

Analisi 3

Appunti di Analisi 3 del corso di Giovanni Alberti e Maria Stella Gelli

Arianna Carelli e Antonio De Lucreziis

I Semestre 2021/2021

Indice

1	Teoria della misura	4
1.1	Misure astratte	4
1.2	Esempi di misure	5
1.3	Funzioni misurabili	6
1.3.1	Funzioni semplici	6
1.4	Integrale	6
1.5	Teoremi di convergenza	8
1.5.1	Fubini-Tonelli	9
2	Spazi L^p e convoluzione	11
2.1	Disuguaglianze	11
2.1.1	Disuguaglianza di Jensen	11
2.1.2	Disuguaglianza di Young	13
2.1.3	Disuguaglianza di Hölder	13
2.1.4	Disuguaglianza di Minkowski	14
2.2	Esercitazione del 4 ottobre	15
2.2.1	Esercizi di teoria della misura	15
2.2.2	Funzioni misurabili rispetto alla misura di Lebesgue	16
2.2.3	Formula di cambio di variabile applicata a funzioni radiali	18
2.3	Costruzione spazi L^p	20
2.3.1	Prodotto scalare su L^2	21
2.4	Completezza degli spazi L^p	22
2.5	Nozioni di convergenza per successioni di funzioni	25
2.6	Controesempi sulle convergenze	28
2.7	Approssimazioni di funzioni in L^p	28
2.8	Esercitazione del 13 ottobre	30
2.8.1	Esercizi su spazi $L^p(X)$ al variare di p e dello spazio X	30
2.8.2	Spazi ℓ^p	34
2.9	Complementi su approssimazioni di funzioni in L^p	34

2.10	Appendice	36
2.11	Convoluzione	38
2.12	Esercitazione del 21 ottobre	42
2.12.1	Convoluzione	45
2.12.2	Separabilità degli spazi L^p	46
2.13	Rimanenze dalla lezione precedente	47
2.14	Derivata e Convoluzione	48
2.15	Approssimazione per convoluzione	49
3	Spazi di Hilbert	52
3.1	Esercitazione del 3 Novembre 2021	57
3.1.1	Basi Hilbertiane e proiezioni	57
3.1.2	Approssimazioni per convoluzione	59
3.2	Esempi di basi Hilbertiane	60
3.2.1	Polinomi	60
3.2.2	Base di Haar	60
3.3	Spazi di Hilbert complessi	61
4	Serie di Fourier	62
4.1	Regolarità di f e dei coefficienti	65
4.2	Convergenza puntuale della serie di Fourier	67
4.3	Esercitazione del 11 novembre	70
5	Applicazioni della serie di Fourier	74
5.1	Equazione del calore	74
5.2	Risoluzione dell'equazione del calore (su \mathbb{S}^1)	75
5.2.1	Risoluzione formale	75
5.3	Equazione delle onde	78
5.4	Risoluzione dell'equazione delle onde	79
5.4.1	Risoluzione formale	79
5.5	Esercitazione del 18 Novembre 2021	80
5.5.1	Esercizi preliminari	80
5.6	Risoluzione dell'equazione delle onde	83
5.7	Altre applicazioni della serie di Fourier	84
5.7.1	Disuguaglianza isoperimetrica	84
5.8	Appendice	85
5.8.1	Considerazioni finali su SdF e serie in seni	88
5.9	Esercitazione del 25 Novembre 2021	89

6	Trasformata di Fourier	92
6.1	Proprietà della trasformata di Fourier	93
6.2	Trasformata di Fourier su L^2	97
6.2.1	Proprietà della trasformata di Fourier in L^2	99
6.3	Conclusione sulla TdF	101
6.4	Applicazioni TdF	102
6.5	Esercitazione del 2 dicembre	103
6.6	Esercitazione del 13 Dicembre 2021	105
6.6.1	Operatori autoaggiunti	105
6.6.2	Calcolo Trasformate di Fourier	107
7	Integrazione di superfici	110
7.1	Superfici	110
7.2	Misure su superfici	111
7.3	Superfici k -dimensionali in \mathbb{R}^d di classe C^1	112
7.4	k -covettori	115
7.5	Integrazione di k -forme su superfici	115

Capitolo 1

Teoria della misura

1.1 Misure astratte

Definizione. Uno spazio misurabile è una terna (X, \mathcal{A}, μ) tale che

- X è un insieme qualunque.
- \mathcal{A} è una σ -algebra di sottoinsiemi di X (chiamata σ -algebra dei misurabili) ovvero una famiglia di sottoinsiemi di X che rispetta le seguenti proprietà:
 - $\emptyset, X \in \mathcal{A}$.
 - \mathcal{A} è chiusa per complementare, unione e intersezione numerabile.
- μ è una misura su X , ossia una funzione $\mu: \mathcal{A} \rightarrow [0, +\infty]$ σ -addittiva, cioè tale che data una famiglia numerabile $\{E_k\} \subset \mathcal{A}$ disgiunta e posto $E := \bigcup E_n$, allora

$$\mu(E) = \sum_n \mu(E_n).$$

Notazione. Data una successione crescente di insiemi $E_1 \subset E_2 \subset \dots \subset E_n \subset \dots$ con $\bigcup E_n = E$, scriviamo $E_n \uparrow E$.

Proprietà.

- $\mu(\emptyset) = 0$
- *Monotonia:* Dati $E, E' \in \mathcal{A}$ e $E \subset E'$, allora $\mu(E) \leq \mu(E')$.
- Data $E_n \uparrow E$, vale $\mu(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(E_n) = \sup_n \mu(E_n)$.
- Se $E_n \downarrow E$ e $\mu(E_{\bar{n}}) < +\infty$ per qualche \bar{n} , allora $\mu(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(E_n) = \inf_n \mu(E_n)$.
- *Subadditività:* Se $E \subset \bigcup E_n$, allora $\mu(E) \leq \sum_n \mu(E_n)$.

Osservazione. Dato $X' \in \mathcal{A}$ si possono restringere \mathcal{A} e μ a X' nel modo ovvio.

Definizioni.

- μ si dice **completa** se $F \subset E, E \in \mathcal{A}$ e $\mu(E) = 0$, allora $F \in \mathcal{A}$ (e di conseguenza $\mu(F) = 0$).

- μ si dice **finita** se $\mu(X) < +\infty$.
- μ si dice **σ -finita** se esiste una successione $\{E_n\}$ con $E_n \subset E_{n+1}$ tale che $\bigcup E_n = X$ con $\mu(E_n) < +\infty$ per ogni n .

Notazione. Sia $P(X)$ un predicato che dipende da $x \in X$ allora si dice che $P(X)$ **vale μ -quasi ogni** $x \in X$ se l'insieme $\{x \mid P(x) \text{ è falso}\}$ è (contenuto in) un insieme di misura μ nulla.

D'ora in poi consideriamo solo misure complete.

1.2 Esempi di misure

- **Misura che conta i punti.**

$$X \text{ insieme} \quad \mathcal{A} := \mathcal{P}(X) \quad \mu(E) := \#E \in \mathbb{N} \cup \{+\infty\}$$

- **Delta di Dirac in x_0 .**

$$X \text{ insieme, } x_0 \in X \text{ fissato} \quad \mathcal{A} := \mathcal{P}(X) \quad \mu(E) := \delta_{x_0}(E) = \mathbb{1}_E(x_0)$$

- **Misura di Lebesgue.**

$$X = \mathbb{R}^n \quad \mathcal{M}^n \text{ } \sigma\text{-algebra dei misurabili secondo Lebesgue} \quad \mathcal{L}^n \text{ misura di Lebesgue}$$

Dato R parallelepipedo in \mathbb{R}^n , cioè $R = \prod_{k=1}^n I_k$ con I_k intervalli in \mathbb{R} . Si pone

$$\text{vol}_n(R) := \prod_{k=1}^n \text{lung}(I_k)$$

per ogni $E \subset \mathbb{R}^n$ (assumendo $\text{lung}([a, b]) = b - a$). Infine poniamo

$$\mathcal{L}^n(E) := \inf \left\{ \sum_i \text{vol}_n(R_i) \mid \{R_i\} \text{ tale che } E \subset \bigcup_i R_i \right\}.$$

Osservazioni.

- $\mathcal{L}^n(R) = \text{vol}_n(R)$.
- \mathcal{L}^n non è σ -addittiva su $\mathcal{P}(\mathbb{R}^n)$.

Il secondo punto giustifica l'introduzione della σ -algebra dei **misurabili secondo Lebesgue** che denotiamo con \mathcal{M}^n .

Dato $E \subset \mathbb{R}^n$ si dice che E è misurabile (secondo Lebesgue) se

$$\forall \varepsilon > 0 \exists A \text{ aperto e } C \text{ chiuso, tali che } C \subset E \subset A \text{ e } \mathcal{L}^n(A \setminus C) \leq \varepsilon.$$

Osservazioni.

- Per ogni E misurabile vale

$$\mathcal{L}^n(E) = \inf \{ \mathcal{L}^n(A) : A \text{ aperto, } A \supset E \} = \sup \{ \mathcal{L}^n(K) : K \text{ compatto, } K \subset E \}.$$

- Notiamo che se $F \subset E$ con $E \subset \mathcal{M}^n$ e $\mathcal{L}^n(E) = 0$, allora $F \in \mathcal{M}^n$. Ovvero la misura di Lebesgue è completa!

Notazione. $|E| := \mathcal{L}^n(E)$

1.3 Funzioni misurabili

Definizione. Dato (X, \mathcal{A}, μ) e $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ (o al posto di \mathbb{R} in Y spazio topologico), diciamo che f è **misurabile** (più precisamente \mathcal{A} -misurabile), se

$$\forall A \text{ aperto } f^{-1}(A) \in \mathcal{A}$$

Osservazioni.

- Dato $E \subset X$, vale $E \in \mathcal{A}$ se solo se $\mathbb{1}_E$ è misurabile.
- La classe delle funzioni misurabili è chiusa rispetto a molte operazioni
 - *Somma, prodotto* (se hanno senso nello spazio immagine della funzione).
 - *Composizione con funzione continua*: Se $f: X \rightarrow Y$ continua e $g: Y \rightarrow Y'$ continua, allora $g \circ f$ è misurabile.
 - *Convergenza puntuale*: data una successione di f_n misurabili e $f_n \rightarrow f$ puntualmente, allora f è misurabile.
 - \liminf e \limsup (almeno nel caso $Y = \mathbb{R}$).

1.3.1 Funzioni semplici

Definizione. Definiamo la classe delle **funzione semplici** come

$$\mathcal{S} := \left\{ f: X \rightarrow \mathbb{R} \mid f = \sum_i \alpha_i \mathbb{1}_{E_i} \text{ con } E_i \text{ misurabili e } \{\alpha_i\} \text{ finito} \right\}$$

Osservazione. La rappresentazione di una funzione semplice come combinazione lineare di indicatori di insiemi *non è unica*, però se necessario possiamo prendere gli E_i disgiunti.

1.4 Integrale

Definizione. Diamo la definizione di $\int_X f \, d\mu$ per passi

- i) Se $f \in \mathcal{S}$ e $f \geq 0$ cioè $f = \sum_i \alpha_i \mathbb{1}_{E_i}$ con $\alpha_i \geq 0$ allora poniamo

$$\int_X f \, d\mu := \sum_i \alpha_i \mu(E_i),$$

convenendo che $0 \cdot +\infty = 0$ in quanto la misura di un insieme non è necessariamente finita.

- ii) Se $f: X \rightarrow [0, +\infty]$ misurabile si pone

$$\int_X f \, d\mu := \sup_{\substack{g \in \mathcal{S} \\ 0 \leq g \leq f}} \int_X g \, d\mu.$$

iii) $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ misurabile si dice **integrabile** se

$$\int_X f^+ d\mu < +\infty \quad \text{oppure} \quad \int_X f^- d\mu < +\infty.$$

e per tali f si pone

$$\int_X f d\mu := \int_X f^+ d\mu - \int_X f^- d\mu.$$

iv) $f: X \rightarrow \mathbb{R}^n$ si dice **sommabile** (o di **classe** \mathcal{L}^1) se $\int_X |f| d\mu < +\infty$. In tal caso, se $\int_X f_i^\pm d\mu < +\infty$ per ogni f_i componente di f , allora $\int_X f d\mu$ esiste ed è finito.

Per tali f si pone

$$\int_X f d\mu := \left(\int_X f_1 d\mu, \dots, \int_X f_n d\mu \right).$$

Notazione. Scriveremo spesso $\int_E f(x) dx$ invece di $\int_E f d\mathcal{L}^n$.

Osservazioni.

- L'integrale è lineare (sulle funzioni sommabili).
- I passaggi i) e ii) danno lo stesso risultato per f semplice ≥ 0 .
- La definizione in ii) ha senso per ogni $f: X \rightarrow [0, +\infty]$ anche non misurabile. Ma in generale vale solo che

$$\int_X f_1 + f_2 d\mu \geq \int_X f_1 d\mu + \int_X f_2 d\mu.$$

- Dato $E \in \mathcal{A}$, f misurabile su E , notiamo che vale l'uguaglianza

$$\int_E f d\mu := \int_X f \cdot \mathbb{1}_E d\mu.$$

- Si può definire l'integrale anche per $f: X \rightarrow Y$ con Y spazio vettoriale normato finito dimensionale¹ ed f sommabile.
- Se $f_1 = f_2$ μ -q.o. allora $\int_X f_1 d\mu = \int_X f_2 d\mu$.
- Si definisce $\int_X f d\mu$ anche se f è misurabile e definita su $X \setminus N$ con $\mu(N) = 0$.
- Se $f: [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è integrabile secondo Riemann allora è misurabile secondo Lebesgue e le due nozioni di integrale coincidono.

Nota. Lo stesso vale per integrali impropri di funzioni positive. Ma nel caso più generale non vale: se consideriamo la funzione

$$f: (0, +\infty) \rightarrow \mathbb{R} \quad f(x) := \frac{\sin x}{x}$$

allora l'integrale di f definito su $(0, +\infty)$ esiste come integrale improprio ma non secondo Lebesgue, infatti

$$\int_0^{+\infty} f^+ dx = \int_0^{+\infty} f^- dx = +\infty$$

¹È necessario avere uno spazio vettoriale, perché serve la linearità e la moltiplicazione per scalare

- $\int_X f \, d\delta_{x_0} = f(x_0)$
- Se $X = \mathbb{N}$ e μ è la misura che conta i punti l'integrale è

$$\int_X f \, d\mu = \sum_{n=0}^{\infty} f(n)$$

per le f positive o tali che $\sum f^+(n) < +\infty$ oppure $\sum f^-(n) < +\infty$.

Nota. Come prima nel caso di funzioni non sempre positive ci sono casi in cui la serie solita non è definita come integrale di una misura, ad esempio

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n}$$

esiste come serie ma non come integrale.

- Dato X qualunque, μ misura che conta i punti e $f: X \rightarrow [0, +\infty]$ possiamo definire la somma di tutti i valori di f

$$\sum_{x \in X} f(x) := \int_X f \, d\mu.$$

1.5 Teoremi di convergenza

Sia (X, \mathcal{A}, μ) come in precedenza.

