2} &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n}, \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin nx}{n} = \frac{\pi}{4} \quad (x = \frac{\pi}{2}), \quad \text{Parseval} : \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6},
 \end{aligned} \tag{61}$$

**9) a)** Sviluppare le seguenti funzioni  $f(x)$ :

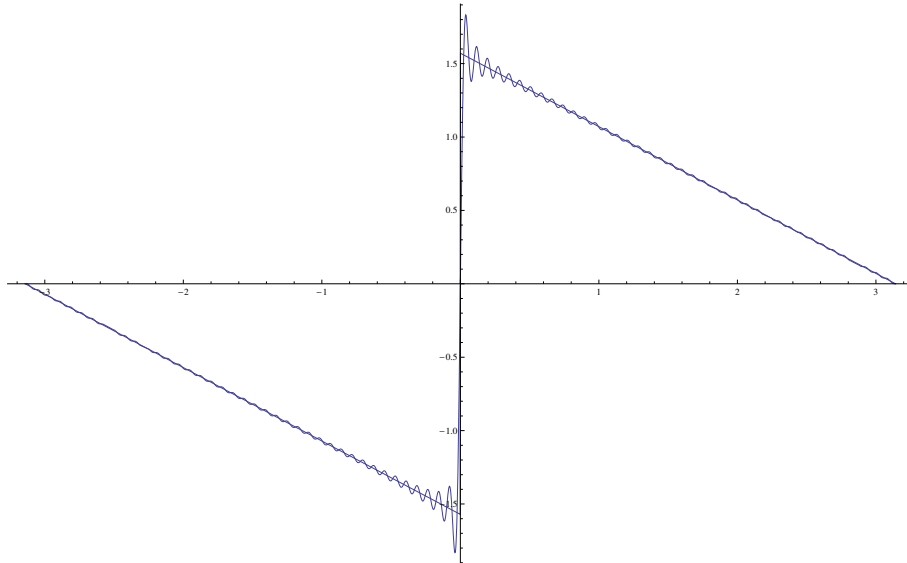
*i)*  $e^{ax}$ ; *ii)*  $x^3$ ; *iii)*  $xH(x)$ ; *iv)*  $\sin \alpha x$ ,  $\alpha \in \mathbb{R}$ ; *v)*  $\cos \alpha x$ ,  $\alpha \in \mathbb{R}$ , *vi)*  $x^2 H(x)$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$  ed utilizzare (quando possibile) le relative formule di Parseval (o dei limiti notevoli dello sviluppo) per ottenere le somme di opportune serie numeriche. 2) Disegnare e confrontare i grafici delle funzioni e delle somme delle corrispondenti serie su tutto  $\mathbb{R}$ . c) Trovate le serie di Fourier, vedere se sono assolutamente convergenti, e se e dove convergono puntualmente e uniformemente a  $f(x)$  in  $[-\pi, \pi]$ ; mettere in



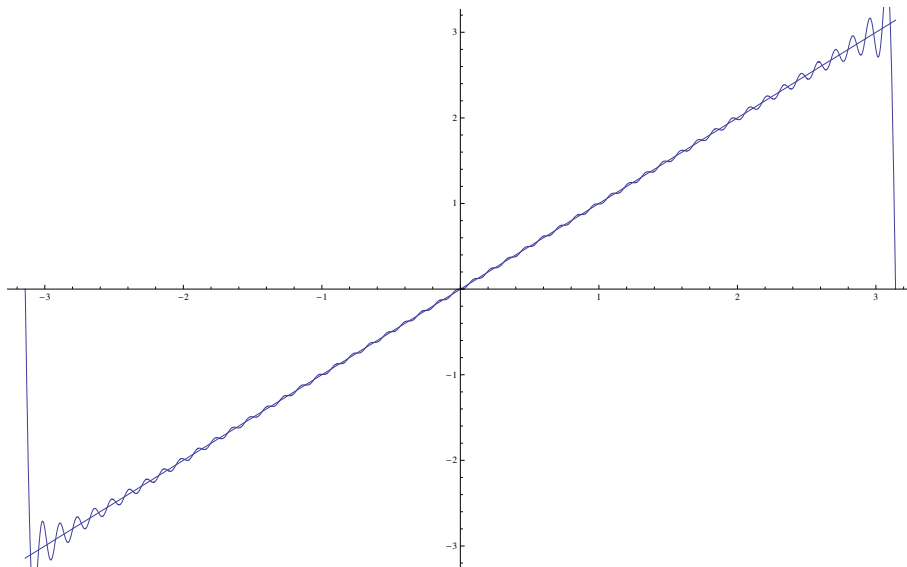
relazione queste proprietà con le proprietà di regolarità della funzione  $f(x)$ .

$$\begin{aligned}
i) \quad e^{ax} &= \frac{\sinh(a\pi)}{\pi} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-)^n}{a-in} e^{inx}, \quad \text{Parseval:} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+a^2} = \frac{1}{2a} \left( \frac{\pi}{\tanh(a\pi)} - \frac{1}{a} \right), \\
\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{n^2+a^2} &= \frac{1}{2a} \left( \frac{\pi}{\sinh(a\pi)} - \frac{1}{a} \right) \quad (x=0); \\
ii) \quad x^3 &= 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{n} \left( \frac{6}{n^2} - \pi^2 \right) \sin nx, \quad \text{Parseval:} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left( \frac{6}{n^2} - \pi^2 \right)^2; \\
\sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-)^k}{2k+1} \left( \frac{6}{(2k+1)^2} - \pi^2 \right) &= -\frac{\pi^3}{16}, \quad (x=\pi/2), \\
iii) \quad xH(x) &= \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)x}{(2n-1)^2} - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{n} \sin nx, \\
\text{Parseval:} \quad \frac{5}{48} \pi^2 &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n^2} + \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^4}; \\
iv) \quad \sin \alpha x &= \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-)^n}{\alpha-n} \sin nx, \quad \alpha \in \mathbb{R}, \\
v) \quad \cos \alpha x &= \frac{\sin \alpha \pi}{\pi} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{(-)^n}{\alpha-n} \cos nx, \quad \alpha \in \mathbb{R}, \\
vi) \quad x^2 H(x) &= \frac{\pi^2}{6} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \cos nx + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin nx - \\
\frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)x}{(2n+1)^3}. &
\end{aligned} \tag{62}$$

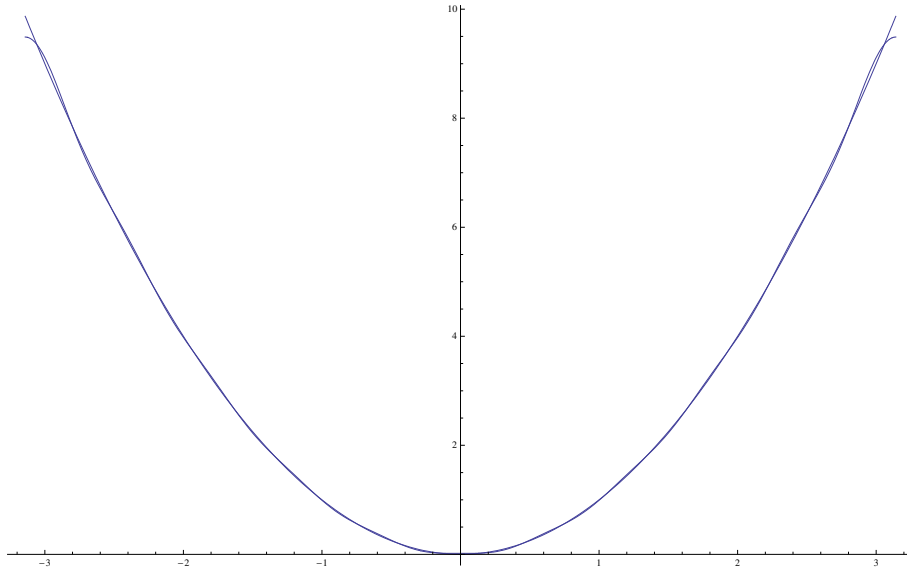
**10)** Sfruttando i risultati dell'esercizio 8, graficare le serie di Fourier troncate delle funzioni  $f_1(x) = \frac{\pi \operatorname{sign}(x)-x}{2}$ ,  $f_2(x) = x$ ,  $f_3(x) = x^2$  nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ , confrontando tali grafici con quelli delle tre funzioni. Si ottiene, ad esempio:



Grafici di  $f_1(x)$  e della serie di Fourier troncata con 80 termini.



Grafici di  $f_2(x)$  e della serie di Fourier troncata con 50 termini.



Grafici di  $f_3(x)$  e della serie di Fourier troncata con 10 termini.

Perchè, nel caso della funzione  $f_3(x) = x^2$ , bastano pochi termini della serie per ottenere un'ottima approssimazione?

**11)** *Il fenomeno di Gibbs.* I grafici precedenti mostrano le rapide oscillazioni della somma parziale della serie di Fourier intorno ad un punto  $x_0 \in [-\pi, \pi]$  di discontinuità semplice della funzione (il fenomeno di Gibbs). Mostrare che, se  $x_M$  è il punto di massimo dell'oscillazione a destra della discontinuità, allora

$$x_M \sim x_0 + \frac{\pi}{n}, \quad |f_n(x_M) - f_+(x_0)| \sim 0.09|f_+(x_0) - f_-(x_0)|, \quad n \gg 1,$$

dove  $f_n(x)$  è la somma parziale della serie di Fourier.

**12)** Calcolare  $f(x)$  e  $(\|f\|_2)^2 = \int_{-\pi}^{\pi} dx |f(x)|^2$ , dalla conoscenza dei coefficienti Fourier dello sviluppo in esponenziali: *i)*  $f_n = e^{-\alpha|n|}$ ,  $\alpha > 0$ ; *ii)*  $f_n = a^{-|n|}$ ,  $a > 1$ , verificando che:

$$i) \quad f(x) = \frac{\sinh \alpha}{\cosh \alpha - \cos x}, \quad (\|f\|_2)^2 = \frac{2\pi}{\tanh \alpha};$$

$$ii) \quad f(x) = \frac{a^2 - 1}{a^2 + 1 - 2a \cos x}, \quad (\|f\|_2)^2 = 2\pi \frac{a^2 + 1}{a^2 - 1}$$

**13)** Due funzioni  $f(x)$  e  $g(x)$  sono definite dai seguenti sviluppi in serie di Fourier

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{na^n} \sin nx, \quad g(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)^n}{b^n} \cos nx, \quad a, b > 1 \quad (63)$$

in  $[-\pi, \pi]$ . i) Mostrare che la convergenza delle due serie è uniforme in  $[-\pi, \pi]$ . ii) Verificare che

$$\left( f, \frac{dg}{dx} \right) = \frac{\pi}{7}. \quad (64)$$

**14)** Verificare che la trasformazione

$$x = \frac{2\pi}{b-a} \left( y - \frac{a+b}{2} \right), \quad b > a$$

trasforma l'intervallo  $[a, b]$  nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$  (e viceversa), ed utilizzare tale risultato per mostrare che lo sviluppo in serie di Fourier nell'intervallo  $[a, b]$  di una funzione  $g(y) \in L_2[a, b]$  è dato da:

$$g(y) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{iny \frac{2\pi}{b-a}} = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ s_n \sin \left( \frac{2\pi}{b-a} ny \right) + c_n \cos \left( \frac{2\pi}{b-a} ny \right) \right\},$$

$$f_n = \frac{1}{b-a} \int_a^b e^{i \frac{2\pi}{b-a} ny} g(y) dy, \quad s_n = \frac{2}{b-a} \int_a^b \sin \left( \frac{2\pi}{b-a} ny \right) g(y) dy,$$

$$c_0 = \frac{1}{b-a} \int_a^b g(y) dy, \quad c_n = \frac{2}{b-a} \int_a^b \cos \left( \frac{2\pi}{b-a} ny \right) g(y) dy, \quad n \geq 1.$$

**15)** Usando il risultato dell'esercizio precedente, si mostri che lo sviluppo in serie di Fourier di  $f(x) \in L_2(0, L)$  è dato da:

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} f_n e^{inx \frac{2\pi}{L}} = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ s_n \sin \left( \frac{2\pi}{L} nx \right) + c_n \cos \left( \frac{2\pi}{L} nx \right) \right\},$$

$$f_n = \frac{1}{L} \int_0^L e^{i \frac{2\pi}{L} ny} f(x) dx,$$

$$c_0 = \frac{1}{L} \int_0^L f(x) dx, \quad c_n = \frac{2}{L} \int_0^L \cos\left(\frac{2\pi}{L} nx\right) f(x) dx, \quad s_n = \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi}{L} nx\right) f(x) dx$$

**16)** *La serie dei seni e la serie dei coseni.*

i) Utilizzando la teoria della serie di Fourier, mostrare che le successioni di funzioni  $\{\cos(nx)\}_0^\infty$  e  $\{\sin(nx)\}_1^\infty$  costituiscono basi ortonormali e complete in  $L_2[0, \pi]$ , e che valgono i seguenti sviluppi in serie, se  $f(x) \in L_2[0, \pi]$ :

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(nx), \quad A_n = \frac{2}{L} \int_0^{\pi} \sin(nx) f(x) dx, \quad \text{serie del seno,}$$

$$f(x) = \frac{B_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos(nx), \quad B_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \cos(nx) f(x) dx, \quad \text{serie del coseno.}$$

ii) Verificare che gli sviluppi in serie del seno e del coseno di  $f(x) \in L_2[0, L]$  sono dati da:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin\left(nx \frac{\pi}{L}\right), \quad A_n = \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(nx \frac{\pi}{L}\right) f(x) dx, \quad \text{serie del seno,}$$

$$f(x) = \frac{B_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos\left(nx \frac{\pi}{L}\right), \quad B_n = \frac{2}{L} \int_0^L \cos\left(nx \frac{\pi}{L}\right) f(x) dx, \quad \text{serie del coseno.}$$

e confrontare questi sviluppi con lo sviluppo in serie di Fourier della stessa funzione, fatto nell'esercizio 15) (disegnare i grafici delle somme parziali e commentare). Quando converrà usare uno sviluppo piuttosto che un'altro?

## 1.8 La trasformata di Fourier

**1)** *La base continua di Fourier* Mostrare che le funzioni  $\{e^{ikx}/\sqrt{2\pi}, k \in \mathcal{R}\}$  costituiscono una base ortonormale di  $L_2(\mathcal{R})$ ; vale a dire, si verifichi che:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{2\pi} e^{i(k-k')x} = \delta(k-k'), \quad \text{ortonormalità}$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} e^{ik(x-y)} = \delta(x-y), \quad \text{completezza.}$$

Suggerimento: Si osservi che:

$$\frac{\sin(nx)}{\pi x} = \int_{-n}^n \frac{dk}{2\pi} e^{ikx}$$

e si ricordi che  $\delta_0^{(n)}(x) = \sin(nx)/(\pi x)$  rappresenta  $\delta(x)$ , per  $n \rightarrow \infty$ , sullo spazio delle funzioni di prova  $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$  che soddisfano alla condizione di Dini.

**2) La trasformata di Fourier.** i) Dedurre che una qualunque funzione  $f(x) \in L_2(-\infty, \infty)$  è sviluppabile nella base  $\{e^{ikx}/\sqrt{2\pi}, k \in \mathbb{R}\}$  (ammette cioè la rappresentazione in integrale di Fourier):

$$f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{\sqrt{2\pi}} e^{ikx} \tilde{f}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} e^{ikx} \hat{f}(k),$$

$$\tilde{f}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ikx} f(x) \frac{dx}{\sqrt{2\pi}}, \quad \hat{f}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ikx} f(x) dx, \quad (\hat{f}(k) = \sqrt{2\pi} \tilde{f}(k)).$$

la funzione  $\tilde{f}(k)$  è detta “trasformata di Fourier” di  $f(x)$  e la funzione  $\int_{\mathbb{R}} (dk/\sqrt{2\pi}) \exp(ikx) \tilde{f}(k)$  è detta “anti-trasformata di Fourier”.

ii) Mostrare che, se  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , la trasformata di Fourier  $\tilde{f}(k)$  è continua, uniformemente limitata, e converge a 0 per  $k \rightarrow \pm\infty$ .

**3) La trasformata di Fourier dalla serie di Fourier attraverso un procedimento di limite.** Mostrare che la trasformata di Fourier di una funzione  $f \in L_2(\mathbb{R})$  è ottenibile dalla serie di Fourier di una funzione  $f \in L_2[a, b]$  nel limite  $a \rightarrow -\infty$ ,  $b \rightarrow \infty$ , attraverso un’opportuno limite continuo, i) osservando che, in tale limite, la successione  $\{k_n\}_{n \in \mathbb{N}}$

$$k_n := \frac{2\pi}{b-a} n$$

si infittisce su tutto l’asse reale, tendendo alla variabile continua  $k$  (infatti  $\Delta k_n = k_{n+1} - k_n = \frac{2\pi}{b-a} = 2\pi\Delta$ ,  $\Delta := \frac{1}{b-a}$ ); ii) introducendo la notazione  $f_n = \Delta \hat{f}(k_n)$ , si ottiene:

$$\begin{aligned} f(x) &= \Delta \sum_{n \in \mathbb{N}} \hat{f}(k_n) e^{ik_n x} = \sum_{n \in \mathbb{N}} \frac{\Delta k_n}{2\pi} \hat{f}(k_n) e^{ik_n x} \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} e^{ikx} \hat{f}(k), \\ \hat{f}(k_n) &= \int_a^b dx e^{-ik_n x} f(x) \rightarrow \hat{f}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-ikx} f(x). \end{aligned} \quad (65)$$

iii) Mostrare che, in questo limite, la relazione di Parseval diventa la relazione di Plancherel:

$$(f, f) = \|f\|_2^2 = \int_{-\infty}^{\infty} dx |f(x)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} |\hat{f}(k)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\tilde{f}(k)|^2 dk$$

**4) Proprietà di convergenza puntuale ed uniforme della trasformata di Fourier.** Dimostrare che l'anti-trasformata di Fourier gode delle seguenti proprietà di convergenza.

i) Converge in norma  $\|\cdot\|_2$  a  $f(x) \in L_2(\mathbb{R})$ ; cioè:

$$\begin{aligned} \|f(x) - f_n(x)\|_2 &\rightarrow 0, \quad n \rightarrow \infty, \\ f_n(x) &:= \int_{-n}^n \frac{dk}{2\pi} e^{ikx} \hat{f}(k) = \int_{-n}^n \frac{dk}{2\pi} e^{ikx} \int_{\mathbb{R}} dx' e^{ik(x-x')} f(x'), \end{aligned} \quad (66)$$

ii) Essa converge puntualmente a  $f(x) \in L_1(\mathbb{R})$ :

$$\lim_{n \rightarrow \infty} |f_n(x) - f(x)| = 0$$

in ogni punto  $x \in \mathbb{R}$  in cui  $f(x)$  è continua e soddisfa alla condizione di Dini (l'assoluta convergenza del rapporto incrementale

$$\frac{f(y+x) - f(x)}{y} \quad (67)$$

nell'intorno  $y \in (-\delta, \delta)$  di quel punto). Converge infine uniformemente a  $f(x)$

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

se  $f(x)$  è continua e la condizione di Dini è soddisfatta uniformemente.

iii) Se  $f(x)$  ha una discontinuità semplice in  $x_0 \in \mathbb{R}$ , con

$$f_{\pm}(x_0) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} f(x_0 \pm \epsilon)$$

e la condizione del Dini è soddisfatta per i rapporti incrementali destro e sinistro, allora

$$\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x_0) = \frac{f_+(x_0) + f_-(x_0)}{2}.$$

**5) Esempi significativi di trasformate e antitrasformate di Fourier**

i) Si mostri che le trasformate di Fourier delle funzioni  $f_1(x) = (\sqrt{2\pi}\sigma)^{-1} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x}{\sigma})^2}$ ,  $f_2(x) = (1+x^2)^{-1}$ ,  $f_3(x) = \delta(x-x_0)$ ,  $f_4(x) = H(x-x_0)$ ,  $f_5(x) =$