Teorema (di convergenza monotona o Beppo-Levi). Date $f_n: X \rightarrow [0, +\infty]$ misurabili, tali che $f_n \uparrow f$ ovunque in X , allora¹

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n \, d\mu = \int_X f \, d\mu$$

ed in particolare il termine a sinistra è crescente quindi è proprio un sup ovvero $\lim_{n \rightarrow +\infty} \int_X f_n \, d\mu = \sup_n \int_X f_n \, d\mu$.

Teorema (lemma di Fatou). Date $f_n: X \rightarrow [0, +\infty]$ misurabili, allora

$$\liminf_{n \rightarrow +\infty} \int_X f \, d\mu \geq \int_X \left(\liminf_{n \rightarrow +\infty} f_n \right) \, d\mu.$$

Teorema (di convergenza dominata o di Lebesgue). Date $f_n: X \rightarrow \mathbb{R}$ (o anche \mathbb{R}^n) misurabili con le seguenti proprietà

- *Convergenza puntuale:* $f_n(x) \rightarrow f(x)$ per ogni $x \in X$.
- *Dominazione:* Esiste $g: X \rightarrow [0, +\infty]$ sommabile tale che $|f_n(x)| \leq g(x)$ per ogni $x \in X$ e per ogni $n \in \mathbb{N}$.

allora

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_X f_n \, d\mu = \int_X f \, d\mu.$$

¹Mnemonica: $\sup_n \int_X f_n \, d\mu = \int_X \sup_n f_n \, d\mu$

Nota. La seconda proprietà è essenziale; sostituirla con $\int_X |f_n| d\mu \leq C < +\infty$ non basta!

Definizione. Data una *densità* $\rho: \mathbb{R}^n \rightarrow [0, +\infty]$ misurabile, la **misura μ con densità ρ** è data da

$$\forall E \in \mathcal{A} \quad \mu(E) := \int_E \rho dx$$

Osservazioni.

- \mathbb{R}^n e \mathcal{L}^n possono essere sostituiti da X e $\tilde{\mu}$.
- il fatto che μ è una misura segue da Beppo Levi, in particolare serve per mostrare la subadditività.

Teorema (di cambio di variabile). Siano Ω e Ω' aperti di \mathbb{R}^n , $\Phi: \Omega \rightarrow \Omega'$ un diffeomorfismo¹ di classe C^1 e $f: \Omega' \rightarrow [0, +\infty]$ misurabile. Allora

$$\int_{\Omega'} f(x') dx' = \int_{\Omega} f(\Phi(x)) |\det(\nabla \Phi(x))| dx.$$

La stessa formula vale per f a valori in $\overline{\mathbb{R}}$ integrabile e per f a valori in \mathbb{R}^n sommabile.

Osservazioni.

- Se $n = 1$, $|\det(\nabla \Phi(x))| = |\Phi'(x)|$ e non $\Phi'(x)$ come nella formula vista ad Analisi 1 (l'informazione del segno viene data dall'inversione degli estremi).
- Indebolire le ipotesi su Φ è delicato. Basta Φ di classe C^1 e $\forall x' \in \Omega' \# \Phi^{-1}(x') = 1$ (supponendo Φ iniettiva la proprietà precedente segue immediatamente). Se Φ non è "quasi" iniettiva bisogna correggere la formula per tenere conto della molteplicità.
- Quest'ultima osservazione serve giusto per far funzionare il cambio in coordinate polari che non è iniettivo solo nell'origine.

1.5.1 Fubini-Tonelli

Di seguito riportiamo il teorema di Fubini-Tonelli per la misura di Lebesgue.

Teorema (di Fubini-Tonelli). Sia $\mathbb{R}^{n_1} \times \mathbb{R}^{n_2} \simeq \mathbb{R}^n$ con $n = n_1 + n_2$, $E := E_1 \times E_2$ dove E_1, E_2 sono misurabili e f è una funzione misurabile definita su E . Se f ha valori in $[0, +\infty]$ allora

$$\int_E f d\mu = \int_{E_2} \int_{E_1} f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 = \int_{E_1} \int_{E_2} f(x_1, x_2) dx_2 dx_1$$

Vale lo stesso per f a valori in \mathbb{R} o in \mathbb{R}^n sommabile.

Osservazioni. Possiamo generalizzare il teorema di Fubini-Tonelli a misure generiche ed ottenere alcuni risultati utili che useremo ogni tanto.

- Se X_1, X_2 sono spazi con misure μ_1, μ_2 (con opportune ipotesi) vale:

$$\int_{E_2} \int_{E_1} f(x_1, x_2) d\mu_1(x_1) d\mu_2(x_2) = \int_{E_1} \int_{E_2} f(x_1, x_2) d\mu_2(x_2) d\mu_1(x_1).$$

¹funzione differenziabile con inversa differenziabile.

se $f \geq 0$ oppure $\int_{X_1} \int_{X_2} |f| \, d\mu_2(x_2) \, d\mu_1(x_1) < +\infty$.

- **Teorema** (di scambio serie-integrale). Se $X_1 \subset \mathbb{R}$ (oppure $X_1 \subset \mathbb{R}^n$), $\mu_1 = \mathcal{L}^n$ e $X_2 = \mathbb{N}$, μ_2 è la misura che conta i punti, allora la formula sopra diventa

$$\sum_{n=0}^{\infty} \int_{X_1} f_n(x) \, dx = \int_{X_1} \sum_{n=0}^{\infty} f_n(x) \, dx.$$

se $f_i \geq 0$ oppure $\sum_i \int_{X_1} |f_i(x)| \, dx < +\infty$.

- **Teorema** (di scambio di serie). Se $X_1 = X_2 = \mathbb{N}$ e $\mu_1 = \mu_2$ è la misura che conta i punti la formula sopra diventa

$$\sum_{j=0}^{\infty} \sum_{i=0}^{\infty} a_{i,j} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} a_{i,j}$$

se $a_{i,j} \geq 0$ oppure $\sum_i \sum_j |a_{i,j}| < +\infty$.

Capitolo 2

Spazi L^p e convoluzione

2.1 Disuguaglianze

2.1.1 Disuguaglianza di Jensen

Ricordiamo che una funzione $f: \mathbb{R}^d \rightarrow [-\infty, +\infty]$ è **convessa** se e solo se dati $x_1, \dots, x_n \in \mathbb{R}^d$ e $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in [0, 1]$ con $\sum_i \lambda_i = 1$ abbiamo che

$$f\left(\sum_i \lambda_i x_i\right) \leq \sum_i \lambda_i f(x_i)$$

Teorema (Jensen). Dato (X, \mathcal{A}, μ) con $\mu(X) = 1$ e $f: \mathbb{R}^d \rightarrow [-\infty, +\infty]$ convessa e semi-continua inferiormente (S.C.I.) e $u: X \rightarrow \mathbb{R}^d$ sommabile allora vale

$$f\left(\int_X u \, d\mu\right) \leq \int_X f \circ u \, d\mu$$

e $f \circ u$ è integrabile.

Osservazioni.

- $(f \circ u)^-$ ha integrale finito.
- Interpretando μ come probabilità si riscrive come $\mathbb{E}[f \circ \mu] \geq f(\mathbb{E}[u])$.
- Se u è una funzione semplice, cioè $u = \sum_i y_i \cdot \mathbb{1}_{E_i}$ con E_i disgiunti e $\bigcup E_i = X$ allora posti $\lambda_i = \mu(E_i)$ abbiamo

$$\int_X f \circ u \, d\mu = \int_X \sum_i f(y_i) \cdot \mathbb{1}_{E_i} \, d\mu = \sum_i \lambda_i f(y_i) \geq f\left(\sum_i \lambda_i y_i\right) = f\left(\int_X u \, d\mu\right)$$

Questo ci darebbe una strada per dimostrare in generale per passi il teorema di Jensen ma in realtà si presentano vari problemi tecnici.

- Ogni funzione convessa e S.C.I. su Ω convesso in \mathbb{R}^d si estende a $\tilde{f}: \mathbb{R} \rightarrow (-\infty, +\infty]$ convessa e S.C.I., ad esempio se $\Omega = (0, +\infty)$

$$f(y) = \frac{1}{y} \quad \rightsquigarrow \quad \tilde{f}(y) = \begin{cases} +\infty & y \leq 0 \\ \frac{1}{y} & y > 0 \end{cases}$$

- La semi-continuità inferiore serve perché le funzioni convesse sono continue solo se a valori in \mathbb{R} , ad esempio per k costante la funzione

$$f(y) := \begin{cases} k & y < 0 \\ +\infty & y \geq 0 \end{cases}$$

è convessa ma non semi-continua inferiormente (e neanche continua).

Dimostrazione. Poniamo $y_0 := \int_X u \, d\mu$, allora la tesi diventa

$$f\left(\int_X u \, d\mu\right) \leq \int_X f \circ u \, d\mu \iff f(y_0) \leq \int_X f \circ u \, d\mu.$$

Prendiamo $\phi: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ affine (ovvero $\phi(y) = a \cdot y + b$ con $a \in \mathbb{R}^d$ e $b \in \mathbb{R}$) tale che $\phi \leq f$, allora

$$\int_X f \circ u \, d\mu \underset{(*)}{\geq} \int_X \phi \circ u \, d\mu = \int_X a \cdot u + b \, d\mu = ay_0 + b = \phi(y_0)$$

Infine concludiamo usando il seguente lemma di caratterizzazione delle funzioni convesse ed S.C.I.

Lemma. Ogni $f: \mathbb{R}^d \rightarrow (-\infty, +\infty]$ convessa e S.C.I è tale che

$$\forall y_0 \in \mathbb{R}^d \quad \sup_{\substack{\phi \text{ affine} \\ \phi \leq f}} \phi(y_0) = f(y_0)$$

Rileggendo meglio la dimostrazione¹ segue che $(f \circ u)^- < (\phi \circ u)^- \implies (f \circ u)^-$.

Nota. Nel caso $d = 1$ e $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ possiamo usare il fatto che le funzioni convesse ammettono sempre derivata destra o sinistra, il sup diventa un massimo e ci basta prendere come ϕ la retta tangente in $(y_0, f(y_0))$ o una con pendenza compresa tra $f'(y_0^-)$ e $f'(y_0^+)$.

□

Definizione. Dati $p_1, p_2 \in [1, +\infty]$ diciamo che sono **coniugati** se

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} = 1$$

convenendo che $1/\infty = 0$.

Fissiamo $p \in [1, +\infty]$ detto *esponente di sommabilità* e sia (X, \mathcal{A}, μ) come sempre.

Definizione. Data $f: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ o \mathbb{R}^d misurabile, la **norma** p di f è

$$\|f\|_p := \left(\int_X |f|^p \, d\mu \right)^{1/p} \quad p \in [1, +\infty)$$

mentre per $p = +\infty$ poniamo

$$\|f\|_\infty = \text{supess} f(x) := \inf\{m \in [0, +\infty] \mid |f(x)| \leq m \text{ per } \mu\text{-q.o. } x\}.$$

Nota. In realtà queste sono solo delle semi-norme.

¹Viene considerata la parte negativa per invertire la disuguaglianza (*).

- $\|f\|_\infty \leq \sup_{x \in X} |f(x)|$
- $\|f\|_p = 0 \iff f = 0$ quasi ovunque

Dimostrazione.

\Rightarrow [TODO: Facile ma non ovvia]

\Leftarrow Ovvio.

□

- Se $f_1 = f_2$ quasi ovunque $\implies \|f_1\|_p = \|f_2\|_p$.

Dimostrazione. $f_1 = f_2$ quasi ovunque $\implies \exists D \subset X$ con $\mu(D) = 0$ tale che $f_1(x) = f_2(x)$ su $X \setminus D$, usiamo il fatto che l'integrale non cambia se modifichiamo la funzione su un insieme di misura nulla

$$\|f_1\|_p^p = \int_X |f_1|^p d\mu = \int_{X \setminus D} |f_1|^p d\mu = \int_{X \setminus D} |f_2|^p d\mu = \int_X |f_2|^p d\mu = \|f_2\|_p^p$$

□

2.1.2 Disuguaglianza di Young

Proposizione. Per ogni $a_1, a_2 \geq 0$ e $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ con $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ abbiamo che

$$a_1^{\lambda_1} a_2^{\lambda_2} \leq \lambda_1 a_1 + \lambda_2 a_2$$

inoltre vale l'uguale se e solo se $a_1 = a_2$.

Dimostrazione. Se $a_1 = a_2 = 0$ allora è ovvia. Supponiamo dunque $a_1, a_2 > 0$. Per la concavità del logaritmo abbiamo

$$\lambda_1 \log a_1 + \lambda_2 \log a_2 \leq \log(\lambda_1 a_2 + \lambda_2 a_2), \iff \log(a_1^{\lambda_1} a_2^{\lambda_2}) \leq \log(\lambda_1 a_2 + \lambda_2 a_2)$$

e dalla monotonia

$$a_1^{\lambda_1} a_2^{\lambda_2} \leq \lambda_1 a_2 + \lambda_2 a_2.$$

Infine, il se e solo se per l'uguale segue dal fatto che il logaritmo è *strettamente concavo*. □

2.1.3 Disuguaglianza di Hölder

Proposizione. Date $f_1, f_2: X \rightarrow \overline{\mathbb{R}}$ o \mathbb{R}^d e p_1, p_2 esponenti coniugati allora

$$\int_X |f_1| \cdot |f_2| d\mu \leq \|f_1\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2}$$

vale anche per $p = +\infty$ convenendo che $+\infty \cdot 0 = 0$ nel membro di destra.

Dimostrazione. Se $\|f_1\|_{p_1} = 0$ o $+\infty$ e anche $\|f_2\|_{p_2} = 0$ o $+\infty$ la dimostrazione è immediata, supponiamo dunque $\|f_1\|_{p_1}, \|f_2\|_{p_2} > 0$ e finiti.

- *Caso 1:* se $p_1 = 1, p_2 = +\infty$ allora

$$\int_X |f_1| \cdot |f_2| d\mu \leq \int_X |f_1| \cdot \|f_2\|_\infty d\mu = \|f_2\|_\infty \cdot \int_X |f_1| d\mu = \|f_2\|_\infty \cdot \|f_1\|_1$$

- *Caso 2:* se $1 < p_1, p_2 < +\infty$, introduciamo un parametro $\gamma > 0$ allora

$$\int_X |f_1| \cdot |f_2| d\mu = \int_X (\gamma^{p_1} \cdot |f_1|^{p_1})^{1/p_1} \cdot (\gamma^{-p_2} \cdot |f_1|^{p_2})^{1/p_2} d\mu$$

a questo punto chiamiamo per comodità $g_1 := \gamma^{p_1} \cdot |f_1|^{p_1}$, $\lambda_1 := 1/p_1$ e $g_2 := \gamma^{-p_2} \cdot |f_1|^{p_2}$, $\lambda_2 := 1/p_2$ da cui

$$\begin{aligned} &= \int_X g_1^{\lambda_1} \cdot g_2^{\lambda_2} d\mu \stackrel{\text{Young}}{\leq} \int_X \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 d\mu = \lambda_1 \gamma^{p_1} \int_X |f_1|^{p_1} + \lambda_2 \gamma^{-p_2} \int_X |f_1|^{p_2} d\mu \\ &= \lambda_1 \gamma^{p_1} \cdot \|f_1\|_{p_1}^{p_1} + \lambda_2 \gamma^{-p_2} \cdot \|f_1\|_{p_2}^{p_2} \end{aligned}$$

posti ora $a_1 := \gamma^{p_1} \|f_1\|_{p_1}^{p_1}$ e $a_2 := \gamma^{-p_2} \|f_1\|_{p_2}^{p_2}$, per $\gamma \rightarrow 0$ abbiamo che $a_1 \rightarrow 0, a_2 \rightarrow +\infty$ mentre per $\gamma \rightarrow +\infty$ abbiamo che $a_1 \rightarrow +\infty, a_2 \rightarrow 0$ dunque per il teorema del valor medio esisterà γ tale che $a_1 = a_2$, ma allora siamo nel caso dell'uguaglianza per la disuguaglianza di Young dunque

$$\lambda_1 \gamma^{p_1} \|f_1\|_{p_1}^{p_1} + \lambda_2 \gamma^{-p_2} \|f_1\|_{p_2}^{p_2} = \lambda_1 a_1 + \lambda_2 a_2 = a_1^{\lambda_1} \cdot a_2^{\lambda_2} = \|f_1\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2}$$

□

Osservazione. La disuguaglianza di Hölder può essere generalizzata a n funzioni, date f_1, \dots, f_n e p_1, \dots, p_n con $\frac{1}{p_1} + \dots + \frac{1}{p_n} = 1$ allora

$$\int_X \prod_i^n |f_i| d\mu \leq \prod_i^n \|f_i\|_{p_i}$$

2.1.4 Disuguaglianza di Minkowski

Proposizione. Consideriamo sempre (X, \mathcal{A}, μ) e sia $p \in [1, +\infty]$ un esponente di sommabilità ed $f_1, f_2: X \rightarrow \mathbb{R}$ oppure \mathbb{R}^d . Allora vale la disuguaglianza triangolare

$$\|f_1 + f_2\|_p \leq \|f_1\|_p + \|f_2\|_p.$$

Dimostrazione.

- *Caso 1:* se $p = 1$ o $p = +\infty$, allora svolgiamo il calcolo diretto

- Se $p = 1$

$$\|f_1 + f_2\|_1 = \int_X |f_1 + f_2| d\mu \leq \int_X |f_1| + |f_2| d\mu = \int_X |f_1| d\mu + \int_X |f_2| d\mu = \|f_1\|_1 + \|f_2\|_1$$

- Se $p = +\infty$ allora poniamo D l'insieme di *misura nulla* che realizza su $X \setminus D$ il supess ovvero $\sup_{X \setminus D} |f_1 + f_2| = \sup_{X \setminus D} |f_1| + |f_2|$

$$\begin{aligned} \|f_1 + f_2\|_\infty &= \sup_{X \setminus D} |f_1 + f_2| = \sup_{X \setminus D} |f_1| + |f_2| \leq \sup_{X \setminus D} (|f_1| + |f_2|) \\ &= \sup_{X \setminus D} |f_1| + \sup_{X \setminus D} |f_2| = \sup_X |f_1| + \sup_X |f_2| = \|f_1\|_\infty + \|f_2\|_\infty \end{aligned}$$

- *Caso 2:* se $1 < p < +\infty$ e $0 < \|f_1 + f_2\|_p < +\infty$

$$\begin{aligned}\|f_1 + f_2\|_p^p &= \int_X |f_1 + f_2|^p \leq \int_X (|f_1| + |f_2|) \cdot |f_1 + f_2|^{p-1} d\mu = \\ &= \int_X |f_1| \cdot |f_1 + f_2|^{p-1} d\mu + \int_X |f_2| \cdot |f_1 + f_2|^{p-1} d\mu =\end{aligned}$$

ora introduciamo q esponente coniugato di p e notiamo

$$q = \frac{p-1}{p} \quad \text{e} \quad \| |f|^{p-1} \|_q = \|f\|_p^{p-1}$$

ora continuiamo a svolgere il conto di prima usando Hölder con esponenti p e q

$$\begin{aligned}&\stackrel{\text{Hölder}}{\leq} \|f_1\|_p \cdot \| |f_1 + f_2|^{p-1} \|_q + \|f_2\|_p \cdot \| |f_1 + f_2|^{p-1} \|_q = \\ &= (\|f_1\|_p + \|f_2\|_p) \cdot \| |f_1 + f_2|^{p-1} \|_q = (\|f_1\|_p + \|f_2\|_p) \cdot \|f_1 + f_2\|_p^{p-1}\end{aligned}$$

infine per l'ipotesi $\|f_1 + f_2\|_p > 0$ possiamo portare l'ultimo fattore dall'altra parte ed ottenere la tesi.

- *Caso 3:* se $1 < p < +\infty$ ma $\|f_1 + f_2\| = 0$ o $+\infty$ allora se $\|f_1 + f_2\| = 0$ la disuguaglianza è banale mentre se $\|f_1 + f_2\| = +\infty$ si usa la seguente disuguaglianza

$$\|f_1 + f_2\|_p^p \leq 2^{p-1}(\|f_1\|_p^p + \|f_2\|_p^p),$$

che si ottiene usando la convessità della funzione $x \mapsto x^p$ e la combinazione affine $\frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{2}x_2$ infatti

$$\left(\frac{x}{2} + \frac{y}{2}\right)^p \leq \frac{1}{2}x^p + \frac{1}{2}y^p \implies \frac{1}{2^{p-1}}(x+y)^p \leq x^p + y^p \implies (x+y)^p \leq 2^{p-1}(x^p + y^p).$$

□

2.2 Costruzione spazi L^p

Fissiamo (X, \mathcal{A}, μ) come sempre.

Definizione. Sia \mathcal{L}^p l'insieme delle funzioni $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ o \mathbb{R}^d misurabili tali che $\|f\|_p < +\infty$.

Osservazioni.

- \mathcal{L}^p è un sottospazio vettoriale dello spazio vettoriale dato da $\{f: X \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ misurabile}\}$ e $\|\cdot\|_p$ è una semi-norma.

Dimostrazione.

- \mathcal{L}^p è chiuso per somma e moltiplicazione per scalari.
- Dalla definizione segue subito $\|\lambda f\|_p = |\lambda| \cdot \|f\|_p$ l'omogeneità della norma.
- Dalla disuguaglianza di Minkowski segue che $\|\cdot\|_p$ è una semi-norma.
- In particolare non è una norma se $\{0\} \subsetneq \{f \mid \|f\|_p = 0\}$ ovvero se \mathcal{A} contiene insiemi non vuoti di misura nulla.

- In generale dato V spazio vettoriale e $\|\cdot\|$ semi-norma su V possiamo introdurre $N := \{v \mid \|v\| = 0\}$. N risulta essere un sottospazio di V e la norma data da $\|[v]\| := \|v\|$ per $[v] \in V/N$ è ben definita ed è proprio una norma su V/N .
- Nel caso della norma $\|\cdot\|_p$ abbiamo che $[f_1] = [f_2] \iff [f_1 - f_2] = 0 \iff f_1 - f_2 = 0$ quasi ovunque.

Definizione. Poniamo $N := \{f \mid \|f\|_p = 0\}$ e definiamo gli **spazi** L^p come

$$L^p := \mathcal{L}^p / N = \mathcal{L}^p / \sim \quad \|[f]\|_p := \|f\|_p$$

Notazione. Ogni tanto serve precisare meglio l'insieme di partenza e di arrivo degli spazi L^p ed in tal caso useremo le seguenti notazioni

$$L^p = L^p(X) = L^p(X, \mu) = L^p(X, \mathcal{A}, \mu) = L^p(X, \mu; \mathbb{R}^d).$$

Nota. Nella pratica non si parla mai di “classi di funzioni” e si lavora direttamente parlando di “funzioni in L^p ”. Le “operazioni” comuni non creano problemi però in certi casi bisogna stare attenti di star lavorando con oggetti ben definiti. Ad esempio:

- Preso $x_0 \in X$, consideriamo l'insieme $\{f \in L^p \mid f(x_0) = 0\}$. Notiamo che non è un sottoinsieme ben definito (a meno che $\mu(\{x_0\}) > 0$ ovvero che la misura sia atomica) di L^p , in quanto possiamo variare f su un insieme di misura nulla.
- Invece ad esempio il seguente insieme è ben definito

$$\left\{ f \in L^1 \mid \int_X f \, d\mu = 0 \right\}$$

2.2.1 Prodotto scalare su L^2

Date $f_1, f_2 \in L^2(X)$ si pone

$$\langle f_1, f_2 \rangle := \int_X f_1 \cdot f_2 \, d\mu.$$

Osservazioni.

- La definizione di $\langle f_1, f_2 \rangle$ è ben posta, infatti basta far vedere che $\int_X |f_1 f_2| \, d\mu < +\infty$ ma per Hölder abbiamo

$$\int_X |f_1 f_2| \, d\mu \leq \|f_1\|_2 \|f_2\|_2 < +\infty$$

- $\|f\|_2^2 = \langle f, f \rangle$ per ogni $f \in L^2(X)$.
- Inoltre, $\left| \int_X f_1 f_2 \, d\mu \right| \leq \int_X |f_1 f_2| \, d\mu$ quindi

$$|\langle f_1, f_2 \rangle| \leq \|f_1\|_2 \|f_2\|_2 \quad (\text{Cauchy-Schwartz}).$$

- L'operatore $\langle \cdot, \cdot \rangle$ è un prodotto scalare definito positivo.

Osservazioni.

- Dato C spazio vettoriale reale con prodotto scalare $\langle \cdot, \cdot \rangle$, allora $\langle \cdot, \cdot \rangle$ si ricava dalla norma associata $\| \cdot \|$ tramite l'identità di polarizzazione:

$$\langle v_1, v_2 \rangle = \frac{1}{4} \left(\|v_1 + v_2\|^2 - \|v_1 - v_2\|^2 \right).$$

- Dato V come sopra, vale l'identità del parallelogramma:

$$\|v_1 + v_2\|^2 + \|v_1 - v_2\|^2 = 2\|v_1\|^2 + 2\|v_2\|^2 \quad \forall v_1, v_2 \in V.$$

Usando questa identità si dimostra che la norma di L^p deriva da un prodotto scalare solo per $p = 2$.

Proprietà. Sia V uno spazio vettoriale con norma $\| \cdot \|$. Allora vale l'identità del parallelogramma se e solo se $\| \cdot \|$ deriva da un prodotto scalare.

Esempio. La norma di $L^p([-1, 1])$, deriva da un prodotto scalare solo per $p = 2$. Prendiamo $f_1 = \mathbb{1}_{[-1, 0]}$ e $f_2 = \mathbb{1}_{[0, +1]}$. Allora

$$\begin{aligned} \|f_1 + f_2\|_p^p &= \int_{-1}^1 1 \, dx = 2 \Rightarrow \|f_1 + f_2\|_p = 2^{1/p} \\ \|f_1 - f_2\|_p &= \|f_1 + f_2\|_p = 2^{1/p}, \quad \|f_1\|_p = \|f_2\|_p = 1 \end{aligned}$$

Se vale l'identità del parallelogramma allora

$$\|f_1 + f_2\|_p^2 + \|f_1 - f_2\|_p^2 = 2\|f_1\|_p^2 + 2\|f_2\|_p^2$$

cioè

$$2^{2/p} + 2^{2/p} = 2 \cdot 1 + 2 \cdot 1 \iff p = 2.$$

Domanda. Per quali X, \mathcal{A}, μ vale la stessa conclusione?

2.3 Completezza degli spazi L^p

Vediamo ora la proprietà più importante degli spazi L^p .

Teorema. Lo spazio L^p è completo per ogni $p \in [1, +\infty]$.

Lemma 1. Dato (Y, d) spazio metrico, allora

- Ogni successione (y_n) tale che

$$\sum_{n=1}^{\infty} d(y_n, y_{n+1}) < +\infty$$

è di Cauchy.

- Se ogni (y_n) tale che $\sum_{n=1}^{\infty} d(y_n, y_{n+1}) < +\infty$ converge allora Y è completo.

Osservazione. Non tutte le successioni di Cauchy (y_n) soddisfano quella condizione. Ad esempio la successione $(-1)^n/n$ definita su \mathbb{R} è di Cauchy però

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{(-1)^{n+1}}{n+1} - \frac{(-1)^n}{n} \right| = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n^2+n} \approx \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \rightarrow \infty.$$

Nota. Per mostrare la completezza degli spazi L^p è sufficiente verificare la convergenza per una sottoclasse propria delle successioni di Cauchy.

Dimostrazione.

- i) Vorremmo vedere che $\forall \varepsilon \exists N$ tale che $\forall m, n > N$ si ha $d(y_m, y_n) \leq \varepsilon$. Presi $n > m$ abbiamo che

$$d(y_m, y_n) \leq \sum_{k=m}^{n-1} d(y_k, y_{k+1}) \leq \sum_{k=m}^{\infty} d(y_k, y_{k+1}) \rightarrow 0$$

in quanto *coda di una serie convergente*, quindi

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists m_\varepsilon \text{ tale che } \sum_{k=m_\varepsilon}^{\infty} d(y_k, y_{k+1}) < \varepsilon \implies \forall n > m \geq m_\varepsilon \quad d(y_m, y_n) \leq \varepsilon$$

- ii) Sia (y_n) una successione di Cauchy, mostriamo che converge. Osserviamo che esiste una sottosuccessione (y_{n_k}) tale che

$$\sum_{k=1}^{\infty} d(y_{n_k}, y_{n_{k+1}}) < +\infty.$$

Infatti, $\forall k \exists n_k$ tale che $\forall n, m \geq n_k \quad d(y_m, y_n) \leq 1/2^k$ e dunque $d(y_{n_k}, y_{n_{k+1}}) \leq 1/2^k$. Per ipotesi (y_{n_k}) converge a un qualche $y \in Y$, da cui la tesi¹. \square

Lemma 2. Dato Y spazio normato, i seguenti fatti sono equivalenti

- i) Y è completo.

- ii) Per ogni successione (y_n) tale che $\sum_{n=1}^{\infty} \|y_n\| < +\infty$, la serie $\sum_{n=1}^{\infty} y_n$ converge².