$H(L - |x|)$ ;  $f_6(t) = H(t_0^2 - t^2) \sin \omega_0 t$ ;  $f_7(x) = 1$ ;  $f_8(x) = H(L^2 - x^2) e^{ik_0 x}$  (dove  $H(x)$  è la funzione gradino) sono, rispettivamente:

$$\hat{f}_1(k) = e^{-\frac{1}{2}(\sigma k)^2}; \quad \hat{f}_2(k) = \pi e^{-|k|}; \quad \hat{f}_3(k) = e^{-ikx_0};$$

$$\hat{f}_4(k) = \frac{e^{-ikx_0}}{i(k - i\epsilon)}; \quad \hat{f}_5(k) = 2 \frac{\sin kL}{k};$$

$$\hat{f}_6(\omega) = -i \left( \frac{\sin(\omega_0 - \omega)t_0}{\omega_0 - \omega} - \frac{\sin(\omega_0 + \omega)t_0}{\omega_0 + \omega} \right), \quad \hat{f}_7(k) = 2\pi \delta(k)$$

$$\hat{f}_8(k) = 2 \frac{\sin(k - k_0)L}{k - k_0}$$

verificando che tanto maggiore è la localizzazione della funzione quanto minore è quella della sua trasformata di Fourier.

ii) Calcolare l'antitrasformata di Fourier delle funzioni  $\hat{f}_j(k)$ , riottenendo le funzioni  $f_j(x)$  dalle quali eravate partiti.

iii) Ottenere le seguenti rappresentazioni di Fourier della delta di Dirac e della funzione gradino  $H(x - x_0)$  di Heaviside:

$$\delta(x - x_0) = \int_{\mathbb{R}} \frac{dk}{2\pi} e^{ik(x-x_0)}, \quad H(x - x_0) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \int_{\mathbb{R}} \frac{dk}{2\pi i} \frac{e^{ik(x-x_0)}}{k - i\epsilon}.$$

**6)** Mostrare che:  $f(x) = x^n \Rightarrow \hat{f}(k) = 2\pi i^n \delta^{(n)}(k)$ .

**7)** Si è già dimostrato che  $L_2[a, b] \subset L_1[a, b]$ . Se, invece, l'intervallo  $[a, b]$  è infinito, allora l'inclusione non è più vera e c'è indipendenza tra  $L_1(\mathbb{R})$  e  $L_2(\mathbb{R})$ . Costruire funzioni che appartengono a  $L_2(\mathbb{R})$  ma non a  $L_1(\mathbb{R})$ , e funzioni che appartengono a  $L_1(\mathbb{R})$  ma non a  $L_2(\mathbb{R})$ .

R. Ad esempio, sia  $f(x) = |x|^{-\alpha} (x^2 + 1)^{-\beta}$ ; allora: i) se  $\alpha = 3/2, \beta = 1/8$ ,  $f \notin L^1(\mathbb{R}), L^2(\mathbb{R})$ ; ii) se  $\alpha = 1/4, \beta = 1$ ,  $f \in L^1(\mathbb{R}) \cap L^2(\mathbb{R})$ ; iii) se  $\alpha = 2/3, \beta = 1$ ,  $f \in L^1(\mathbb{R}), \notin L^2(\mathbb{R})$ ; se iv)  $\alpha = 0, \beta = 1/3$ ,  $f \notin L^1(\mathbb{R}), \in L^2(\mathbb{R})$ .

**8) Proprietà della trasformata di Fourier** i) Mostrare che, se  $f \in L^1(\mathbb{R})$ , allora la trasformata di Fourier  $\hat{f}(k)$  è uniformemente limitata (cioè è maggiorata da una costante finita indipendente da  $k$ ); ii)  $\hat{f}(k) \rightarrow 0, k \rightarrow \pm\infty$ . iii) Mostrare che, se la successione di funzioni  $\{f^{(n)}(x)\} \subset L_1(\mathbb{R})$  converge in norma  $\|\cdot\|_1$  a  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , allora la successione delle trasformate di Fourier  $\{\hat{f}^{(n)}(x)\}$  converge uniformemente a  $\hat{f}(k)$ . iv) Mostrare che, se  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , allora la trasformata di Fourier  $\hat{f}(k)$  è continua in  $\mathbb{R}$ .



R. i)  $|\hat{f}(k)| \leq \|f\|_1$ . ii) Spezzare l'integrale che definisce  $\hat{f}$ , in  $|x| < X$  e  $|x| > X$ . Per  $X$  sufficientemente grande, l'integrale per  $|x| > X$  è arbitrariamente piccolo, poichè  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , e l'integrale per  $|x| < X$  converge a 0 per  $|k| \rightarrow \infty$  per il lemma di Riemann-Lebesgue. iv) Se  $f$  è una funzione a gradino,  $\hat{f}$  è continua. Poichè le funzioni a gradino sono dense in  $L_1(\mathbb{R})$ , esiste successione di funzioni a gradino tale che  $\|f^{(n)} - f\|_1 \rightarrow 0$ , e quindi, usando iii),  $\|\hat{f}^{(n)} - \hat{f}\|_\infty \rightarrow 0$ , da cui segue che  $\hat{f}$  è continua (in classe abbiamo fatto una dimostrazione diversa..)

**9)** È noto che, se  $f(x) \in L_1(\mathbb{R})$ , la sua trasformata di Fourier  $\hat{f}(k)$  (che gode delle proprietà elencate nell'esercizio precedente) non appartiene necessariamente a tale spazio. Mostrarlo nei seguenti due esempi: i) la funzione  $f_1(x) = H(1 - |x|)$ , che dà luogo alla  $\hat{f}_1(k) = 2(\sin k)/k$ ; ii) la funzione  $f_2(x) = |x|^{-2/3}e^{-x^2}$ , che dà luogo alla  $\hat{f}_2(k) \sim |k|^{-1/2}$ ,  $|k| \sim \infty$ . Se, invece,  $f(x) \in L_2(\mathbb{R})$ , e  $\hat{f}(k)$  esiste, allora  $\hat{f}(k) \in L_2(\mathbb{R})$ ; mostrarlo per le funzioni  $f_1(x)$  e  $f_3(x) = |x|^{-1/3}e^{-x^2}$ , che dà luogo alla  $\hat{f}_3(k) \sim |k|^{-2/3}$ ,  $|k| \sim \infty$ .

**10) Proprietà della trasformata di Fourier** Si verifichi le seguenti proprietà della trasformata di Fourier:

- 1)  $g(x) = f(ax)$ ,  $f \in L_1(\mathbb{R}) \Leftrightarrow \hat{g}(k) = \hat{f}(k/a)/|a|$  (riscaldamento)
- 2)  $g(x) = f(x + a)$ ,  $f \in L_1(\mathbb{R}) \Leftrightarrow \hat{g}(k) = e^{ika}\hat{f}(k)$  (traslazione)
- 3)  $g(x) = e^{iax}f(x)$ ,  $f \in L_1(\mathbb{R}) \Leftrightarrow \hat{g}(k) = \hat{f}(k - a)$
- 4)  $g(x) = f^{(n)}(x)$ ,  $f^{(s)} \in L_1(\mathbb{R})$ ,  $0 \leq s \leq n$ ,  $\Leftrightarrow \hat{g}(k) = (ik)^n \hat{f}(k)$  (derivazione n-esima)
- 5)  $g(x) = \hat{L}(\frac{d}{dx})f(x)$ ,  $\Leftrightarrow \hat{g}(k) = \hat{L}(ik)\hat{f}(k)$
- 6)  $g(x) = x^n f(x) \in L_1(\mathbb{R}) \Leftrightarrow \hat{g}(k) = i^n \hat{f}^{(n)}(k)$
- 7)  $g(x) = \int_{-\infty}^x dy f(y)$  ( $\int_{\mathbb{R}} f(x) dx = 0$ )  $\Leftrightarrow \hat{g}(k) = (ik)^{-1} \hat{f}(k)$  (integrazione)

R. Ad esempio, per la 4):

$$\hat{g}(k) = \int_{\mathbb{R}} \exp(-ikx) f'(x) dx = ik \int_{\mathbb{R}} \exp(-ikx) f(x) dx = ik \hat{f}(k)$$

**11) Regolarità di  $f$  e rapidità di convergenza a 0 di  $\hat{f}$  (e viceversa).** Dalle proprietà della derivazione, ottenute nell'esercizio precedente, segue che, se  $f^{(s)} \in L_1(\mathbb{R})$ ,  $0 \leq s \leq n$ , allora  $\hat{f}(k) \rightarrow 0$  per  $k \rightarrow \pm\infty$  più rapidamente di  $1/|k|^n$ . Quindi: *più derivate di  $f(x)$  appartengono a  $L_1(\mathbb{R})$  (più regolare è  $f(x)$ ) e più rapidamente converge a 0  $\hat{f}(k)$  all' $\infty$ .* Data la simmetria tra trasformata e anti-trasformata, si ha anche che: *più rapidamente converge a 0  $f(x)$  all' $\infty$  e più derivate ha  $\hat{f}(k)$  in  $L_1(\mathbb{R})$  (più regolare è  $\hat{f}(k)$ ).*

Convincerli quindi che:

$$f(x) \in S(\mathbb{R}) \Leftrightarrow \hat{f}(k) \in S(\mathbb{R})$$

**12)** Teorema di Plancherel. Se  $f$  appartiene a  $L_2(\mathbb{R})$ , allora  $\hat{f} \in L_2(\mathbb{R})$  e vale la relazione di Plancherel:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx |f(x)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} |\hat{f}(k)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} dk |\tilde{f}(k)|^2$$

e la sua generalizzazione

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \overline{f_2(x)} f_1(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} \overline{\hat{f}_2(k)} \hat{f}_1(k) = \int_{-\infty}^{\infty} dk \overline{\tilde{f}_2(k)} \tilde{f}_1(k)$$

**R.** Dimostrare questo risultato per  $f_1, f_2 \in S(\mathbb{R})$ , partendo da  $(f_2, f_1) = \int_{\mathbb{R}} (\int_{\mathbb{R}} e^{ikx} \hat{f}_1(k) dk) \overline{f_2(x)} dx$  e scambiando l'ordine di integrazione (teorema di Fubini); quindi porre  $f_1 = f_2 = f$ . Infine sfruttare il fatto che lo spazio  $S(\mathbb{R})$  è denso in  $L_2(\mathbb{R})$ , e il risultato dell'esercizio precedente.