Dimostrazione. ii) \Rightarrow i). Dobbiamo mostrare che $\sum_{n=1}^{\infty} y_n$ è di Cauchy. Per il Lemma 1 basta mostrare che la successione

$$z_n := \sum_{k=1}^n y_k \quad \text{soddisfa la proprietà} \quad \sum_{n=1}^{\infty} d(z_{n+1}, z_n).$$

Espandendo la formula sopra

$$\sum_{n=1}^{\infty} d(z_{n+1}, z_n) = \sum_{n=1}^{\infty} \left\| \sum_{k=1}^{n+1} y_k - \sum_{k=1}^n y_k \right\| = \sum_{n=1}^{\infty} \|y_{n+1}\|$$

che è finito per ipotesi.

ii) \Rightarrow i). Utilizziamo l'enunciato ii) del Lemma 2: mostriamo ogni (y_n) che soddisfa la proprietà $\sum_n d(y_n, y_{n+1}) < +\infty$ converge. Definiamo la successione $z_n := y_{n+1} - y_n$. Per ipotesi, essendo che $\sum_n \|z_n\| < +\infty$, la serie $\sum_n z_n$ converge. Indicando con L il limite della serie, abbiamo che $\lim_n y_n = L + y_1$. \square

¹Data una successione di Cauchy x_n , se una sottosuccessione x_{n_k} converge, allora converge anche la successione.

²Nel senso che esiste y tale che $\left\| y - \sum_{n=1}^N y_n \right\| \rightarrow 0$.

Lemma 3 (Minkowski per somme infinite). Date delle funzioni (g_n) funzioni positive su X allora

$$\left\| \sum_{n=1}^{\infty} g_n \right\|_p \leq \sum_{n=1}^{\infty} \|g_n\|_p$$

Dimostrazione. Per ogni N abbiamo che

$$\left\| \sum_{n=1}^N g_n \right\|_p^p \leq \left(\sum_{n=1}^N \|g_n\|_p \right)^p \leq \left(\sum_{n=1}^{\infty} \|g_n\|_p \right)^p$$

e per convergenza monotona possiamo passare il termine di sinistra al limite

$$\lim_N \left\| \sum_{n=1}^N g_n \right\|_p^p = \lim_N \int_X \left(\sum_{n=1}^N g_n \right)^p d\mu = \int_X \left(\lim_N \sum_{n=1}^N g_n \right)^p d\mu = \left\| \sum_{n=1}^{\infty} g_n \right\|_p^p$$

□

Dimostrazione (Completezza spazi L^p).

- Se $p = +\infty$: si tratta di vedere che data (f_n) di Cauchy in $L^\infty(X)$ esiste E con $\mu(E) = 0$ tale che (f_n) è di Cauchy rispetto allora norma del sup in $X \setminus E$. [TODO: Finire]
- Se $p < +\infty$: per il Lemma 2, basta far vedere che data $(f_n) \subset L^p(X)$ tale che $\sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_p < +\infty$ allora $\sum_n f_n$ converge a qualche $f \in L^p(X)$.

La dimostrazione è suddivisa in tre passi, prima costruiamo f , poi mostriamo che f_n converge a f ed infine mostriamo $f \in L^p(X)$.

◦ *Passo 1:* Per ipotesi abbiamo

$$+\infty > \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_p = \sum_{n=1}^{\infty} \| |f_n| \|_p \geq \left\| \sum_{n=1}^{\infty} |f_n| \right\|_p = \left(\int \left(\sum_{n=1}^{\infty} |f_n(x)| \right)^p d\mu(x) \right)^{1/p}$$

quindi $\sum_{n=1}^{\infty} |f_n(x)| < +\infty$ per ogni $x \in X \setminus E$ con $\mu(E) = 0$. Quindi $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ converge a qualche $f(x)$ per ogni $x \in X \setminus E$ ed a questo punto ci basta estendere f a zero in E ¹.

◦ *Passo 2:* Fissiamo N ed osserviamo che $\forall x \in X \setminus E$ abbiamo

$$\left| f(x) - \sum_{n=1}^N f_n(x) \right| = \left| \sum_{n=N+1}^{\infty} f_n(x) \right| \leq \sum_{n=N+1}^{\infty} |f_n(x)|$$

da cui otteniamo

$$\left\| f - \sum_{n=1}^N f_n \right\|_p \leq \left\| \sum_{n=N+1}^{\infty} |f_n| \right\|_p \leq \sum_{n=N+1}^{\infty} \|f_n\|_p$$

dove l'ultimo termine è la coda di una serie convergente.

¹Una costruzione alternativa degli spazi L^p potrebbe anche partire da *funzioni definite quasi ovunque*, questo ovvierebbe al problema di estendere a 0 la funzione f appena costruita. Però diventa più complicato mostrare di essere in uno spazio vettoriale poiché per esempio serve ridefinire $+$ per funzioni definite quasi ovunque.

◦ *Passo 3:* In particolare rileggendo il passo precedente per $N = 0$ otteniamo

$$\|f\|_p \leq \sum_{n=1}^{\infty} \|f_n\|_p < +\infty \implies f \in L^p$$

□

Esercizio.¹ Sia $f: X \rightarrow [0, +\infty]$ allora $\int_X f \, d\mu < +\infty \implies f(x) < +\infty$ per quasi ogni x .

Dimostrazione. Sia $E := \{x \mid f(x) = +\infty\}$, allora l'idea è che

$$+\infty > \int_X f \, d\mu \geq \int_E f \, d\mu = +\infty \cdot \mu(E).$$

Oppure, osserviamo che $\forall m \in [0, +\infty)$ abbiamo $f \cdot \mathbb{1}_E \geq m \cdot \mathbb{1}_E$ per ogni $x \in E$ quindi integrando ricaviamo

$$\underbrace{\int_E f \, d\mu}_I \geq m \cdot \mu(E) \implies \mu(E) \leq \frac{I}{m} \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} 0$$

□

2.4 Nozioni di convergenza per successioni di funzioni

Fissiamo X, \mathcal{A}, μ e prendiamo $f, f_n: X \rightarrow \mathbb{R}$ (o \mathbb{R}^k) misurabili.

Definizione. Riportiamo le definizioni di alcune nozioni di convergenza.

- **Uniforme** : $\forall \varepsilon \exists n_\varepsilon$ tale che $\|f - f_n\| < \varepsilon \quad \forall n > n_\varepsilon$.
- **Puntuale** : $f_n(x) \rightarrow f(x) \quad \forall x \in X$.
- **Puntuale μ -quasi ovunque** : $f_n(x) \rightarrow f(x)$ per μ -q.o. $x \in X$.
- **In L^p** : $\|f_n - f\|_p \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$.
- **In misura** : $\forall \varepsilon > 0 \quad \mu(\{x \mid |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon\}) \xrightarrow{n \rightarrow +\infty} 0$.

Osservazione. Abbiamo le seguenti implicazioni ovvie delle diverse nozioni di convergenza:

$$\text{uniforme} \implies \text{puntuale} \implies \text{puntuale } \mu \text{ q.o.}$$

Proposizione. Valgono le seguenti.

- i) Data $f_n \rightarrow f$ q.o. e $\mu(X) < +\infty$, allora $f_n \rightarrow f$ in misura.
- ii) (*Severini-Egorov*): Data $f_n \rightarrow f$ q.o. e $\mu(X) < +\infty$, allora $\forall \delta > 0$ esiste $E \in \mathcal{A}$ tale che $\mu(E) < \delta$ e $f_n \rightarrow f$ uniformemente su $X \setminus E$.
- iii) $f_n \rightarrow f$ in L^p , $p < +\infty$, allora $f_n \rightarrow f$ in misura.

¹In questo corso non è strettamente necessario ricordarsi come si facciano tutti questi esercizi di teoria della misura ma è bene saperli applicare in automatico quando serve.

iii') $f_n \rightarrow f \in L^\infty$, allora $\exists E$ tale che $\mu(E) = 0$ e $f_n \rightarrow f$ uniformemente su $X \setminus E$.

iv) $f_n \rightarrow f$ in misura, allora $\exists n_k$ tale che $f_{n_k} \rightarrow f$ μ -q.o.

v) $f_n \rightarrow f$ in L^p , allora $\exists n_k$ tale che $f_{n_k} \rightarrow f$ μ -q.o.

Osservazione. In i) e ii) l'ipotesi $\mu(X) < +\infty$ è necessaria. Infatti, preso $X = \mathbb{R}$ e $f_n = \mathbb{1}_{[n, +\infty)}$ si ha che $f_n \rightarrow 0$ ovunque ma f_n non converge a 0 in misura, e f_n non converge a 0 uniformemente in $\mathbb{R} \setminus E$ per ogni E di misura finita.

Lemma (disuguaglianza di Markov). Data $g: X \rightarrow [0, +\infty]$ misurabile e $m > 0$ si ha

$$\mu(\{x \in X \mid g(x) \geq m\}) \leq \frac{1}{m} \int_X g \, d\mu$$

Dimostrazione. Poniamo $E := \{x \in X \mid g(x) \geq m\}$. Osserviamo che $g \geq m \cdot \mathbb{1}_E$. Dunque vale

$$\int_X g \, d\mu \geq \int_X m \cdot \mathbb{1}_E \, d\mu = m \cdot \mu(\{x \in X \mid g(x) \geq m\}).$$

□

Lemma (Borel-Cantelli). Dati $(E_n) \subset \mathcal{A}$ tali che $\sum \mu(E_n) < +\infty$, l'insieme

$$E := \{x \in X \mid x \in E_n \text{ frequentemente}\}$$

ha misura nulla. Cioè per μ -q.o. x , $x \notin E_n$ definitivamente (in n .)

Dimostrazione. Osserviamo che

$$E = \bigcap_{m=1}^{\infty} \left(\underbrace{\bigcup_{n=m}^{\infty} E_n}_{F_m} \right).$$

Allora

$$\mu(E) \underbrace{=}_{F_m \downarrow E \text{ e } \mu(F_1) < +\infty} \lim_{m \rightarrow \infty} \mu(F_m) \leq \lim_{m \rightarrow \infty} \underbrace{\sum_{n=m}^{\infty} \mu(E_n)}_{\text{coda serie convergente}} = 0.$$

Osservazione. L'ipotesi $\sum \mu(E_n) < +\infty$ non può essere sostituita con $\mu(E_n) \rightarrow 0$.

Ora dimostriamo la proposizione.

Dimostrazione. Definiamo gli insiemi

$$A_n^\varepsilon := \{x \mid |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon\},$$

$$B_m^\varepsilon := \{x \mid |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon \text{ per qualche } n \geq m\} = \bigcup_{n=m}^{\infty} A_n^\varepsilon,$$

$$B^\varepsilon := \{x \mid |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon \text{ frequentemente}\} = \{x \in A_n^\varepsilon \text{ frequentemente}\} = \bigcap_{m=1}^{\infty} B_m^\varepsilon.$$

i) Per ipotesi, $f_n \rightarrow f$ quasi ovunque, cioè $\mu(B^\varepsilon) = 0$ per ogni $\varepsilon > 0$, ma $B_m^\varepsilon \downarrow B^\varepsilon$ e $\mu(X) < +\infty$. Allora

$$\lim_{m \rightarrow +\infty} \mu(B_m^\varepsilon) = \mu(B^\varepsilon) = 0 \implies \lim_{m \rightarrow \infty} \mu(A_m^\varepsilon) = 0.$$

ii) Dalla dimostrazione precedente, abbiamo $\lim_{m \rightarrow \infty} \mu(B_m^\varepsilon) = 0$. Allora per ogni k esiste un m_k tale che $\mu(B_{m_k}^{1/k}) \leq \delta/2^k$. Poniamo $E := \bigcup_k B_{m_k}^{1/k}$ per ogni k ; allora $\mu(E) \leq \delta$. Inoltre,

$$\begin{aligned} x \in X \setminus E &\implies x \notin B_{m_k}^{1/k} \forall k \iff x \notin A_n^{1/k} \forall k, n \geq m_k \\ &\implies |f(x) - f_n(x)| < \frac{1}{k} \quad \forall k, n \geq m_k \\ &\implies \sup_{x \in X \setminus E} |f(x) - f_n(x)| \leq \frac{1}{k} \quad \forall k, n \geq m_k \\ &\implies f - f_m \text{ uniformemente su } X \setminus E. \end{aligned}$$

iii) Dobbiamo mostrare che per ogni $\varepsilon > 0$ $\mu(A_n^\varepsilon) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$. Usando la disuguaglianza di Markov ottengo

$$\mu\left(A_n^\varepsilon = \left\{x \mid \overbrace{|f_n(x) - f(x)|^p}^g \geq \varepsilon^p\right\}\right) \leq \frac{1}{\varepsilon^p} \int_X g \, d\mu = \frac{1}{\varepsilon^p} \|f_n - f\|_p^p \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

iii') Definiamo $E_n := \{x \mid |f_n(x) - f(x)| > \|f_n - f\|_\infty\}$ per ogni n , allora $\mu(E_n) = 0$. Poniamo $E = \bigcup_n E_n$ e $\mu(E) = 0$, dunque

$$\sup_{x \in X \setminus E} |f_n(x) - f(x)| \leq \|f_n - f\|_\infty \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0.$$

iv) Per ipotesi, $f_n \rightarrow f$ in misura, cioè

$$\begin{aligned} \forall \varepsilon > 0 \quad \mu(A_n^\varepsilon) &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \implies \forall k \exists n_k: \mu(A_{n_k}^{1/k}) &\leq \frac{1}{2^k} \\ \implies \sum_k \mu(A_{n_k}^{1/k}) &< +\infty. \end{aligned}$$

Allora per Borel-Cantelli, si ha per μ -quasi ogni x , $x \notin A_{n_k}^{1/k}$ definitivamente in k , cioè $\|f_{n_k}(x) - f(x)\| < 1/k$ definitivamente in k , cioè $f_{n_k}(x) \xrightarrow{k} f(x)$.

v) Vogliamo mostrare che $f_n \rightarrow f$ in $L^p \implies \exists n_k$ tale che $f_{n_k} \rightarrow f$ quasi ovunque. Consideriamo due casi

- se $p < +\infty$, allora $f_n \rightarrow f$ in $L^p \implies f_n \rightarrow f$ in misura, da cui $\exists n_k$ tale che $f_{n_k} \rightarrow f$ quasi ovunque
- se $p = +\infty$, allora $f_n \rightarrow f$ uniformemente su $X \setminus E$ con $\mu(E) = 0 \implies f_n \rightarrow f$ puntualmente su $X \setminus E \implies f_n \rightarrow f$ quasi ovunque.

□

2.5 Controesempi sulle convergenze

Vediamo un controesempio che mostra che tutte le implicazioni sui vari tipi di convergenza sono ottimali ovvero

- i) $f_n \rightarrow f$ in misura $\not\Rightarrow f_n \rightarrow f$ q.o.
- ii) $f_n \rightarrow f$ in L^p con $p < +\infty$ $\not\Rightarrow f_n \rightarrow f$ q.o.
- iii) $\mu(E_n) \rightarrow 0$ $\not\Rightarrow$ per q.o x si ha $x \notin E_n$ definitivamente.

Dimostrazione. Consideriamo gli insiemi $I_1 = [1, 1 + \frac{1}{2}]$, $I_2 = [1 + \frac{1}{2}, 1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3}]$, \dots

$$I_n := \left[\sum_{k=1}^n \frac{1}{k}, \sum_{k=1}^{n+1} \frac{1}{k} \right]$$

e consideriamo la loro proiezione “modulo” $[0, 1]$ usando la funzione $p: \mathbb{R} \rightarrow [0, 1)$ *parte frazionaria* data da

$$p(x) := x - \lfloor x \rfloor$$

e chiamiamo $E_n := p(I_n)$. Per ogni n abbiamo che $|I_n| = |E_n| = 1/n$ e $\bigcup_n I_n = [1, +\infty)$ (in quanto $\sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k} = +\infty$) e quindi ogni $x \in [0, 1)$ appartiene ad E_n per infiniti n ed in particolare questo mostra la iii).

Per la i) basta notare che $\mathbb{1}_{E_n} \rightarrow 0$ in misura (in quanto $|E_n| \rightarrow 0$) ma $\mathbb{1}_{E_n} \not\rightarrow 0$ q.o., anzi $\forall x \in [0, 1) \mathbb{1}_{E_n}(x) \not\rightarrow 0$ e la ii) segue analogamente. \square

2.6 Approssimazioni di funzioni in L^p

Vediamo ora alcune classi di funzioni dense in L^p che risulteranno essere un utile strumento da usare nelle dimostrazioni.

Nota. Ricordiamo la nozione di insieme denso in uno spazio metrico. Sia (X, d) uno spazio metrico e $Y \subset X$. Allora Y è denso in X se e solo se per ogni $x \in X$, esiste una successione $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ in Y tale che $x = \lim_n y_n$.

Per ora sia (X, \mathcal{A}, μ) in generale.

Proposizione 1. Le funzioni limitate in L^p sono dense in L^p .

Dimostrazione. Data $f \in L^p(X)$ cerchiamo una successione di funzioni $f_n \in L^p(X)$ limitate tali che $f_n \rightarrow f$ in L^p , consideriamo

$$f_n(x) := (f(x) \wedge n) \vee (-n)$$

vorremmo mostrare che $f_n \rightarrow f$ in L^p ovvero

$$\|f_n - f\|_p^p = \int_X |f_n - f|^p d\mu \rightarrow 0$$

intanto osserviamo che, per la *convergenza puntuale*, basta osservare che se $n \geq |f(x)|$ abbiamo che $\forall x \ f_n(x) = f(x) \implies f_n(x) \xrightarrow{n} f(x) \implies |f_n(x) - f(x)|^p \rightarrow 0$.

Per concludere basta applicare *convergenza dominata* usando come dominazione direttamente $|f(x) - f_n(x)| \leq |f(x)| \implies |f(x) - f_n(x)|^p \leq |f(x)|^p$ e notiamo che $|f|^p \in L^1(X)$. \square

Proposizione 2. Sia¹ $\widetilde{\mathcal{S}} := \text{Span}(\{\mathbb{1}_E \mid E \in \mathcal{A}, \mu(E) < +\infty\})$, allora $\widetilde{\mathcal{S}}$ è denso in $L^p(X)$.

Dimostrazione. Data $f \in L^p(X)$ cerchiamo una successione che approssima f in $\widetilde{\mathcal{S}}$.

¹Lo span è inteso come combinazioni lineari

- *Caso 1:* Se $f \geq 0$ allora fissiamo $\varepsilon > 0$ e per ogni $k = 1, 2, \dots$ e poniamo

$$A_\varepsilon^k := \{x \mid k\varepsilon \leq f(x) \leq (k+1)\varepsilon\}$$

risulta che A_ε^k è misurabile ed ha misura finita². Ora consideriamo la successione di funzioni parametrizzata da ε data da

$$f_\varepsilon(x) := \sum_{1 \leq k \leq 1/\varepsilon^2} k\varepsilon \cdot \mathbb{1}_{A_\varepsilon^k}(x) \in \widetilde{\mathcal{S}}$$

Osserviamo che vale anche $\max f_\varepsilon(x) = \max\{k\varepsilon \mid k\varepsilon \leq f(x) \text{ e } k \leq 1/\varepsilon^2\}$ e mostriamo la seguente³

$$\int_X |f(x) - f_\varepsilon(x)|^p d\mu(x) \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0$$

- *Convergenza puntuale:* Per l'identità precedente abbiamo che $0 \leq f(x) - f_\varepsilon(x) \leq \varepsilon$ se $f(x) \leq 1/\varepsilon$.
- *Dominazione:* Possiamo usare nuovamente $|f(x) - f_\varepsilon(x)|^p \leq |f(x)|^p < +\infty$ in quanto $f \in L^p(X)$.
- *Caso 2:* Sia $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ allora si può rifare la dimostrazione precedente oppure si può semplicemente considerare $f_\varepsilon := (f^+)_\varepsilon - (f^-)_\varepsilon$.
- *Caso 3:* Generalizziamo la proposizione al caso di $f: X \rightarrow \mathbb{R}^d$ come segue

Proposizione 2bis (Generalizzata). Sia $\widetilde{\mathcal{S}} := \left\{ \sum_i \alpha_i \mathbb{1}_{E_i} \mid \alpha_i \in \mathbb{R}^d, E_i \in \mathcal{A}, \mu(E_i) < +\infty \right\}$.

Allora $\widetilde{\mathcal{S}}$ è denso in $L^p(X; \mathbb{R}^d)$.

Dimostrazione. (Idea) Basta approssimare componente per componente. □

Sia ora X uno spazio metrico e $\{\text{aperti}\} \subset \mathcal{A}$.

Proposizione 3. Sia $\widetilde{\mathcal{S}}_\ell := \{\sum_i \alpha_i \mathbb{1}_{E_i} \mid \alpha_i \in \mathbb{R}^d, E_i \in \mathcal{A}, \mu(E_i) < +\infty, E_i \text{ limitati}\}$ allora $\widetilde{\mathcal{S}}_\ell$ è denso in $L^p(X; \mathbb{R}^d)$ per $p < +\infty$.

Osservazione. In generale l'enunciato non vale per $p = +\infty$. Ad esempio preso $L^\infty(\mathbb{R})$ e $f = 1$ non si può approssimare con funzioni a supporto limitato (come quelle in $\widetilde{\mathcal{S}}_\ell$. In particolare data g con supporto A limitato $|f - g| = 1$ su $\mathbb{R} \setminus A$ e siccome $|\mathbb{R} \setminus A| > 0$ abbiamo $\|f - g\|_\infty \geq 1$).

Dimostrazione. ($\widetilde{\mathcal{S}}_\ell$ è denso in L^p) Per prima cosa vediamo un lemma che useremo assieme alla proposizione precedente.

Lemma 1. Dato $E \in \mathcal{A}, \mu(E) < +\infty$ esiste $E_n \in \mathcal{A}$ con E_n limitati tali che $E_n \subset E$ e $\mu(E \setminus E_n) \rightarrow 0$ e quindi $\|\mathbb{1}_E - \mathbb{1}_{E_n}\|_p = \mu(E \setminus E_n)^{1/p} \xrightarrow{n} 0$ (e $\mathbb{1}_{E_n} \in \widetilde{\mathcal{S}}_\ell$).

Dimostrazione. Dato E con $\mu(E) < +\infty$ prendiamo $x_0 \in X$ e poniamo $E_n := E \cap \mathcal{B}(x_0, n)$; $E_n \subset E$ e $E \setminus E_n \downarrow \emptyset \implies \mu(E \setminus E_n) \xrightarrow{n} 0$.

Intuitivamente $\widetilde{\mathcal{S}}_\ell$ è denso in $\widetilde{\mathcal{S}}$ che a sua volta è denso in L^p (usando la definizione di densità topologica la tesi è quasi ovvia mentre usando la definizione per successioni bisogna passare per un procedimento diagonale). □

²È misurabile in quanto preimmagine di un misurabile, ed ha misura finita in quanto $f \in L^p(X)$.

³Notiamo che qui stiamo applicando il teorema di *convergenza dominata* su una famiglia parametrizzata da ε e non su una successione ma si può verificare facilmente che il teorema (ed anche gli altri risultati di convergenza di successioni di funzioni) si può estendere semplicemente prendendo $\varepsilon = 1/n$ per $n \rightarrow \infty$.

Ora siano $X \subset \mathbb{R}^n, \mu = \mathcal{L}^n$ e $C_C(\mathbb{R}^n) := \{\text{funzioni a supporto compatto}\}$, dove il **supporto** è definito come la chiusura dell'insieme dei punti in cui la funzione è non zero $\text{supp}(f) := \overline{\{x \mid f(x) \neq 0\}}$, in quanto per le funzioni continue l'insieme $\{x \mid f(x) \neq 0\}$ è sempre aperto e dunque mai veramente compatto, a parte quando è vuoto.

Proposizione 4. Le funzioni in $C_C(\mathbb{R}^n)$ ristrette a X sono dense¹ in $L^p(X)$ per $p < +\infty$.

Vediamo prima alcuni lemmi.

Lemma 2. (di Urysohn) Dati C_0, C_1 chiusi disgiunti in X spazio metrico esiste una funzione $f: X \rightarrow [0, 1]$ continua tale che $f = 0$ su C_0 e $f = 1$ su C_1 .

Dimostrazione. Posta $d(x, C) = \inf\{d(x, y) \mid y \in C\}$ basta considerare

$$f(x) = \frac{d(x, C_0)}{d(x, C_0) + d(x, C_1)}.$$

Lemma 3. Dato $E \subset \mathbb{R}^n$ limitato (e quindi di misura finita) esiste $f_\varepsilon \in C_C(\mathbb{R}^n)$ tale che $f_\varepsilon \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} \mathbb{1}_E$ in $L^p(\mathbb{R}^n)$ e quindi in $L^p(X)$.

Dimostrazione. Per regolarità della misura di Lebesgue abbiamo che per ogni ε esistono $C_\varepsilon \subset E \subset A_\varepsilon$ tali che $|A_\varepsilon \setminus C_\varepsilon| \leq \varepsilon$. Per il Lemma 2 possiamo definire la classe di funzioni $f_\varepsilon: \mathbb{R}^n \rightarrow [0, 1]$ continue tali che

$$f_\varepsilon = 1 \text{ su } C_\varepsilon \quad f_\varepsilon = 0 \text{ su } \mathbb{R}^n \setminus A_\varepsilon.$$

In particolare, sappiamo che su $A_\varepsilon \setminus C_\varepsilon$ vale $|f_\varepsilon - \mathbb{1}_E| \leq 1$. Allora,

$$\begin{aligned} \|f_\varepsilon - \mathbb{1}_E\|_p^p &= \int_{A_\varepsilon \setminus C_\varepsilon} |f_\varepsilon - \mathbb{1}_E|^p dx \leq \int_{A_\varepsilon \setminus C_\varepsilon} \mathbb{1}_{A_\varepsilon \setminus C_\varepsilon} dx = |A_\varepsilon \setminus C_\varepsilon|^{1/p} \leq \varepsilon^{1/p} \\ &\implies \|f_\varepsilon - \mathbb{1}_E\|_p^p \xrightarrow{\varepsilon \rightarrow 0} 0. \end{aligned}$$

□

Dimostrazione Proposizione 4. Per la Proposizione 3 basta approssimare la classe delle funzioni a supporto limitato (e finito). Dunque, per il Lemma 3 si ha la tesi.

2.7 Complementi su approssimazioni di funzioni in L^p

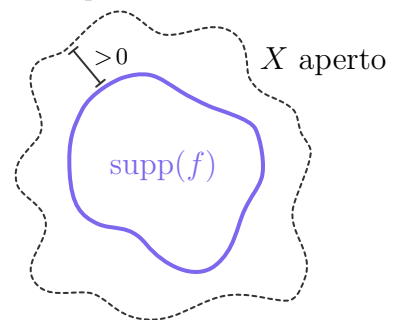
Sia X misurabile in \mathbb{R}^n con $\mu = \mathcal{L}^n$ su X . In precedenza abbiamo visto che

Proposizione 3. Le funzioni in $C_C(\mathbb{R}^n)$ ristrette a X sono dense in L^p se $p < +\infty$.

Osservazione. Si vede facilmente che $C_C(\mathbb{R}^n) \subset L^p(\mathbb{R}^n)$.

Domanda. Vale un risultato analogo per le funzioni $C_C(X)$?

Notiamo che dato $X \subset \mathbb{R}^n$ le funzioni continue su X hanno supporto compatto solo se X è aperto in quanto il supporto ha veramente distanza non nulla dal bordo e possiamo estendere la funzione a 0 fuori da X . [TODO: Esempio con un chiuso in cui le cose non fungono?]



Proposizione 4. Sia X aperto di $\mathbb{R}^n, \mu = \mathcal{L}^n$ allora $C_C(X)$ è denso in L^p per ogni $p < +\infty$

Dimostrazione.

¹È denso anche l'insieme delle funzioni continue a supporto compatto ristretto a X e si indica con $C_C^0(\mathbb{R}^n)$.

- $\mathcal{S}_C := \{\text{funzioni semplici con supporto compatto in } X\}$ è denso in $L^p(X)$ per ogni $p < +\infty$.
- Dato E relativamente compatto¹ in X esiste $f_n \in C_C(X)$ tale che $f_n \rightarrow \mathbb{1}_E$ in L^p per ogni $p < +\infty$.

La Proposizione 3 non vale per $p = +\infty$, intuitivamente in quanto data $f \in L^\infty(X)$ discontinua, se trovassimo $f_n \rightarrow f$ in $L^\infty(X)$ con f_n continue avremmo $f_n \rightarrow f$ *uniformemente* e dunque f continua.

Fatto. In generale vale che data $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile, $\|f\|_\infty \leq \sup_{x \in X} |f(x)|$ (detta anche *norma del sup*)

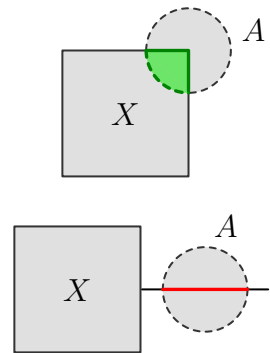
Esercizio. Se X è aperto in \mathbb{R}^n e $\mu = \mathcal{L}^n$ e $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ continua, allora $\|f\|_\infty = \sup_{x \in X} |f(x)|$.

Soluzione. Se per assurdo $\exists x \in X$ tale che $\|f\|_\infty < |f(x)|$ allora la continuità di f implica che esiste un intorno di x in cui $\|f\|_\infty < |f(x)|$; ma un intorno contiene una palla aperta di misura positiva. \nmid

In particolare possiamo anche estenderci a $X \subseteq \mathbb{R}^n$ tali che ogni A aperto relativamente a X abbia misura positiva.

Per spiegare meglio il perché la Proposizione 3 non si estende al caso $p = +\infty$ consideriamo

$$f(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases}$$



e vediamo che $\nexists f_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tale che $f_n \rightarrow f$ in L^∞ .

Se esistesse $(f_n)_n$, allora sarebbe di Cauchy rispetto alla norma $\|\cdot\|_\infty$ allora per continuità $(f_n)_n$ è di Cauchy anche rispetto alla norma del sup $\implies f_n \rightarrow \tilde{f}$ uniformemente con \tilde{f} continua, quindi $\tilde{f} = f$ quasi ovunque ma questo non è possibile per la f definita sopra.