**13)** Teorema di convoluzione Si mostri che, definito il prodotto di convoluzione  $R(x)$  di due funzioni  $G(x), I(x) \in L_1(\mathbb{R})$ :

$$R(x) = \int_{-\infty}^{\infty} G(x-y)I(y)dy =: (G * I)(x),$$

i)  $(G * I)(x) = (I * G)(x)$ ; ii)  $R(x) \in L_1(\mathbb{R})$ ; iii) la trasformata di Fourier del prodotto di convoluzione  $R$  è il prodotto delle trasformate di Fourier di  $I$  e  $G$ :

$$\hat{R}(k) = \hat{G}(k)\hat{I}(k)$$

**14)** Si usi il teorema di convoluzione per calcolare il prodotto di convoluzione  $R(x)$  delle funzioni  $G(x)$  e  $I(x)$ , conoscendone le trasformate di Fourier  $\hat{G}(k)$  e  $\hat{I}(k)$ , nei seguenti casi:

i)  $\hat{G}(k) = (ik - 2)^{-1}$ ,  $\hat{I}(k) = (ik + 1)^{-1}$ ; ii)  $\hat{G}(k) = (ik - 1)^{-1}$ ,  $\hat{I}(k) = e^{-ikx_0}$ ,  $x_0 \in \mathcal{R}$ ; iii)  $\hat{G}(k) = (k^2 + 1)^{-1}$ ,  $\hat{I}(k) = e^{-ikx_0}$ ,  $x_0 \in \mathcal{R}$

**R.** i)  $-[H(x)e^{-x} + H(-x)e^{x-x_0}]/3$ ; ii)  $-H(x_0 - x)e^{x-x_0}$ ; iii)  $e^{-|x-x_0|/2}$

**15)** Significato fisico della trasformata di Fourier Se la funzione  $f(t) \in L_2(\mathbb{R})$  rappresenta un segnale (luminoso, acustico, ..) tale che  $\int_{\mathcal{R}} dt |f(t)|^2 = 1$ , si osservi, usando la definizione di trasformata di Fourier:

$$f(t) = \int_{\mathbb{R}} \frac{d\omega}{2\pi} e^{i\omega t} \hat{f}(\omega), \quad \hat{f}(\omega) = \int_{\mathcal{R}} dt e^{-i\omega t} f(t)$$

e la formula di Plancherel, che  $|f(t)|^2 dt$  è la probabilità che il segnale arrivi nell'intervallo  $(t, t + dt)$  (e quindi la  $\int_{\mathbb{R}} dt |f(t)|^2 = 1$  indica che il segnale arriva, prima o poi) e  $|\hat{f}(\omega)|^2 d\omega / (2\pi) = |\hat{f}(\nu)|^2 d\nu$  è la probabilità che il segnale contenga frequenze nell'intervallo  $(\nu, \nu + d\nu)$ . Se, invece,  $f(x)$  è la funzione d'onda in meccanica quantistica di una particella localizzata, allora  $|f(x)|^2 dx$  è la probabilità di trovare la particella nell'intervallo  $(x, x + dx)$  e  $|\hat{f}(k)|^2 dk / (2\pi)$  è la probabilità che la particella abbia numero d'onda nell'intervallo  $(k, k + dk)$  o, equivalentemente, quantità di moto nell'intervallo  $(p, p + dp)$  (dalla relazione di De Broglie:  $p = hk / (2\pi)$ , che lega la quantità di moto  $p$  della particella quantistica al suo numero d'onda  $k$ , dove  $h$  è la costante di Planck ).

**16) Equazioni differenziali con la trasformata di Fourier.** Trovare la soluzione generale dell'equazione differenziale del second'ordine non omogenea  $u''(t) + \omega_0^2 u(t) = t^n$ ,  $n = 0, 1, 2, 3$  col metodo della trasformata di Fourier, attraverso i seguenti passi.

i) Verificare che la trasformata di Fourier  $\hat{u}(\omega)$  di  $u(t)$  soddisfa all'equazione algebrica non omogenea

$$(-\omega^2 + \omega_0^2)\hat{u}(\omega) = \frac{2\pi}{(-i)^n} \delta^{(n)}(\omega),$$

dove  $\delta^{(n)}$  è la derivata  $n$ -esima della delta di Dirac.

ii) Mostrare che la soluzione generale di tale equazione algebrica, nel senso delle distribuzioni, è:

$$\hat{u}(\omega) = -\frac{2\pi}{(-i)^n} \frac{\delta^{(n)}(\omega)}{\omega^2 - \omega_0^2} + c\delta(\omega - \omega_0) + d\delta(\omega + \omega_0).$$

iii) Determinare  $u(t)$  attraverso l'anti-trasformata di Fourier di  $\hat{u}(\omega)$  per  $n = 0, 1, 2, 3$ .

## 1.9 Trasformata di Laplace e soluzione di equazioni lineari alle derivate parziali

1) *Dalla trasformata di Fourier a quella di Laplace.* Usare i risultati relativi alla Trasformata di Fourier per mostrare che, se  $f(x)$  è tale che: i)  $f(x) \in L^1_{loc}[0, \infty)$ , ii)  $|f(x)| < ce^{\gamma x}$ ,  $c, \gamma > 0$ ,  $x > M$ , iii)  $f(x) = 0$ ,  $x < 0$ , allora:

a) esistono la trasformata  $\phi(p)$  e l'anti-trasformata di Laplace di  $f(x)$ , defi-

nite così:

$$\begin{aligned} \phi(p) &= \int_0^{\infty} f(x)e^{-px} dx \equiv \mathcal{L}(f)(p), \quad p > \gamma, \quad \text{trasformata di Laplace} \\ \frac{1}{2\pi i} \int_{\nu-i\infty}^{\nu+i\infty} e^{px} \phi(p) dp &\equiv \mathcal{L}^{-1}(\phi), \quad \operatorname{Re}(p) = \nu > \gamma \quad \text{anti-trasformata di Laplace} \end{aligned} \quad (68)$$

b) Si mostri che la trasformata di Laplace  $\phi(p)$ , definita nel primo integrale, è analitica per  $\operatorname{Re}(p) > \gamma$ . Si deduca, quindi, che la retta  $\operatorname{Re}(p) = \nu$  nel secondo integrale sta a destra di tutte le singolarità della trasformata di Laplace  $\phi(p)$  (quindi la definizione di anti-trasformata di Laplace non è ambigua).

c) l'anti-trasformata di Laplace converge puntualmente a  $f(x)$  in  $\mathbb{R}^+$  se  $e^{-px} f(x) \in L_1(\mathbb{R})$  e soddisfa alla condizione di Dini in  $\mathbb{R}^+$ .

d) vale il teorema di convoluzione  $\mathcal{L}(f * g) = \mathcal{L}(f)\mathcal{L}(g)$ , dove

$$(f * g)(x) := \int_0^x f(x-t)g(t)dt. \quad (69)$$

**2)** Si faccia uso del teorema dei residui su un opportuno contorno per calcolare le anti-trasformate di Laplace di i)  $\phi(p) = (1 + p^2)^{-1}$ , ii)  $\phi(p) = (p - a)^{-1}$ ,  $a \in \mathbb{R}$ , iii)  $\phi(p) = p(1 + p^2)^{-1}$ , iv)  $\phi(p) = (p^2 - 1)(p^2 + 1)^{-1}$ . v)  $\phi(p) = p(p^2 + 1)^{-1}$ .

R. i)  $f(x) = \sin x$ , ii)  $f(x) = e^{ax}$ , iii)  $f(x) = \cos x$ , ix)  $f(x) = x \cos x$ , v)  $f(x) = \frac{x}{2} \sin x$

**3)** Si mostri che, se  $f(x)$  gode, insieme a  $f'(x)$ ,  $f''(x)$ , delle proprietà elencate nell'esercizio 1), allora:

$$\mathcal{L}(f')(p) = p\phi(p) - f(0^+), \quad \mathcal{L}(f'')(p) = p^2\phi(p) - f'(0^+) - pf(0^+). \quad (70)$$

**4)** Si faccia uso della trasformata di Laplace ed, eventualmente, del teorema di convoluzione, per risolvere i seguenti problemi al valore iniziale per equazioni differenziali ordinarie:

$$x'' + 3x' + 2x = e^t, \quad x(0) = 0, \quad x'(0) = 1,$$

$$x'' + x = H(t) - 2H(t-1) + H(t-2), \quad x(0) = x'(0) = 0.$$

R i)  $x(t) = e^t/6 - 2e^{-2t}/3 + e^{-t}/2$ ,

ii)  $x(t) = (1 - \cos t)H(t) - 2(1 - \cos(t-1))H(t-1) + (1 - \cos(t-2))H(t-2)$

5) Si faccia uso della trasformata di Laplace ed, eventualmente, del teorema di convoluzione, per risolvere i seguenti problemi di Cauchy per equazioni differenziali ordinarie:

$$\begin{aligned}x'_1 &= 2x_1 - 4x_2, & x'_2 &= x_1 - 2x_2, & x_1(0) &= 1, & x_2(0) &= 1, \\x'' &+ x &= \cos t, & & x(0) &= x'(0) &= 0\end{aligned}$$

R. i)  $x_1 = 1 - 2t$ ,  $x_2 = 1 - t$ ; ii)  $x = \frac{t}{2} \sin t$

### 1.10 Problemi al contorno per equazioni alle derivate parziali con la serie e trasformata di Fourier

1) Si consideri il seguente problema di Cauchy (al valore iniziale sulla retta):

$$\begin{aligned}[\partial/\partial t + i\omega(-i\partial/\partial x)]u(x, t) &= 0, & x &\in \mathbb{R}, \\u(x, 0) &= u_0(x), & u(x, t) &\in L_2(\mathbb{R}) \text{ rispetto a } x.\end{aligned}\tag{71}$$

dove  $\omega(-i\partial/\partial x)$  è un operatore differenziale lineare a coefficienti costanti e  $u_0(x)$  è la condizione iniziale assegnata. Tale problema si risolve convenientemente con l'uso della trasformata di Fourier nel seguente modo.

i) Si mostri che la trasformata di Fourier  $\hat{u}(k, t) = \int_{\mathcal{R}} dx e^{-ikx} u(x, t)$  della soluzione risolve il problema al valore iniziale per l'equazione differenziale ordinaria:

$$[d/dt + i\omega(k)]\hat{u}(k, t) = 0, \quad \hat{u}(k, 0) = \int_{\mathcal{R}} dx e^{-ikx} u_0(x),$$

chiaramente più semplice di quello di partenza, poichè si è passati da un'equazione alle derivate parziali ad un'equazione alle derivate ordinarie, che ha la soluzione esplicita  $\hat{u}(k, t) = \hat{u}(k, 0)e^{-i\omega(k)t}$ . Quindi il problema di Cauchy ammette la seguente soluzione (esplicita a meno del calcolo di un integrale di Fourier):

$$\begin{aligned}u(x, t) &= \int_{\mathcal{R}} \frac{dk}{2\pi} e^{ikx - i\omega(k)t} \hat{u}(k, 0) \\ \hat{u}(k, 0) &= \int_{\mathcal{R}} dx e^{-ikx} u_0(x)\end{aligned}$$

ii) Si mostri che tale soluzione può anche essere scritta nella forma di un integrale di convoluzione:

$$u(x, t) = \int_{\mathcal{R}} dx' K(x - x', t) u_0(x'), \quad K(x, t) := \int_{\mathcal{R}} \frac{dk}{2\pi} e^{ikx - i\omega(k)t},$$

dove  $K(x, t)$  è una soluzione particolare dell'equazione, detta soluzione fondamentale, che nasce dalla condizione iniziale  $u_0(x) = \delta(x)$ .