(In particolare dato $E = \{x \mid f(x) = \tilde{f}(x)\}$, prendiamo $x_n, y_n \in E$ tali che $x_n \uparrow 0$ e $y_n \downarrow 0$ ma i limiti di f sono 0 e 1 \nmid)

Teorema (di Lusin). Dato $X \subset \mathbb{R}^d, \mu = \mathcal{L}^d$ e data $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ o \mathbb{R}^m misurabile e $\varepsilon > 0$, esiste E aperto in X con $|E| \leq \varepsilon$ tale che f è continua su $X \setminus E$ (la restrizione di f a $X \setminus E$ è continua)

Osservazione. In generale f può essere non continua in tutti i punti di X , infatti E può essere denso e $X \setminus E$ avere parte interna vuota.

Lemma (di estensione di Tietze). Dato X spazio metrico e $C \subset X$ chiuso, $f: C \rightarrow \mathbb{R}$ continua allora f si estende a una funzione continua su X .

Usando questo lemma possiamo enunciare nuovamente il teorema precedente come segue

Teorema (di Lusin'). Data $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile e $\varepsilon > 0$, $\exists E$ aperto con $|E| \leq \varepsilon$ e $g: X \rightarrow \mathbb{R}$ continua tale che $f = g$ su $X \setminus E$, inoltre se $f \in L^p(X)$ e $p < +\infty$ si può anche chiedere che $\|f - g\|_p \leq \varepsilon$.

Dimostrazione. Basta trovare E misurabile (per ottenere E aperto si usa la regolarità della misura)

- *Caso 1:* $f \in L^1(X)$ e $|X| < +\infty$

¹Un sottospazio relativamente compatto di uno spazio topologico è un sottoinsieme dello spazio topologico la cui chiusura è compatta.

Abbiamo che $f \in L^1 \implies \exists f_n$ continue tali che $f_n \rightarrow f$ in $L^1 \implies f_n \rightarrow f$ in misura e per Severini-Egorov esiste E tale che $|E| \leq \varepsilon$ e $f_n \rightarrow f$ uniformemente su $X \setminus E \implies f$ è continua su $X \setminus E$.

- *Caso 2:* f qualunque misurabile e $|X| < +\infty$

Lemma. Dati X, \mathcal{A}, μ con $\mu(X) < +\infty$ e data $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile e $\varepsilon > 0$ esiste F misurabile con $\mu(F) \leq \varepsilon$ tale che f è limitata su $X \setminus F$.

Dimostrazione. $\forall m > 0$ sia $F_m := \{x \mid |f(x)| > m\}$ allora $F_m \downarrow \emptyset \implies \mu(F_m) \downarrow 0$ e quindi esiste m tale che $\mu(F_m) \leq \varepsilon$.

Quindi data f qualunque misurabile e $|X| < +\infty$ esiste F misurabile tale che $|F| \leq \varepsilon/2$ e con f limitata su $X \setminus F \implies f \in L^\infty(X \setminus F) \subset L^1(X \setminus F)$, dunque per il *Caso 1* esiste E misurabile tale che $|E| \leq \varepsilon/2$ e f è continua su $X \setminus (E \cup F)$ e $\mu(E \cup F) \leq \varepsilon$

- *Caso 3:* f qualunque misurabile

Per ogni n poniamo $X_n := X \cap B(0, n)$ per il *Caso 2* esistono E_n misurabili con $|E_n| \leq \varepsilon/2^n$ tali che f è continua su $X_n \setminus E_n$, infine prendo $E := \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ con $\mu(E) \leq \varepsilon \implies f$ è continua su $X_n \setminus E$ per ogni $n \implies f$ è continua su $X \setminus E$.

□

2.8 Appendice

Proposizione. Siano V, W spazi normati, $T: V \rightarrow W$ lineare. Sono fatti equivalenti

- i) T è continua in 0.
- ii) T è continua.
- iii) T è lipschitziana, cioè esiste una costante $c < +\infty$ tale che $\|Tv - Tv'\|_W \leq c\|v - v'\|_V$.
- iv) Esiste una costante c tale che $\|Tv\|_W \leq c\|v\|_V$ per ogni $v \in V$.
- v) Esiste una costante c tale che $\|Tv\|_W \leq c$ per ogni $v \in V$, $\|v\|_V = 1$.

Dimostrazione. v) \Rightarrow iv). Vale la seguente

$$\|Tv\|_W \stackrel{\underbrace{=}}{v=\lambda\tilde{v}, \|\tilde{v}\|_V=1} |\lambda| \|T\tilde{v}\|_W \leq c\lambda = c\|v\|_V \leq 1.$$

iv) \Rightarrow iii). Vale la seguente

$$\|Tv - Tv'\|_W = \|T(v - v')\|_W \leq c\|v - v'\|_W.$$

iii) \Rightarrow ii) e ii) \Rightarrow i) sono ovvie.

i) \Rightarrow v). T continua in 0, dunque esiste $\delta > 0$ tale che

$$\|Tv - T0\|_W \leq 1 \quad \text{se} \quad \|v - 0\|_V \leq \delta,$$

cioè

$$\|Tv\| \leq 1 \quad \text{se} \quad \|v\| \leq \delta,$$

da cui segue che $\|Tv\| \leq 1/\delta$ se $\|v\| \leq 1$. □

Osservazione. Le costanti ottimali iii), iv), v) sono uguali e valgono

$$c = \sup_{\|v\|_V \leq 1} \|Tv\|_W.$$

Esempi.

i) Sia X, \mathcal{A}, μ coma al solito, con $\mu(X) < +\infty$. Allora, dati $1 \leq p_1 < p_2 \leq +\infty$, vale

$$L^{p_2}(X) \subset L^{p_1}(X). \quad (\star)$$

Inoltre, l'inclusione $i: L^{p_2}(X) \rightarrow L^{p_1}(X)$ è continua.

Dimostrazione. La dimostrazione di (\star) segue dalla stima

$$\|u\|_{p_1} \underbrace{\leq}_{\text{Hölder generalizzato}} \|\mathbb{1}_X\|_q \|u\|_{p_2} \quad \text{dove} \quad q = \frac{p_1 p_2}{p_2 - p_1}.$$

Dove

$$\|\mathbb{1}_X\|_{\frac{p_1 p_2}{p_2 - p_1}} \|u\|_{p_2} = (\mu(X))^{\frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2}} \|u\|_{p_2}.$$

Quanto sopra soddisfa la condizione al punto iv). □

ii) L'applicazione $L^1(X) \ni u \mapsto \int u \, d\mu \in \mathbb{R}$ è continua.

Dimostrazione. Infatti, vale

$$\left| \int_X u \, d\mu \right| \leq \int_X |u| \, d\mu = \|u\|_1.$$

Quanto sopra soddisfa la condizione al punto iv). □

iii) Cosa possiamo dire invece dell'applicazione $L^p(X) \ni u \mapsto \int u \, d\mu \in \mathbb{R}$? Se $\mu(X) < +\infty$ la continuità segue dagli esempi i) e ii) sopra. Se invece $\mu(X) = +\infty$? Per esempio $L^2(\mathbb{R})$? [TO DO].

2.9 Convoluzione

Definizione. Date $f_1, f_2: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ misurabili, il **prodotto di convoluzione** $f_1 * f_2$ è la funzione (da \mathbb{R}^d a \mathbb{R}) data da

$$f_1 * f_2(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f_1(x-y) f_2(y) \, dy$$

Osservazioni.

i) La definizione sopra è ben posta se $f_1, f_2 \geq 0$ ($f_1 * f_2(x)$ può essere anche $+\infty$). In generale non è ben posta per funzioni a valori reali (non è detto che l'integrale esista).

Ad esempio, se prendiamo $f_1 = 1$ e $f_2 = \sin x$ con $d = 1$, allora $f_1 * f_2(x)$ non è definito per alcun x .

ii) Se $f_1 * f_2(x)$ esiste, allora $f_1 * f_2(x) = f_2 * f_1(x)$, infatti

$$f_1 * f_2(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f_1(x-y) f_2(y) dy = \left(\frac{t := x-y}{dt = dy} \right) = \int_{\mathbb{R}^d} f_1(t) f_2(x-t) dt = f_2 * f_1(x).$$

iii) È importante che f_1, f_2 siano definite su \mathbb{R}^d e che la misura sia quella di Lebesgue.

In realtà, si può generalizzare quanto sopra rimpiazzando $(\mathbb{R}^d, \mathcal{L}^d)$ con (G, μ) , dove G è un gruppo commutativo e μ una misura su G invariante per traslazione. Per esempio, \mathbb{Z} con la misura che conta i punti. Cioè $f_1, f_2: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{R}$, vale

$$f_1 * f_2(n) := \sum_{m \in \mathbb{Z}} f_1(n-m) f_2(m).$$

iv) Data f distribuzione di massa (continua) su \mathbb{R}^3 , il potenziale gravitazionale generato è

$$v(x) = \int_{y \in \mathbb{R}^d} \frac{1}{|x-y|} \rho(y) dy$$

cioè $v = g * \rho$, dove $g(x) = 1/|x|$ è il potenziale di una massa puntuale in 0.

v) Se X_1, X_2 sono variabili aleatorie (reali) con distribuzione di probabilità continua p_1, p_2 e X_1, X_2 sono indipendenti, allora $X_1 + X_2$ ha distribuzione di probabilità $p_1 * p_2$. (Facile per X_1, X_2 in \mathbb{Z}).

Proposizione 1. Se $|f_1| * |f_2|(x) < +\infty$ allora $f_1 * f_2(x)$ è ben definito, in quanto $|f_1 * f_2(x)| \leq |f_1| * |f_2|(x)$.

Dimostrazione. Basta osservare che,

$$\begin{aligned} f_1 * f_2(x) &= \int_{\mathbb{R}^d} f_1(x-y) \cdot f_2(y) dy \leq \left| \int_{\mathbb{R}^d} f_1(x-y) \cdot f_2(y) dy \right| \\ &\leq \int_{\mathbb{R}^d} |f_1(x-y) \cdot f_2(y)| dy = |f_1| * |f_2|(x) < +\infty. \end{aligned}$$

□

Corollario 2. Se $|f_1| * |f_2| \in L^p(\mathbb{R}^d)$ con $1 \leq p \leq +\infty$ allora $f_1 * f_2(x)$ è ben definito per quasi ogni $x \in \mathbb{R}^d$ e $\|f_1 * f_2\|_p \leq \| |f_1| * |f_2| \|_p$.

Dimostrazione. Segue subito dalla proposizione precedente. □

Teorema 3 (disuguaglianza di Young per convoluzione.) Se $f_1 \in L^{p_1}(\mathbb{R}^d)$ e $f_2 \in L^{p_2}(\mathbb{R}^d)$ e preso $r \geq 1$ tale che

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} - 1, \quad (*)$$

allora $f_1 * f_2$ è ben definito quasi ovunque e

$$\|f_1 * f_2\|_r \leq \|f_1\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2} \quad (**)$$

Osservazioni.

- Nel caso di prima 1 e sin x sono solo in L^∞ infatti viene $r = -1$ e la disuguaglianza non ha senso.

- Supponiamo di avere $\|f_1 * f_2\| \leq C \cdot \|f_1\|_{p_1}^{\alpha_1} \cdot \|f_2\|_{p_2}^{\alpha_2}$ allora vediamo che per ogni f_1, f_2 positiva deve valere necessariamente $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ e la condizione (\star) .

Dimostrazione. Per ogni $\lambda > 0$ consideriamo λf_1 e f_2 , allora

$$\|(\lambda f_1) * f_2\|_r = \|\lambda(f_1 * f_2)\|_r = \lambda \|f_1 * f_2\|_r$$

ma abbiamo anche

$$\|(\lambda f_1) * f_2\|_r \leq C \cdot \|\lambda f_1\|_{p_1}^{\alpha_1} \cdot \|f_2\|_{p_2}^{\alpha_2} = C \cdot \lambda^{\alpha_1} \|f_1\|_{p_1}^{\alpha_1} \cdot \|f_2\|_{p_2}^{\alpha_2},$$

da cui necessariamente $\alpha_1 = 1$ e di conseguenza $\alpha_2 = 1$.

A questo punto richiediamo anche che f_1 e f_2 siano tali che $\|f_1\|_{p_1}, \|f_2\|_{p_2} < +\infty$ e $\|f_1 * f_2\| > 0$ (questo possiamo farlo in quanto basta prendere $f_1 = f_2 = \mathbb{1}_B$ con B una palla, nel caso segue proprio che $f_1 * f_2(x) > 0$ se $|x| < 1$).

Data $f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ e $\lambda > 0$ poniamo $R_\lambda f(x) := f(x/\lambda)$ allora abbiamo

$$\begin{aligned} \|(R_\lambda f_1) * (R_\lambda f_2)\|_r &= \left\| \int_{\mathbb{R}^d} f_1\left(\frac{x-y}{\lambda}\right) \cdot f_2\left(\frac{y}{\lambda}\right) dy \right\| = \left(\lambda \frac{t = \frac{y}{\lambda}}{dt = dy} \right) \\ &= \lambda^d \cdot \left\| \int_{\mathbb{R}^d} f_1\left(\frac{x}{\lambda} - t\right) \cdot f_2(t) dt \right\| \\ &= \lambda^d \cdot \|R_\lambda(f_1 * f_2)\|_r. \end{aligned}$$

Per il punto successivo abbiamo $\|R_\lambda(g)\|_r = \lambda^{d/r} \|g\|_r$, da cui otteniamo

$$\|(R_\lambda f_1) * (R_\lambda f_2)\|_r = \lambda^{d(1+\frac{1}{r})} \|f_1 * f_2\|_r.$$

Ma anche

$$\|(R_\lambda f_1) * (R_\lambda f_2)\|_r \leq C \cdot \|R_\lambda f_1\|_{p_1} \cdot \|R_\lambda f_2\|_{p_2} = \lambda^{d(\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2})} \cdot \|f_1\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2}.$$

Dunque sicuramente abbiamo $\lambda^{d(1+1/r)} \leq C \cdot \lambda^{d(1/p_1+1/p_2)}$ per ogni $\lambda > 0$ e quindi $1+1/r = 1/p_1 + 1/p_2$. \square

- $\|R_\lambda f\|_p = \lambda^{d/p} \|f\|_p$ ed in realtà possiamo ricavare l'esponente d/p per *analisi dimensionale*¹. Consideriamo l'espressione

$$\|f\|_p^p = \int_{\mathbb{R}^d} f(x) dx.$$

Se $f(x)$ è una *quantità adimensionale* allora $\int_{\mathbb{R}^d} f dx$ ha dimensione di un *volume* \mathbb{L}^d , da cui $\|f\|_p$ ha dimensione di $\mathbb{L}^{d/p}$.