iii) Calcolare  $K(x, t)$  nei due casi dell'equazione del calore  $u_t - u_{xx} = 0$  (che descrive fenomeni di diffusione) e dell'equazione di Schrödinger  $iu_t + u_{xx} = 0$  (per una particella libera), mostrando che:

$$\begin{aligned} K(x, t) &= \frac{e^{-\frac{x^2}{4t}}}{2\sqrt{\pi t}}, & \text{equ. del calore,} \\ K(x, t) &= \frac{e^{i\frac{x^2}{4t} - i\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{\pi t}}, & \text{equ. di Schrödinger} \end{aligned} \quad (72)$$

**2)** Usare i risultati dell'esercizio precedente per risolvere il problema di Cauchy per l'equazione del calore e per l'equazione di Schrödinger  $iu_t + u_{xx} = 0$ , mostrando che,

i) se  $u(x, 0) = u_0\delta(x - x_0)$ , allora:

$$\begin{aligned} u(x, t) &= u_0 \frac{e^{-\frac{(x-x_0)^2}{4t}}}{2\sqrt{\pi t}}, & \text{equ. del calore} \\ u(x, t) &= u_0 \frac{e^{i\frac{(x-x_0)^2}{4t} - i\frac{\pi}{4}}}{2\sqrt{\pi t}}, & \text{equ. di Schrödinger} \end{aligned}$$

ii) se  $u(x, 0) = u_0e^{-\left(\frac{x}{\Delta}\right)^2}$ , allora:

$$\begin{aligned} u(x, t) &= \frac{u_0\Delta}{\sqrt{\Delta^2 + 4t}} e^{-\frac{x^2}{\Delta^2 + 4t}}, & \text{equ. del calore} \\ u(x, t) &= \frac{u_0\Delta}{(\Delta^2 + 4it)^{1/2}} e^{-\frac{x^2}{\Delta^2 + 4it}}, & -\pi < \arg(\Delta^2 + 4it) < \pi, \text{ equ. di Schrödinger.} \end{aligned}$$

iii) se  $u(x, 0) = u_0H(x - x_0)$ , dove  $H$  è la funzione gradino, allora:

$$u(x, t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + \operatorname{Erf} \left( \frac{x - x_0}{2\sqrt{t}} \right) \right], \quad \text{equ. del calore}$$

dove  $\operatorname{Erf}(x)$  è la "funzione errore":

$$\operatorname{Erf}(x) := \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-y^2} dy$$

**3)** Data una corda vibrante (descritta dall'equazione  $u_{tt} - v^2u_{xx} = 0$ , con  $v^2 = \tau/\mu$ , dove  $\tau$  è la tensione della corda e  $\mu$  è la sua densità lineare

di massa), di lunghezza  $L$ , bloccata agli estremi, e con condizioni iniziali:  $u(x, 0) = f(x)$  e  $u_t(x, 0) = g(x)$  assegnate,

i) determinare la soluzione  $u(x, t)$  in questo caso generale, e nei due casi particolari ii) e iii) in cui, rispettivamente, la corda viene “pizzicata”, come nel caso della chitarra ( $u_t(x, 0) = g(x) = 0$ ), e “martellata”, come nel caso del pianoforte ( $u(x, 0) = f(x) = 0$ ).

Risp. i)

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [\alpha_n \cos(\frac{n\pi v}{L}t) + \beta_n \sin(\frac{n\pi v}{L}t)] \sin(\frac{n\pi}{L}x),$$

$$\alpha_n = \frac{2}{L} \int_0^L g(x) \sin(\frac{n\pi}{L}x) dx, \quad \beta_n = \frac{2}{n\pi v} \int_0^L f(x) \sin(\frac{n\pi}{L}x) dx \quad (73)$$

ii) corda pizzicata:  $u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \alpha_n \cos(\frac{n\pi v}{L}t) \sin(\frac{n\pi}{L}x)$ ,  $\alpha_n = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \sin(\frac{n\pi}{L}x) dx$

iii) corda martellata:  $u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \sin(\frac{n\pi v}{L}t) \sin(\frac{n\pi}{L}x)$ ,  $\beta_n = \frac{2}{n\pi v} \int_0^L g(x) \sin(\frac{n\pi}{L}x) dx$

4) Il caso di corda pizzicata è spesso schematizzato dalla condizione iniziale

$$u(x, 0) = \theta(x)\theta(L/a-x) \frac{ah}{L}x + \theta(x-L/a)\theta(L-x) \frac{ah}{a-1} (1 - \frac{x}{L}), \quad a > 1. \quad (74)$$

Mostrare allora che

$$\alpha_n = \frac{2a^2h}{(a-1)n^2\pi^2} \sin \frac{n\pi}{a}. \quad (75)$$

Deduciamo quindi che a) l'ampiezza dei modi decade come  $n^{-2}$ ; quindi le uniche armoniche udibili sono quella fondamentale e poche altre. Inoltre b) il seno si annulla se  $n$  è multiplo di  $a$ : ( $n = ma$ ). Se, ad esempio,  $a = 2$  (la corda è pizzicata al centro), sono eliminate tutte le armoniche pari.

5) Il caso di corda martellata nel punto  $x_0 \in (0, L)$  è spesso schematizzato dalla condizione iniziale

$$u(x, 0) = A\delta(x - x_0). \quad (76)$$

Mostrare allora che

$$\beta_n = \frac{2A}{n\pi v} \sin(\frac{n\pi}{L}x_0). \quad (77)$$

Dedurre che  $\beta_n$  decade come  $n^{-1}$ , più lentamente del caso di corda pizzicata; quindi il suono contiene più armoniche alte (è un suono più duro del precedente).

**6)** Si consideri una sbarra metallica di lunghezza  $L$  mantenuta alle temperature costanti  $T_1$  e  $T_2$  agli estremi  $x = 0$  e  $x = L$  rispettivamente. Se la temperatura iniziale è  $u(x, 0) = u_0(x)$ ,  $0 < x < L$ , si determini la temperatura  $u(x, t)$  della sbarra al variare del tempo (si usi l'equazione del calore:  $u_t - a^2 u_{xx} = 0$ ) e si valuti tale temperatura per  $t \gg 1$  (suggerimento: risolvere prima il caso  $T_1 = T_2 = 0$  e poi quello generale).

$$\text{Risp. } u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-(\frac{n\pi a}{L})^2 t} \sin(\frac{n\pi}{L} x) + \frac{T_2 - T_1}{L} x + T_1,$$

$$c_n = \frac{2}{L} \int_0^L [u_0(x) - \frac{T_2 - T_1}{L} x - T_1] \sin(\frac{n\pi}{L} x) dx$$

**7)** Si consideri una sbarra metallica di lunghezza  $L$  soggetta ai flussi di calore  $u_x(0, t) = \phi_1$  e  $u_x(L, t) = \phi_2$  costanti ai bordi  $x = 0$  e  $x = L$  rispettivamente. Si determini la temperatura  $u(x, t)$  sapendo che  $u(x, 0) = u_0(x)$ .

**8)** Si consideri una superficie metallica di forma rettangolare (lati  $a$  e  $b$ ) il cui bordo è mantenuto alla temperatura costante  $T_0$ . Si determini la temperatura  $u(x, y, t)$ ,  $0 < x < a$ ,  $0 < y < b$  della superficie metallica al variare del tempo (usando l'equazione del calore  $u_t - a^2(u_{xx} + u_{yy}) = 0$ ), se la temperatura iniziale è descritta dalla funzione  $u(x, y, 0) = u_0(x, y)$ .

**9)** Si consideri l'equazione di Schrödinger non stazionaria  $i\psi_t + \psi_{xx} - V(x)\psi = 0$  con  $V(x) = 0$ ,  $0 < x < L$ ;  $V(x) = \infty$ ,  $x < 0$ ,  $x > L$ . Si determini l'evoluzione della funzione d'onda  $\psi(x, t)$  soggetta alla condizione iniziale  $\psi(x, 0) = \psi_0(x)$  assegnata

$$\text{Risp. } \psi(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n e^{-i(\frac{n\pi}{L})^2 t} \sin(\frac{n\pi}{L} x), \quad c_n = \frac{2}{L} \int_0^L \psi_0(x) \sin(\frac{n\pi}{L} x) dx$$

### 1.11 Esercizi vari

i) Dare la definizione di dipendenza lineare di elementi di uno spazio vettoriale astratto e determinare per quale valore del parametro  $\alpha$  i tre polinomi di secondo grado  $\{\alpha - 2x, x(1 - x), 1 + x^2\}$  sono dipendenti.

ii) Mostrare che  $\{1, x, x^2\}$  è una base nello spazio dei polinomi di secondo grado nell'intervallo  $[-1, 1]$  e ortogonalizzarla.

R.  $\alpha = -2$

Dimostrare che: 1) se  $\hat{A}$  è un operatore autoaggiunto, i) i suoi autovalori sono reali; ii) ad autovalori diversi corrispondono autovettori ortogonali. 2) Se  $\hat{U}$  è un operatore unitario, i) i suoi autovalori hanno modulo 1; ii) ad autovalori diversi corrispondono autovettori ortogonali.



- i) Sviluppare la funzione  $f(x) = e^x$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ .  
 ii) Disegnare e confrontare i grafici di  $f(x)$  e della somma della serie su tutto l'asse reale. iii) Utilizzare la relazione di Parseval per trovare il valore della somma  $S = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2+1}$ .

Determinare per quali valori di  $\alpha \in \mathbb{R}$  la seguente funzione  $f$  appartiene a  $L_1[0, \infty)$  e  $L_2[0, \infty)$ .

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{|x - \alpha + \frac{1}{3}| |x + 2|^\alpha}}.$$

R.  $L_1[0, \infty) : \alpha > 1/2; L_2[0, \infty) : 0 < \alpha < 1/3$

- i) Calcolare

$$I = \int_{-2}^2 \delta(\cos \pi x)(x^2 + 1)^{-1} dx.$$

- ii) Mostrare che, nel senso delle distribuzioni

$$g(x)\delta'(x) = g(0)\delta'(x) - g'(0)\delta(x). \quad (78)$$

R.  $I = \frac{96}{\pi 65}$

- i) Determinare sotto quale condizione sui numeri complessi  $a$  e  $b$  la matrice

$$U = \begin{pmatrix} a & \bar{b} \\ -b & \bar{a} \end{pmatrix} \quad (79)$$

è unitaria e, sotto questa condizione, ii) calcolarne autovalori e autovettori.  
 R. i)  $|a|^2 + |b|^2 = 1$ ; ii)  $\lambda_{\pm} = \operatorname{Re} a \pm \sqrt{1 - (\operatorname{Re} a)^2}$ ;  $v^{\pm} = (\bar{b}, i(\pm\sqrt{1 - (\operatorname{Re} a)^2} - \operatorname{Im} a))^T$

- i) Dare la definizione di dipendenza e indipendenza lineare di elementi di uno spazio vettoriale astratto e mostrare che le funzioni  $\{e^{-x^2}, xe^{-x^2}\}$  sono indipendenti. ii) Ortogonalizzare queste due funzioni in  $L_2[0, \infty)$ .

R. ii)  $\{e^{-x^2}, (x - \frac{1}{\sqrt{2\pi}})e^{-x^2}\}$

- i) Sviluppare la funzione  $x^2$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ . ii) Disegnare e confrontare i grafici di  $x^2$  e della somma della serie su tutto

l'asse reale. iii) Utilizzare la relazione di Parseval per trovare il valore della somma  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4}$ .

Determinare per quali valori di  $\alpha \in \mathbb{R}$  la funzione  $f(x) = |x^2 - 2\alpha x + 3\alpha|^{-\alpha}$  appartiene a  $L_1(\mathbb{R})$ .

R.  $1/2 < \alpha < 3$

i) Mostrare che, nel senso delle distribuzioni,  $H'(x - x_0) = \delta(x - x_0)$  e calcolare  $f'(x)$ , per  $f(x) = H(x - 1) \cos \pi x$ . ii) A cosa converge, in senso debole, il funzionale  $S_n$ , tale che  $S_n(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} \sin nx \varphi(x) dx$ , con funzioni di prova  $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$ ?

R. i)  $f'(x) = -\delta(x - 1) - \pi H(x - 1) \sin \pi x$

i) Determinare autovalori e autovettori della matrice

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (80)$$

ii) Usare questo risultato per calcolare  $\ln A$  (usare il ramo di  $\ln z$  tale che  $-\pi < \arg z \leq \pi$ ).

R. i)  $\lambda_{\pm} = e^{\pm i\pi/4}$ ,  $\underline{v}^{\pm} = 1/\sqrt{2}(1, \pm i)$  ii)  $\ln A = \frac{\pi}{4} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$ .

Dato l'operatore di traslazione  $\hat{T}$ :  $\hat{T}f(x) = f(x + 1)$ , sullo spazio delle funzioni continue, i) mostrare che è un operatore unitario in  $L_2[-\pi, \pi]$  e calcolarne la norma  $\|\cdot\|_2$ ; ii) determinare lo spettro di  $\hat{T}$  nello spazio delle funzioni continue e periodiche di  $L_2[-\pi, \pi]$ .

R. ii)  $\sigma_p = \{e^{in}\}_{n \in \mathbb{Z}}$  con autofunzioni  $\psi_n(x) = e^{inx}$

i) Sviluppare la funzione  $f(x) = x\theta(x)$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ . ii) Disegnare e confrontare i grafici di  $f(x)$  e della somma della serie su tutto  $\mathbb{R}$ , e dire se la serie converge uniformemente e assolutamente a  $xH(x)$  in  $[-\pi, \pi]$ . iii) Scrivere la relazione di Parseval.

Individuare, se esistono, i valori del parametro  $a \in \mathbb{R}$  per i quali la funzione  $f(x) = \frac{\sqrt{|x|}}{|x^2 - 1|^a}$  appartiene a  $L_1(\mathbb{R})$  e a  $L_2(\mathbb{R})$ .

R.  $L_1(\mathbb{R})$ :  $3/4 < a < 1$ ;  $f \notin L_2(\mathbb{R})$ ,  $\forall a \in \mathbb{R}$

a) Mostrare che, se  $f(x) \in L_1(\mathbb{R})$ , allora la sua trasformata di Fourier  $\hat{f}(k)$  è i) uniformemente limitata, e ii)  $\hat{f}(k) \rightarrow 0$  per  $k \rightarrow \pm\infty$ .

b) Mostrare che, se  $f^{(l)}(x) \in L_1(\mathbb{R})$ ,  $l = 0, 1, \dots, n$ , allora la trasformata di

Fourier di  $f(x)$  va a 0 per  $k \rightarrow \pm\infty$  più rapidamente di  $|k|^{-n}$ .

Data la matrice  $A = \begin{pmatrix} 0 & 1/2 \\ -2 & 0 \end{pmatrix}$ . i) Trovare autovalori ed autovettori di  $A$ . ii) Utilizzare questo risultato per calcolare la matrice  $\ln A$  (si scelga il ramo di  $\ln z$  tale che  $-\pi < \arg z \leq \pi$ ).

$$\text{R. } \lambda_{\pm} = \pm i, \underline{v}^{\pm} = (1, \pm 2i)^T, \ln A = \pi \begin{pmatrix} 0 & 1/4 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

i) Calcolare l'integrale  $I = \int_0^2 \delta(\sin 2x) \cos x dx$ . ii) Mostrare che  $(\ln |x|)' = P(1/x)$  nel senso delle distribuzioni.

$$\text{R. } I = 1/4$$

i) Sviluppate la funzione  $x^2 H(x)$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ . ii) Disegnare e confrontare i grafici di  $x^2 H(x)$  e della somma della serie su tutto l'asse reale. iii) Dire se la serie converge assolutamente e uniformemente in  $[-\pi, \pi]$ .

$$\text{R. } x^2 H(x) = \pi^2/6 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \cos nx + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} \sin nx - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin(2n+1)x}{(2n+1)^3}$$

Non c'è convergenza assoluta ed uniforme in  $[-\pi, \pi]$ .

Determinare per quali valori di  $a \in \mathbb{R}$  la funzione  $f(x) = |x^2 - 2ax + a|^{-a}$  appartiene a  $L_1(\mathbb{R})$  e a  $L_2(\mathbb{R})$ .

R. i)  $1/2 < a < 1$ , ii)  $1/4 < a < 1$

i) Calcolare  $I = \int_{-\pi/4}^1 \delta(\cos 2x) \sin x dx$ . ii) Mostrare che la successione di funzionali  $\hat{C}^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} \cos nx \varphi(x) dx$  converge a 0 in senso debole, con funzioni di prova  $\varphi \in L_1(\mathbb{R})$ .

$$\text{R. } I = \sqrt{2}/8.$$

i) Determinare autovalori e autovettori della matrice

$$A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (81)$$

ii) Usare questo risultato per calcolare  $\sin(-i \ln A)$ , usando il ramo  $-\pi < \arg z \leq \pi$  della funzione  $\ln z$ .

$$\text{R. } \lambda_{\pm} = e^{\pm i\pi/4}, \underline{v}_{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, \pm i)^T, \sin(-i \ln A) = \frac{i}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Data la funzione  $f(x) = \frac{\sqrt{|x|}}{|x^3 - 1|^{\alpha}}$ , determinare per quali valori di  $\alpha \in \mathbb{R}$

essa appartiene a  $L_1(0, \infty)$  e a  $L_2(0, \infty)$ .

R.  $L_1(\mathbb{R}^+) : 1/2 < \alpha < 1$ .  $L_2(\mathbb{R}^+) : 1/3 < \alpha < 1/2$

i) Sviluppare la funzione gradino di Heaviside  $H(x)$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ . ii) Disegnare e confrontare i grafici di  $H(x)$  e della somma della serie su tutto  $\mathbb{R}$ . iii) Usare la relazione di Parseval per trovare

la somma della serie numerica  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}$ .

i) Calcolare la derivata della funzione  $[x]$  (parte intera di  $x$ , con, ad esempio:  $[1/2] = 0$ ,  $[0] = 0$ ,  $[-1/2] = -1$ ). ii) Calcolare l'integrale  $I = \int_0^{\infty} \delta(\sin x) e^{-x} dx$ .

R. i)  $[x]' = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \delta(x - n)$ . ii)  $I = \frac{e^{\pi} + 1}{2(e^{\pi} - 1)}$

Si consideri la successione di funzionali  $F_n$ :  $F_n(\varphi) \equiv \int_{\mathbb{R}} f_n(x) \varphi(x) dx$ ,  $f_n(x) = \frac{n}{\pi(1+n^4x^4)}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ,  $x \in \mathbb{R}$ . Determinare i) a cosa converge  $f_n(x)$  puntualmente in  $\mathbb{R}$  e ii) a cosa converge  $F_n$  debolmente (si usi la formula  $\int_{\mathbb{R}} dx(1+x^4)^{-1} = \pi/\sqrt{2}$ ); iii) mostrare che  $F_n$  non converge fortemente, se la funzione di prova appartiene a  $L_1(\mathbb{R})$ .

R. i)  $f_n(x) \rightarrow 0$ ,  $x \neq 0$ ;  $f_n(x) \rightarrow \infty$ ,  $x = 0$ . ii)  $F_n(\varphi) \rightarrow \delta_0(\varphi)/\sqrt{2}$ .

Mostrare che i) le funzioni  $f_1 = e^{-x}$ ,  $f_2(x) = x^2 e^{-x}$  sono indipendenti in  $L_2(\mathbb{R}^+)$ , e ii) ortogonalizzarle.

R.  $g_1(x) = e^{-x}$ ,  $g_2(x) = (x^2 - 1/2)e^{-x}$

i) Sviluppare la funzione  $xH(-x)$  in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$  ( $H(x)$  è la funzione gradino di Heaviside). ii) Individuare gli eventuali punti di  $[-\pi, \pi]$  in cui la serie non converge puntualmente a  $xH(-x)$ , e indicare a cosa converge in tali punti; disegnare e confrontare i grafici di  $xH(-x)$  e della somma della serie su tutto  $\mathbb{R}$ .