Similmente, per ottenere $\|R_\lambda(f_1 * f_2)\|_r = \lambda^{d(1+1/r)} \|f_1 * f_2\|_r$, basta osservare che

$$f_1 * f_2(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f_1(x-y) f_2(y) dy$$

ha dimensione \mathbb{L}^d , da cui

$$\|f_1 * f_2\|_r = \left(\int_{\mathbb{R}^d} \underbrace{|f_1 * f_2|^r}_{\mathbb{L}^{dr}} \underbrace{dx}_{\mathbb{L}^d} \right)^{1/r}$$

ha dimensione di $\mathbb{L}^{d(1+1/r)}$.

¹Ovvero studiando le potenze delle unità di misura delle varie quantità.

Dimostrazione Teorema 3. Per via del Corollario 2. ci basta dimostrare $(\star\star)$ se $f_1, f_2 \geq 0$.

- *Caso facile.* Se $p_1 = p_2 = 1$ e $r = 1$

$$\begin{aligned}\|f_1 * f_2\|_1 &= \int f_1 * f_2(x) \, dx = \iint f_1(x-y) f_2(y) \, dy \, dx = \int f_2(y) \int f_1(x-y) \, dx \, dy = \\ &= \int \|f_1\|_1 \cdot f_2(y) \, dy = \|f_1\|_1 \cdot \|f_2\|_1\end{aligned}$$

- *Caso leggermente meno facile.* Se $p_1 = p, p_2 = 1$ e $r = p$. Vogliamo vedere che

$$\|f_1 * f_2\|_p \leq \|f_1\|_p \cdot \|f_2\|_1$$

allora

$$\begin{aligned}\|f_1 * f_2\|_p &= \int_{\mathbb{R}^d} \underbrace{(f_1 * f_2)^p}_h \, dx = \int h \cdot h^{p-1} \, dx = \iint f_1(x-y) f_2(y) h^{p-1}(x) \, dy \, dx = \\ &= \iint f_1(y-x) h^{p-1}(x) \, dx f_2(y) \, dy \stackrel{\text{H\"older}}{\leq} \int \|f_1(y-\cdot)\|_p \|h^{p-1}\|_{p'} f_2(y) \, dy\end{aligned}$$

con p' esponente coniugato a p . Inoltre notiamo che $\|f_1(y-\cdot)\|_p = \|f_1\|_p$ per invarianza di \mathcal{L}^d per riflessioni e traslazioni. Infine otteniamo

$$\|f_1\|_p \|h^{p-1}\|_{p'} \|f_2\|_1 = \|f_1\|_p \|h\|_p^{p-1} \|f_2\|_1.$$

Dunque, $\|f_1 * f_2\|_p^p \leq \|f_1 * f_2\|_p^{p-1} \|f_1\|_p \|f_2\|_1 \implies \|f_1 * f_2\|_p \leq \|f_1\|_p \|f_2\|_1$. Quest'ultima implicazione però è valida solo nel caso in cui $0 < \|f_1 * f_2\|_p < +\infty$. Resterebbero da controllare i due casi in cui la norma è 0 oppure $+\infty$. Il primo è ovvio; il secondo invece si fa per approssimazione e passando al limite.

Consideriamo f_1, f_2 e approssimiamole con $f_{1,n}, f_{2,n}$ limitate a supporto compatto, allora vale $\|f_{1,n} * f_{1,n}\|_p \leq \|f_{1,n}\|_p \cdot \|f_{2,n}\|_1$ e passando al limite si ottiene la tesi. In particolare possiamo costruire le f_n come

$$f_n(x) := (f(x) \cdot \mathbb{1}_{\mathcal{B}(0,n)}(x)) \wedge n$$

Osservazione. Se $f_2 \geq 0$ e $\int f_2 \, dx = 1$ allora $\|f_1 * f_2\|_p \leq \|f_1\|_p$ è una versione semplificata della proposizione precedente, in particolare la dimostrazione si semplifica in quanto possiamo pensare a f_2 come distribuzione di probabilità e quindi $f_1 * f_2$ è una “media pesata” delle traslazioni di f_1 o più precisamente una combinazione convessa “integrale”.

- *Caso generale.* Non lo facciamo perché servono mille mila parametri e non è troppo interessante.

□

Nel caso $r = +\infty$ gli esponenti p_1 e p_2 sono proprio coniugati e possiamo rafforzare la tesi del teorema precedente.

Teorema 4 (caso $r = +\infty$ del Teorema 3). Dati p_1 e p_2 esponenti coniugati e $f_1 \in L^{p_1}(\mathbb{R}^d)$, $f_2 \in L^{p_2}(\mathbb{R}^d)$, allora

- $f_1 * f_2(x)$ è ben definito per ogni $x \in \mathbb{R}^d$

- ii) $|f_1 * f_2(x)| \leq \|f_1\|_{p_1} \|f_2\|_{p_2}$
- iii) $f_1 * f_2$ è uniformemente continua
- iv) Se $1 < p_1, p_2 < +\infty$ allora $f_1 * f_2 \rightarrow 0$ per $|x| \rightarrow +\infty$

Premettiamo i seguenti risultati.

Proposizione 5. Data $f \in L^p(\mathbb{R}^d)$ con $p < +\infty$ la mappa

$$\begin{aligned} \tau_h f : \mathbb{R}^d &\rightarrow L^p(\mathbb{R}^d) \\ h &\mapsto f(\cdot - h) \end{aligned}$$

è continua.

Lemma 6. Lo spazio $C_0(\mathbb{R}^d) = \{f: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R} \text{ continue con } f(x) \rightarrow 0 \text{ per } |x| \rightarrow \infty\}$ è chiuso rispetto alla convergenza uniforme.

Dimostrazione Teorema 4.

- i) Osserviamo che

$$|f_1| * |f_2|(x) = \int_{\mathbb{R}^d} |f_1(x-y)| \cdot |f_2(y)| dy \stackrel{\text{H\"older}}{\leq} \|f_1(x - \cdot)\|_{p_1} \|f_2\|_{p_2} = \|f_1\|_{p_1} \|f_2\|_{p_2}$$

e concludiamo per la Proposizione 1.

- ii) Dal punto precedente abbiamo che $|f_1| * |f_2|(x) \leq \|f_1\|_{p_1} \|f_2\|_{p_2}$, da cui si conclude banalmente.

- iii) Uno tra p_1 e p_2 è finito; supponiamo lo sia p_1 . Fissiamo $x, h \in \mathbb{R}^d$

$$f_1 * f_2(x+h) - f_1 * f_2(x) = \int_{\mathbb{R}^d} (f_1(x+h-y) - f_1(x-y)) f_2(y) dy,$$

quindi

$$\begin{aligned} |f_1 * f_2(x+h) - f_1 * f_2(x)| &\leq \int |f_1(x+h-y) - f_1(x-y)| |f_2(y)| dy \\ &\stackrel{\text{Holder}}{\leq} \|f_1(x+h-\cdot) - f_1(x-\cdot)\|_{p_1} \|f_2\|_{p_2} \\ &= \|f_1(\cdot - h) - f_1(\cdot)\|_{p_1} \|f_2\|_{p_2} \\ &= \underbrace{\|\tau_h f_1 - f_1\|_{p_1}}_{\substack{h \rightarrow 0 \\ \text{Proposizione 5}}} \|f_2\|_{p_2} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

da cui segue la tesi¹.

- iv) Approssimiamo f_1 e f_2 con $f_{1,n}$ e $f_{2,n} \in \mathcal{C}_C(\mathbb{R}^d)$ in L^{p_1} e L^{p_2} rispettivamente.

Osserviamo che $f_{1,n} * f_{2,n} \in \mathcal{C}_C(\mathbb{R}^d) \subset C_0(\mathbb{R}^d)$. Per il Lemma 6 basta dimostrare che $f_{1,n} * f_{2,n} \rightarrow f_1 * f_2$ uniformemente

$$\begin{aligned} \|f_{1,n} * f_{2,n} - f_1 * f_2\|_{\infty} &= \|(f_{1,n} * f_{2,n} - f_{1,n} * f_2) + (f_{1,n} * f_2 - f_1 * f_2)\|_{\infty} \\ &\stackrel{\text{lin della conv}}{\leq} \|f_{1,n} * (f_{2,n} - f_2)\|_{\infty} + \|(f_{1,n} - f_1) * f_2\|_{\infty} \\ &\stackrel{ii)}{\leq} \underbrace{\|f_{1,n}\|_{p_1}}_{\rightarrow \|f_1\|_{p_1}} \underbrace{\|f_{2,n} - f_2\|_{p_2}}_{\rightarrow 0} + \underbrace{\|f_{1,n} - f_1\|_{p_1}}_{\rightarrow 0} \|f_2\|_{p_2}. \end{aligned}$$

¹Nota. In generale, quanto appena mostrato ci direbbe che la funzione è continua, ma essendo che stiamo maggiorando con una quantità indipendente da x segue l'uniforme continuità.

Quindi $\|f_{1,n} * f_{2,n} - f_1 * f_2\|_\infty \rightarrow 0$. □

2.10 Rimanenze dalla lezione precedente

Proposizione. Data $f \in L^p(\mathbb{R}^d)$ con $1 \leq p < +\infty$ allora la funzione $\tau_h f: \mathbb{R}^d \rightarrow L^p(\mathbb{R}^d)$ data da $h \mapsto f(\cdot - h)$ è continua.

Dimostrazione. Per prima cosa notiamo che basta vedere solo la continuità in 0 in quanto

$$\tau_{h'} f - \tau_h f = \tau_h(\tau_{h'-h} f - f) \implies \|\tau_{h'} f - \tau_h f\|_p = \|\tau_{h'-h} f - f\|_p.$$

Dimostriamo ora la proposizione in due passi.

- *Caso 1:* $f \in C_C(\mathbb{R}^d)$

$$\|\tau_h f - f\|_p^p = \int_{\mathbb{R}^d} |f(x-h) - f(x)|^p dx \xrightarrow{|h| \rightarrow 0} 0$$

per convergenza dominata, verifichiamo però che siano rispettate le ipotesi

- La convergenza puntuale, ovvero $|f(x-h) - f(x)|^p \xrightarrow{|h| \rightarrow 0} 0$ segue direttamente dalla continuità di f .
- Come dominazione invece usiamo $|f(x-h) - f(x)|^p \leq (2\|f\|_\infty)^p \cdot \mathbb{1}_{B(0, R+1)}$ usando che $f \in C_C \implies \text{supp}(f) \subset \overline{B(0, R)}$ e poi che

$$\text{supp}(f(\cdot - h) - f(\cdot)) \subset \overline{B(0, R + |h|)}$$

infine se $|h| < 1$ come raggio ci basta prendere $R + 1$.

- *Caso 2:* f qualunque Dato $\varepsilon > 0$ prendiamo $g \in C_C(\mathbb{R}^d)$ tale che $\|g - f\| \leq \varepsilon$ allora aggiungiamo a sottraiamo $g + \tau_h g$ e raggruppiamo in modo da ottenere

$$\begin{aligned} \tau_h f - f &= \tau_h(f - g) + (\tau_h g - g) + (g - f) \\ \implies \|\tau_h f - f\|_p &\leq \underbrace{\|\tau_h(f - g)\|_p}_{\leq \varepsilon} + \|\tau_h g - g\|_p + \underbrace{\|g - f\|_p}_{\leq \varepsilon} \leq 2\varepsilon + \underbrace{\|\tau_h g - g\|_p}_{\rightarrow 0 \text{ per Caso 1}} \end{aligned}$$

dunque $\limsup_{|h| \rightarrow 0} \|\tau_h f - f\|_p \leq 2\varepsilon$ ma per arbitrarietà di ε otteniamo anche che $\|\tau_h f - f\|_p \rightarrow 0$ per $|h| \rightarrow 0$. □

[TO DO: il teorema sotto non è già stato dimostrato?] **Teorema.** Siano $f_1 \in L^{p_1}(\mathbb{R}^d)$ e $f_2 \in L^{p_2}(\mathbb{R}^d)$ con p_1 e p_2 esponenti coniugati, allora $f_1 * f_2$ è definita per ogni x e uniformemente continua

$$|f_1 * f_2(x)| \leq \|f_1\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2} \quad \forall x.$$

Dimostrazione. Prendiamo $f_{1,n}, f_{2,n} \in C_C(\mathbb{R}^d)$ tali che $f_{1,n} \rightarrow f_1$ in L^{p_1} e $f_{2,n} \rightarrow f_2$ in L^{p_2} .

- Per prima cosa verifichiamo che $f * g$ è ben definita. Notiamo che $f_{1,n} * f_{2,n}$ ha supporto limitato, infatti se $\text{supp}(f_{i,n}) \subset \overline{B(0, r_{i,n})}$ per $i = 1, 2$ allora

$$\text{supp}(f_{1,n} * f_{2,n}) \subset \overline{B(0, r_{1,n} + r_{2,n})}$$

e basta notare che l'espressione

$$f_1 * f_2(x) = \int_{\mathbb{R}^d} f_1(x-y)f_2(y) \, dy$$

ha integranda nulla per ogni y se $|x| \geq r_{1,n} + r_{2,n}$.

- Vediamo che $f_{1,n} * f_{2,n} \rightarrow f_1 * f_2$ uniformemente

$$\begin{aligned} f_{1,n} * f_{2,n} - f_1 * f_2 &= (f_{1,n} - f_1) * f_{2,n} - f_1 * (f_{2,n} - f_2) \\ \|f_{1,n} * f_{2,n} - f_1 * f_2\|_p &\leq \|(f_{1,n} - f_1) * f_{2,n}\|_p + \|f_1 * (f_{2,n} - f_2)\|_p \\ &\leq \underbrace{\|f_{1,n} - f_1\|_{p_1}}_{\rightarrow 0} \cdot \underbrace{\|f_{2,n}\|_{p_2}}_{\rightarrow \|f_2\|_{p_2}} + \underbrace{\|f_1\|_{p_1}}_{\text{cost.}} \cdot \underbrace{\|f_{2,n} - f_2\|_{p_2}}_{\rightarrow 0} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

- $C_0(\mathbb{R}^d)$ è chiuso per convergenza uniforme [TODO: da fare per esercizio]

2.11 Derivata e Convoluzione

Osservazione. Osserviamo che la convoluzione si comporta bene con l'operatore di traslazione definito precedentemente, infatti $\tau_h(f_1 * f_2) = (\tau_h f_1) * f_2$ in quanto

$$f_1 * f_2(x-h) = \int f_1(x-h-y) \cdot f_2(y) \, dy = \int \tau_h f_1(x-y) \cdot f_2(y) \, dy = (\tau_h f_1) * f_2$$

quindi “formalmente” possiamo calcolare il seguente rapporto incrementale

$$\frac{\tau_h(f_1 * f_2) - f_1 * f_2}{h} = \frac{\tau_h f_1 - f_1}{h} * f_2 \implies (f_1 * f_2)' = (f_1)' * f_2$$

Vediamo ora di formalizzare questo risultato.

Teorema. Dati p_1 e p_2 esponenti coniugati, se

- $f_1 \in C^1(\mathbb{R}^d)$, f_1 e $\nabla f_1 \in L^{p_1}(\mathbb{R}^d)$
- $f_2 \in L^{p_2}(\mathbb{R}^d)$

allora $f_1 * f_2 \in C^1$ con $\nabla(f_1 * f_2) = (\nabla f_1) * f_2$ ¹.