R. i)  $xH(-x) \sim -\frac{\pi}{4} + \frac{2}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\cos(2k+1)x}{(2k+1)^2} + \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{k} \sin kx$ . ii) Non c'è convergenza puntuale in  $\pm\pi$

i) A cosa converge debolmente, al variare di  $a > 0$ , la successione di funzionali lineari  $F^{(n)}$ :  $F^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} f_n(x) \varphi(x) dx$ , con  $f_n(x) \equiv \frac{n^a e^{-n^2 x^2}}{\pi}$ ,  $n \in \mathbb{N}$

$\mathbb{N}$ ,  $a > 0$ ? ii) Calcolare l'integrale

$$\int_{\pi/2}^{\infty} \delta(\cos x) 2^{-x} dx \quad (82)$$

R.  $F^{(n)} \rightarrow 0$ ,  $0 < a < 1$ ;  $F^{(n)} \rightarrow \frac{1}{\sqrt{\pi}}\delta_0$ ,  $a = 1$ ;  $F^{(n)} \rightarrow \infty$ ,  $a > 1$

Mostrare che, se  $f(x) \in L_1(\mathbb{R})$ , allora la trasformata di Fourier  $\hat{f}(k)$  i) è uniformemente limitata, ii) è continua, e iii)  $\hat{f}(k) \rightarrow 0$  per  $k \rightarrow \pm\infty$ .

i) Sviluppare la funzione  $\text{sign}(x)$  ( $= 1$ ,  $x > 0$  e  $= -1$ ,  $x < 0$ ) in serie di Fourier nell'intervallo  $[-\pi, \pi]$ , e indicare se tale serie converge assolutamente e/o uniformemente in  $[-\pi, \pi]$ . ii) Individuare i punti di  $[-\pi, \pi]$  in cui la somma della serie non converge puntualmente a  $\text{sign}(x)$  in  $[-\pi, \pi]$ , e indicare a cosa converge in tali punti; disegnare e confrontare i grafici di  $\text{sign}(x)$  e della somma della serie su tutto  $\mathbb{R}$ . iii) Usare la relazione di Parseval per trovare la somma della serie numerica  $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2}$ .

Individuare, se esistono, i valori del parametro  $a \in \mathbb{R}$  per i quali la funzione  $f(x) = \frac{|x|^a}{|x^3-1|^a}$  appartiene a  $L_1(\mathbb{R})$  e a  $L_2(\mathbb{R})$ .

R.  $L_1(\mathbb{R})$ :  $1/2 < a < 1$ ;  $L_2(\mathbb{R})$ :  $1/4 < a < 1/2$

i) Calcolare, nel senso delle distribuzioni,  $(|x|)''$ ; ii) calcolare l'integrale

$$I = \int_{1/2}^{\infty} \delta(\cos \pi x) 4^{-x} dx$$

R.  $(|x|)'' = 2\delta(x)$ ;  $I = 5/(12\pi)$

i) Trovare autovalori ed autovettori della matrice  $A = \pi \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ . ii) Utilizzare questo risultato per calcolare la matrice  $\cos A$ .

R. i) autovalori:  $\pm\pi$ , autovett.  $(1/\sqrt{2})(1, \pm 1)$ ; ii)  $\cos A = -I$

Data la funzione  $f(t) = H(l^2 - t^2)e^{i\omega_0 t}$ ,  $l, \omega_0 > 0$ , i) calcolare la sua trasformata di Fourier  $\hat{f}(\omega)$  e graficarla; ii) calcolare e discutere il limite  $l \rightarrow \infty$  di  $\hat{f}(\omega)$ .

R.  $\hat{f}(\omega) = 2 \frac{\sin(\omega - \omega_0)l}{\omega - \omega_0} \rightarrow 2\pi\delta(\omega - \omega_0)$  per  $l \rightarrow \infty$

i) A cosa converge debolmente, al variare di  $c > 0$ , la successione di funzionali lineari  $\{F^{(n)}\}_1^\infty$ :  $F^{(n)}(\varphi) = \int_{\mathbb{R}} f_n(x)\varphi(x)dx$ , con  $f_n(x) \equiv n^c e^{-n^2 x^2}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ ?

ii) Calcolare l'integrale  $I = \int_0^\infty \delta(4^x \sin x) dx$ .

R. i) Per  $n \rightarrow \infty$ :  $F^{(n)} \rightarrow 0$  per  $0 < c < 1$ ;  $F^{(n)} \rightarrow \pi\delta_0$  per  $c = 1$ ;  $F^{(n)} \rightarrow \infty$  per  $c > 1$ .

Dare la definizione di dipendenza lineare di elementi di uno spazio vettoriale astratto e determinare per quale valore del parametro  $\alpha$  i tre polinomi  $\{\alpha - 2x, x(1 - x), 1 + x^2\}$  sono dipendenti.

ii) Mostrare che  $\{1, x, x^2\}$  è una base nello spazio dei polinomi di secondo grado nell'intervallo  $[-1, 1]$  e ortogonalizzarla.

R. i)  $\alpha = -2$ ; ii)  $\{1, x, x^2 - 1/3\}$

Determinare per quali valori di  $\alpha \in \mathbb{R}$  la seguente funzione  $f$  appartiene a  $L_1[0, \infty)$  e  $L_2[0, \infty)$ .

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{|x - \alpha + \frac{1}{3}|} |x + 2|^\alpha}.$$

R.  $L_1[0, \infty)$ :  $\alpha > 1/2$ ;  $L_2[0, \infty)$ :  $0 < \alpha < 1/3$

i) Calcolare

$$I = \int_{-2}^{3/2} \delta(\cos \pi x)(x^2 + 1)^{-1} dx.$$

ii) Determinare i valori delle costanti  $a$  e  $b$  tali che

$$g(x)\delta'(x) = a\delta'(x) + b\delta(x) \quad (83)$$

nel senso delle distribuzioni.

R. i)  $I = \frac{134}{65\pi}$ ; ii)  $a = g(0)$ ,  $b = -g'(0)$

Sia  $f(x) = |x^2 - a^2|^{-a} e^{-ax^2}$ . Trovare i valori di  $a \in \mathbb{R}$  per i quali i)  $f \in L_1(\mathbb{R})$ , e ii)  $f \in L_2(\mathbb{R})$ .

R. i)  $f \in L_1(\mathbb{R})$ :  $0 < a < 1$ ; ii)  $f \in L_2(\mathbb{R})$ :  $0 < a < 1/2$

Date le due serie di Fourier  $f(x) = \sum_{n=1}^\infty \frac{\sin nx}{n2^n}$  e  $g(x) = \sum_{n=1}^\infty \frac{(-1)^n}{3^n} \cos nx$ , con  $x \in [-\pi, \pi]$ , i) mostrare che le due serie convergono totalmente; ii) Calcolare, usando la formula di Parseval generalizzata, il prodotto scalare

$(f, g')$ .

R. i)  $|f| \leq \sum 2^{-n}/n < \infty$ ,  $|g| \leq \sum 3^{-n} < \infty$ , ii)  $(f, g') = \pi/7$

i) Data la funzione discontinua  $f(x) = x^2 H(-x) + \cos x H(x)$ ,  $x \in \mathbb{R}$ , dove  $H$  è la funzione gradino di Heaviside, i) calcolare  $f'(x)$ ,  $x \in \mathbb{R}$  con l'ausilio di note distribuzioni. ii) Calcolare l'integrale  $I = \int_0^{\infty} \delta(\sin \pi x) 2^{-x} dx$ .

R. i)  $f'(x) = 2xH(-x) - \sin x H(x) + \delta(x)$ ; ii)  $I = 3/(2\pi)$

i) Se  $\hat{f}(k)$  è la trasformata di Fourier di  $f(x) \in \mathcal{S}(\mathbb{R})$ , esprimere la trasformata di Fourier di  $f''(x)$  in funzione di  $\hat{f}(k)$ . ii) Usare il risultato della parte i) per calcolare la trasformata di Fourier di  $f''(x)$ , con  $f(x) = e^{-x^2}$ .

R. i)  $g(x) = f''(x)$ ,  $\hat{g}(k) = -k^2 \hat{f}(k)$ ; ii)  $\hat{g}(k) = -k^2 e^{-k^2/4}/\pi$

Calcolare la trasformata di Fourier della funzione  $f_\sigma(x) \equiv x \exp[-x^2/(2\sigma^2)]$ ,  $\sigma > 0$ , e commentare il risultato (si usi il fatto che la gaussiana  $h(x) \equiv \exp(-x^2/2)$  e' un'autofunzione della trasformata di Fourier  $F[h](p)$  con autovalore  $\sqrt{2\pi}$ ).

R.

$$-i\sqrt{2\pi}\sigma^3 k \exp(-\sigma^2 k^2/2). \quad (84)$$

Determinare la somma in  $[-\pi, \pi]$  (in senso puntuale) della serie di Fourier  $\sum_{n=1}^{\infty} 1/n \cos(nx)$ . Discutere anche la convergenza assoluta ed in norma  $L^2(-\pi, \pi)$ ;

R: Per sommare la serie di Fourier, si faccia la sostituzione  $z = \rho e^{ix}$ ,  $0 < \rho < 1$ , nella serie geometrica integrata ai due membri

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n} = -\log(1-z), \quad \log(1) = 0. \quad (85)$$

Prendendo la parte reale ai due membri e facendo il limite  $\rho \rightarrow 1^-$ , si ottiene infine

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(nx) = -\log \left| 2 \sin \frac{x}{2} \right| \quad (86)$$

in senso puntuale per  $x \neq 0$ . In base al teorema di isomorfismo tra  $L^2(-\pi, \pi)$  ed  $l^2$  (dimostrato a lezione), la serie sopra converge in norma  $L^2(-\pi, \pi)$  ad una funzione in questo stesso spazio. In quanto alla convergenza assoluta infine, si prenda  $x = 2\pi r/N$  con  $N = 1, 2, 3, \dots$  e  $0 \leq r \leq N$ . Restringendo

quindi la somma ad  $n = Nl$ , con  $l = 1, 2, 3, \dots$ , si ottiene:

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} |\cos(nx)| \geq \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{\infty} \frac{1}{l} |\cos(2\pi rl)| = \infty. \quad (87)$$

Poiche' gli  $x$  della forma sopra sono densi in  $[0, 2\pi]$ , ne segue che la serie di Fourier e' ovunque assolutamente divergente;

Calcolare  $I = \int_a^{\infty} dx \theta(x - b) d\varphi(x)/dx$ , dove  $\theta$  e' la funzione a gradino di Heaviside,  $a$  e  $b$  costanti reali e  $\varphi(x)$  una funzione in un opportuno spazio di prova;

R: Per  $a \leq b$  si puo' estendere l'integrale a tutto l'asse reale senza alterarne il valore. Usando quindi la definizione di derivata di una distribuzione assieme a  $d/dx \theta(x - b) = \delta(x - b)$ , si ottiene

$$I = -\varphi(b). \quad (88)$$

Per  $b < a$ , la  $\theta$  vale identicamente uno in tutto il dominio di integrazione, di modo che

$$I = \int_a^{\infty} \frac{d\varphi(x)}{dx} dx = -\varphi(a), \quad (89)$$

in quanto le funzioni di prova sono nulle all'infinito;

Calcolare i coefficienti della serie di Fourier della funzione  $f(x) \equiv |x|^3$ ,  $-\pi < x \leq \pi$  e commentare il risultato.

R: per parita'  $b_n = 0$  per ogni  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Rimane quindi da calcolare:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \operatorname{Re} \left[ \int_0^{\pi} x^3 e^{inx} dx \right] \quad (90)$$

per  $n = 0, 1, 2, \dots$ . Per  $n = 0$  si ottiene direttamente:

$$a_0 = \frac{\pi^3}{2}. \quad (91)$$

Per  $n \neq 0$ , ponendo

$$u = x^3, \quad v = e^{\lambda x} \quad \text{con } \lambda \equiv in \quad (92)$$

( $\lambda =$  immaginario puro), ed usando la regola di Leibniz per le derivate dei prodotti,

$$wv''' = (u''v + uv'' - u'v')' - u'''v, \quad (93)$$



si ottiene:

$$a_n = 6\pi \frac{(-1)^n}{n^2} + \frac{12}{\pi n^4} [1 + (-1)^{n+1}]. \quad (94)$$

Come funzione periodica, la  $f$  e' continua, con derivata prima discontinua in  $x = \pm\pi$  (e con discontinuita' della derivata terza in  $x = 0$ ); di conseguenza i coefficienti di Fourier decadono asintoticamente come  $1/n^2$ ;

Calcolare la trasformata di Fourier della funzione  $f(x) \equiv x \exp(-\delta x^2)$ ,  $\delta > 0$ , e commentare il risultato;

R: ponendo

$$x = \frac{y}{\sqrt{2\delta}} \quad (95)$$

si ottiene la trasformata di Fourier della derivata della distribuzione gaussiana con  $\sigma = 1$  (autofunzione della trasformata di Fourier con autovalore  $\lambda = -i\sqrt{2\pi}$ ) nella variabile coniugata

$$\frac{k}{\sqrt{2\delta}}, \quad (96)$$

ovvero:

$$F[f](k) = -i \frac{\sqrt{\pi}}{2\delta^{3/2}} k e^{-k^2/(4\delta)}. \quad (97)$$

Quanto piu' la  $f$  e' piccata (attorno ad  $x = 0$ ) tanto piu' la trasformata di Fourier e' "estesa" (attorno a  $k = 0$ ) e viceversa;

Calcolare la derivata seconda  $F'' \equiv (F')'$  della distribuzione rappresentata dalla funzione  $F(x) \equiv H(x) \cos(x)$ , dove  $H(x) \equiv 1$  per  $x > 0$  e zero altrimenti e' la funzione di Heaviside.

R: per definizione

$$\langle F'', \varphi \rangle \equiv \langle F, \varphi'' \rangle = \int_0^\infty \cos(x) \varphi''(x) dx = -\varphi'(0) - \int_{-\infty}^\infty H(x) \cos(x) \varphi(x) dx, \quad (98)$$

dove si e' integrato per parti due volte per rimuovere la derivata seconda dalla funzione di prova  $\varphi(x) \in \mathcal{D}(\mathcal{R})$ . Essendo  $\varphi$  generica, si ricava che

$$F''(x) = \delta'(x) - H(x) \cos(x). \quad (99)$$

Si consideri l'operatore lineare  $T : X \rightarrow l^2$ , definito da  $(Tx)_n \equiv nx_n$ ,  $n \geq 1$ , dove  $X$  e' il piu' grande sottospazio vettoriale di  $l^2$  (le successioni a quadrato

sommabile) sul quale  $T$  e' definito. Caratterizzare  $X$  e dimostrare che  $T$  e' non limitato.

R: I vettori  $x$  di  $l^2$  per i quali  $T$  e' definito soddisfano la condizione

$$\|Tx\|^2 = \sum_{n=1}^{\infty} n^2 x_n^2 < \infty. \quad (100)$$

L'insieme  $X$  di tali vettori  $x$  forma uno spazio vettoriale in quanto:

se  $x \in X$ , allora  $\lambda x \in X$  per ogni  $\lambda$  reale (proprietà di cono), poiché la serie a secondo membro dell'equazione sopra rimane finita se si moltiplica ogni  $x_n$  per  $\lambda$ ; Calcolare la trasformata di Fourier della funzione  $f(x) \equiv x \exp(-\delta x^2)$ ,  $\delta > 0$ , e commentare il risultato;

R: ponendo

$$x = \frac{y}{\sqrt{2\delta}} \quad (101)$$

si ottiene la trasformata di Fourier della derivata della distribuzione gaussiana con  $\sigma = 1$  (autofunzione della trasformata di Fourier con autovalore  $\lambda = -i\sqrt{2\pi}$ ) nella variabile coniugata

$$\frac{k}{\sqrt{2\delta}}, \quad (102)$$

ovvero:

$$F[f](k) = -i \frac{\sqrt{\pi}}{2\delta^{3/2}} k e^{-k^2/(4\delta)}. \quad (103)$$

Quanto più la  $f$  e' piccata (attorno ad  $x = 0$ ) tanto più la trasformata di Fourier e' "estesa" (attorno a  $k = 0$ ) e viceversa;

Calcolare la derivata seconda  $F'' \equiv (F')'$  della distribuzione rappresentata dalla funzione  $F(x) \equiv H(x) \cos(x)$ , dove  $H(x) \equiv 1$  per  $x > 0$  e zero altrimenti e' la funzione di Heaviside.

R: per definizione

$$\langle F'', \varphi \rangle \equiv \langle F, \varphi'' \rangle = \int_0^{\infty} \cos(x) \varphi''(x) dx = -\varphi'(0) - \int_{-\infty}^{\infty} H(x) \cos(x) \varphi(x) dx, \quad (104)$$

dove si e' integrato per parti due volte per rimuovere la derivata seconda dalla funzione di prova  $\varphi(x) \in \mathcal{D}(\mathcal{R})$ . Essendo  $\varphi$  generica, si ricava che

$$F''(x) = \delta'(x) - H(x) \cos(x). \quad (105)$$

Calcolare i coefficienti della serie di Fourier (nella base reale o complessa) della funzione  $f(x) \equiv |\sin(x)|$ ,  $-\pi < x \leq \pi$ , e commentare il risultato.

R: Poiche' la funzione  $f(x)$  e' pari, nella base trigonometrica compaiono soltanto la costante ed i coseni. Calcolando gli integrali, si ottiene per  $n = 0, 1, 2, \dots$ :

$$a_n \equiv \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |\sin(x)| \cos(nx) dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin(x) \cos(nx) dx = \frac{4}{\pi(1-n^2)} \quad (106)$$

per  $n$  pari e zero altrimenti. Poiche' la  $f$  e' continua ma non possiede derivata prima continua in  $x = 0, \pm\pi$  (questi due ultimi punti coincidono), i coefficienti decadono asintoticamente come  $1/n^2$ . base reale o complessa) della funzione  $f(x) \equiv |\sin(x)|$ ,  $-\pi < x \leq \pi$ , e commentare il risultato.

R: Poiche' la funzione  $f(x)$  e' pari, nella base trigonometrica compaiono soltanto la costante ed i coseni. Calcolando gli integrali, si ottiene per  $n = 0, 1, 2, \dots$ :

$$a_n \equiv \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |\sin(x)| \cos(nx) dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin(x) \cos(nx) dx = \frac{4}{\pi(1-n^2)} \quad (107)$$

per  $n$  pari e zero altrimenti. Poiche' la  $f$  e' continua ma non possiede derivata prima continua in  $x = 0, \pm\pi$  (questi due ultimi punti coincidono), i coefficienti decadono asintoticamente come  $1/n^2$ .

Calcolare la trasformata di Fourier della funzione  $f(x) \equiv x^2 \exp(-x^2/2)$  e commentare il risultato.

R: Ricordando che la funzione  $f(x) \equiv \exp(-x^2/2)$  e' un'autofunzione della trasformata di Fourier  $F$ ,

$$F[f](k) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ikx} dx, \quad (108)$$

con autovalore  $\sqrt{2\pi}$ , derivando ai due membri due volte rispetto a  $k$ , si ottiene immediatamente:

$$F[f](k) = \sqrt{2\pi} (1 - k^2) \exp(-k^2/2). \quad (109)$$

Poiche' la  $f$  appartiene alla classe di Schwartz, anche la sua trasformata di Fourier vi appartiene. [8] Calcolare la trasformata di Fourier della funzione  $f(x) \equiv x^2 \exp(-x^2/2)$  e commentare il risultato.

R: Ricordando che la funzione  $f(x) \equiv \exp(-x^2/2)$  e' un'autofunzione della trasformata di Fourier  $F$ ,

$$F[f](k) \equiv \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ikx} dx, \quad (110)$$

con autovalore  $\sqrt{2\pi}$ , derivando ai due membri due volte rispetto a  $k$ , si ottiene immediatamente:

$$F[f](k) = \sqrt{2\pi} (1 - k^2) \exp(-k^2/2). \quad (111)$$

Poiche' la  $f$  appartiene alla classe di Schwartz, anche la sua trasformata di Fourier vi appartiene.

Calcolare la derivata seconda della distribuzione rappresentata dalla funzione  $F(x) = \text{sign}(x)x$ .

R: Tenendo conto che, ad esempio,  $\text{sign}(x) = 2\theta(x) - 1$ , dove  $\theta(x) = 1$  per  $x > 0$  e zero altrimenti e' la funzione gradino di Heaviside, ed usando la regola di derivazione generalizzata per il prodotto di una distribuzione con una funzione infinitamente differenziabile, si ottiene immediatamente:

$$F''(x) = 2\delta(x), \quad (112)$$

dove  $\delta(x)$  e' la delta di Dirac centrata in zero.