Dimostrazione.

- $d = 1$: Sappiamo che $f_1 * f_2$ ed $f_1' * f_2$ sono continue. Vediamo che coincidono usando il teorema fondamentale del calcolo integrale. L'uguaglianza $(f_1 * f_2)' = f_1' * f_2$ segue da

$$\int_a^b f_1' * f_2 \, dx = f_1 * f_2(b) - f_1 * f_2(a) \quad \forall a < b$$

¹Ha senso anche se ∇f_1 è a valori vettoriali. In tal caso $\frac{\partial}{\partial x_i}(f_1 * f_2) = \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_i}\right) * f_2$ per $i = 1, \dots, d$.

ed in effetti

$$\begin{aligned}
\int_a^b f_1' * f_2(x) dx &= \int_a^b \int_{-\infty}^{\infty} f_1'(x-y) f_2(y) dy dx \\
&\stackrel{(*)}{=} \int_{-\infty}^{\infty} \int_a^b f_1'(x-y) dx \cdot f_2(y) dy \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} (f_1(b-y) - f_1(a-y)) \cdot f_2(y) dy \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} f_1(b-y) f_2(y) dy - \int_{-\infty}^{\infty} f_1(a-y) f_2(y) dy \\
&= f_1 * f_2(b) - f_1 * f_2(a).
\end{aligned}$$

In particolare in $(*)$ stiamo usando Fubini-Tonelli in quanto

$$\int_a^b \int_{-\infty}^{\infty} |f_1'(x-y)| \cdot |f_2(y)| dy dx \leq \int_a^b \|f_1'(x - \cdot)\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2} dx = \|f_1'\|_{p_1} \cdot \|f_2\|_{p_2} \cdot (b-a).$$

- per $d > 1$ dato $i = 1, \dots, d$ basta semplicemente considerare le proiezioni infatti

$$\int_a^b \frac{\partial f_1}{\partial x_i} * f_2(x_1, \dots, \overset{(i)}{t}, \dots, x_d) dt = f_1 * f_2(x_1, \dots, \overset{(i)}{b}, \dots, x_d) - f_1 * f_2(x_1, \dots, \overset{(i)}{a}, \dots, x_d)$$

□

Corollario. Data $f_1 \in C_c^\infty(\mathbb{R}^d)$ (da cui segue $\nabla^k \in L^q(\mathbb{R}^d)$ per ogni $k = 0, 1, \dots$ e $1 \leq q < +\infty$) e $f_2 \in L^p(\mathbb{R}^d)$ allora $f_1 * f_2 \in C^\infty(\mathbb{R}^d)$ (anzi $\nabla^k(f_1 * f_2) \in C_0(\mathbb{R}^d)$ per ogni k) e vale la formula nota¹

$$\nabla^k(f_1 * f_2) = (\nabla^k f_1) * f_2 \quad \forall k = 1, \dots$$

Dimostrazione. Si dimostra per induzione su k . [TO DO: da fare]

2.12 Approssimazione per convoluzione

Definizione. Per prima cosa data una funzione $g: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$ e $\delta \neq 0$ poniamo

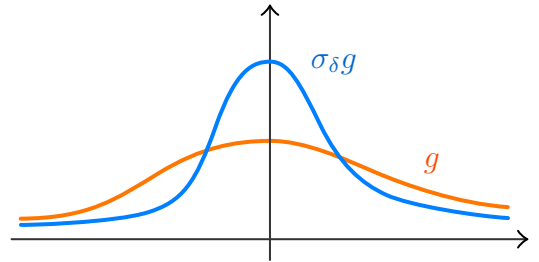
$$\sigma_\delta g(x) := \frac{1}{\delta^d} g\left(\frac{x}{\delta}\right)$$

e notiamo che questa trasformazione preserva la norma L^1 . Infatti, il valore $1/\delta^d$ è proprio il modulo del determinante dello Jacobiano del cambio di variabile.

Teorema. Data $f \in L^p(\mathbb{R}^d)$ e $g \in L^1(\mathbb{R}^d)$ con $1 \leq p < +\infty$ e posto $m := \int_{\mathbb{R}^d} g(x) dx$, allora

$$f * \sigma_\delta g \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} mf \quad \text{in } L^p(\mathbb{R}^d).$$

Interpretazione. Se $g_2 \geq 0$ con $\int g dx = 1$ (dunque g distribuzione di probabilità) allora $f * g$ possiamo



¹dato che $\nabla^k f_1$ ha valori in \mathbb{R}^k e f_2 in \mathbb{R} , dobbiamo definire $\nabla^k f_1 * f_2$ [TO DO: da fare].

pensarla come media pesata di traslate di f , dunque facendo $f * \sigma_\delta g$ stiamo pesando sempre di più i valori delle traslate vicino a 0.

Nota. Per $p = +\infty$ il teorema non vale. Infatti, la funzione $f = \mathbb{1}_{[0,+\infty]} \in L^\infty$; le funzioni $f * \sigma_\delta g$ sono continue ma non convergono in L^∞ a $mf = f$. Infatti, le successioni continue convergono in L^∞ a funzioni che coincidono, a meno di insiemi di misura nulla, con funzioni continue, ed f non è possibile modificarla in un insieme di misura nulla in modo che coincida con una funzione continua.

Dimostrazione. Per ora consideriamo g generica e ripercorriamo una dimostrazione simile a quella fatta per la disuguaglianza di Young

$$\begin{aligned} \|f * g - mf\|_p^p &= \int_{\mathbb{R}^d} \underbrace{|f * g - mf|}_h^p dx \\ &= \int |f * g - mf| \cdot h^{p-1} dx \\ &= \int \left| \int f(x-y)g(y) dy - f(x) \int g(y) dy \right| \cdot h^{p-1}(x) dx \\ &\leq \int \int |f(x-y) - f(x)| \cdot |g(y)| dy \cdot h^{p-1}(x) dx \\ &\stackrel{(*)}{=} \int \left(\int |f(x-y) - f(x)| h^{p-1}(x) dx \right) |g(y)| dy, \end{aligned}$$

dove in (*) abbiamo usato Fubini-Tonelli. Ora prendiamo q tale che $1/p + 1/q = 1$ allora per Hölder abbiamo

$$\begin{aligned} &\leq \int \|f(\cdot - y) - f(\cdot)\|_p \|h^{p-1}\|_q \cdot |g(y)| dy \\ &= \|h\|_p^{p-1} \int_{\mathbb{R}^d} \|\tau_y f - f\|_p \cdot |g(y)| dy \end{aligned}$$

dunque abbiamo ricavato che

$$\|f * g - mf\|_p^p \leq \|f * g - mf\|_p^{p-1} \int_{\mathbb{R}^d} \|\tau_y f - f\|_p \cdot |g(y)| dy$$

ed ora applicando questa stima a $\sigma_\delta g$ invece che a g otteniamo

$$\|f * \sigma_\delta g - mf\|_p \leq \int_{\mathbb{R}^d} \|\tau_y f - f\|_p \cdot |\sigma_\delta g(y)| dy,$$

infine ponendo $z = y/\delta$ e $dz = 1/\delta^d dy$ e sostituendo nell'integrale

$$= \int_{\mathbb{R}^d} \|\tau_{\delta z} f - f\|_p \cdot |g(z)| dz \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} 0$$

per *convergenza dominata*, verifichiamone le ipotesi

- i) La convergenza puntuale segue in quanto $\|\tau_{\delta z} f - f\|_p \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} 0$ per ogni z .
- ii) Come dominazione prendiamo $2\|f\|_p \cdot |g| \in L^1$.

□

Corollario. Sia $g \in C_c^\infty(\mathbb{R}^d)$ con $\int g dx = 1$ e $f \in L^p(\mathbb{R}^d)$ e $1 \leq p < +\infty$ allora $\sigma_\delta g * f \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} f$ in $L^p(\mathbb{R}^d)$ e $\sigma_\delta g * f \in C^\infty(\mathbb{R}^d)$.

Capitolo 3

Spazi di Hilbert

Sia H spazio vettoriale reale con prodotto scalare $\langle \cdot, \cdot \rangle$ definito positivo e norma indotta $\| \cdot \|$ definita come $\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}$.

Si ricorda l'identità di polarizzazione

$$\langle x_1, x_2 \rangle = \frac{1}{4} \left(\|x_1 + x_2\|^2 - \|x_1 - x_2\|^2 \right).$$

Nota. Siccome $\| \cdot \|$ è continua, dalla formula di polarizzazione segue che il prodotto scalare è continuo.

Definizione. H si dice **spazio di Hilbert** se è completo.

Esempi.

- Dato (X, \mathcal{A}, μ) , gli spazi $L^2(X), L^2(X, \mathbb{R}^m)$ sono spazi di Hilbert.
- Lo spazio $\ell^2 = \left\{ (x_n) \mid \sum_{n=0}^{\infty} x_n^2 < +\infty \right\}$ è uno spazio di Hilbert.

Definizione. $\mathcal{F} \subset H$ è un **sistema ortonormale** se

$$\|e\| = 1 \quad \forall e \in \mathcal{F}, \quad \langle e, e' \rangle = 0 \quad \forall e \neq e' \in \mathcal{F}.$$

Definizione. \mathcal{F} si dice **completo** se $\overline{\text{Span}(\mathcal{F})} = H$. In tal caso \mathcal{F} si dice **base di Hilbert**.

Osservazione. In generale una base di Hilbert $\mathcal{F} \subset H$ non è anche una base algebrica di H .

L'esempio che segue spiega quanto appena detto.

Esempio. In ℓ^2 una base ortonormale è $\mathcal{F} = \{e_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ con $e_n = (0, \dots, 0, \overset{(n)}{1}, 0, \dots)$. Infatti, il fatto che siano ortonormali è banale; verifichiamo che sia una base.

Studiamo $\text{Span}(\mathcal{F}) = \{x = (x_0, x_1, \dots) \mid x_n \text{ è definitivamente nullo}\}$: dato $x \in \ell^2$ e $m = \mathbb{N}$, definiamo

$$P_m x := (x_0, x_1, \dots, x_m, 0, \dots).$$

Allora $\text{Span}(\mathcal{F}) \supset P_m x \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} x$ in ℓ^2 . Infatti,

$$x - P_m x = (0, \dots, 0, x_{m+1}, x_{m+2}, \dots).$$

¹Lo span sono combinazioni lineari finite.

Dunque

$$\|x - P_m x\| = \sum_{n=m+1}^{\infty} x_n^2 \xrightarrow{m \rightarrow +\infty} 0.$$

Teorema 1. (della base di Hilbert.) Dato H spazio di Hilbert, \mathcal{F} sistema ortonormale al più numerabile, ovvero $\mathcal{F} = \{e_n \mid n \in \mathbb{N}\}$. Definiamo per ogni $x \in H$, $n \in \mathbb{N}$ l'elemento $x_n = \langle x, e_n \rangle$. Allora

- i) Vale $\sum_n x_n^2 \leq \|x\|^2$ (**Disuguaglianza di Bessel**).
- ii) La somma $\sum_n x_n e_n$ converge a qualche $\bar{x} \in H$ e $\bar{x}_n = x_n$ per ogni n .
- iii) Vale $\|\bar{x}\|^2 = \sum_n x_n^2 \leq \|x\|^2$.
- iv) Se $x - \bar{x} \perp \mathcal{F}$, allora $x - \bar{x} \perp \overline{\text{Span}(\mathcal{F})}$, ovvero \bar{x} è la proiezione di x su $\overline{\text{Span}(\mathcal{F})}$.
- v) Se \mathcal{F} è completo, allora $x = \bar{x}$ e in particolare

$$x = \sum_{n=0}^{\infty} x_n e_n, \quad \|x\|^2 = \sum_{n=0}^{\infty} x_n^2 \quad (\textbf{Identità di Parseval}).$$

Alla dimostrazione del teorema premettiamo il seguente lemma.

Lemma 2. Siano H e \mathcal{F} come nel teorema. Data $(a_n) \in \ell^2$, allora

- i) La serie $\sum_n a_n e_n$ converge a qualche $\bar{x} \in H$.
- ii) $\bar{x}_n = a_n$ per ogni n .
- iii) $\|\bar{x}\|^2 = \sum_n a_n^2$.

Dimostrazione.

- i) Dimostriamo che $y_n = \sum_{n=1}^m a_n e_n$ è di Cauchy in H . Se $m' > m$, vale

$$y_{m'} - y_m = \sum_{n=m+1}^{m'} a_n e_n \implies \|y_{m'} - y_m\|^2 = \left\| \sum_{n=m+1}^{m'} a_n e_n \right\|^2 = \sum_{n=m+1}^{m'} a_n^2 \leq \sum_{n=m+1}^{\infty} a_n^2 < +\infty.$$

Dunque, per ogni ε esiste m_ε tale che $\sum_{m_\varepsilon+1}^{\infty} a_n^2 \leq \varepsilon^2$, per cui

$$\|y_{m'} - y_m\|^2 \leq \sum_{m+1}^{m'} a_n^2 \leq \sum_{m_\varepsilon+1}^{\infty} a_n^2 \leq \varepsilon^2 \quad \forall m, m' \geq m_\varepsilon.$$

- ii) Se $m \geq n$, $\langle y_m, e_n \rangle = a_n$, dunque, per continuità del prodotto scalare

$$a_n = \langle y_m, e_n \rangle \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \langle \bar{x}, e_n \rangle = \bar{x}_n.$$

iii) Si ha l'uguaglianza $\|y_m\|^2 = \sum_{n=1}^m a_n^2$, per cui passando al limite per $m \rightarrow +\infty$ otteniamo

$$\begin{aligned} \|y_m\|^2 &\xrightarrow{m \rightarrow \infty} \|\bar{x}\|^2 \\ &\parallel \\ \sum_{n=0}^m a_n^2 &\xrightarrow{m \rightarrow \infty} \sum_{n=0}^{\infty} a_n^2 \end{aligned}$$

□

Dimostrazione Teorema 1.

i) Studiamo la somma $x = \sum_{n=0}^m x_n e_n + \overbrace{y}^{\text{resto}}$.

Notiamo che x è somma di vettori ortogonali, infatti y è ortogonale a $\sum_{n=0}^m x_n e_n$:

$$\langle y, e_i \rangle = \left\langle x - \sum_{n=0}^m x_n e_n, e_i \right\rangle = \langle x, e_i \rangle - \sum_{n=0}^m x_n \underbrace{\langle e_n, e_i \rangle}_{\delta_{i,n}} = x_i - x_i = 0.$$

Essendo che x è somma di vettori ortogonali abbiamo

$$\|x\|^2 = \sum_{n=1}^m x_n^2 + \|y\|^2 \geq \sum_{n=1}^m x_n^2.$$

Passando al limite per $m \rightarrow +\infty$ otteniamo

$$\|x\|^2 \geq \sum_{n=1}^{\infty} x_n^2.$$

ii) Segue dal lemma notando che il punto precedente ci dice che la successione (x_n) è a quadrato sommabile.

iii) Analogamente al caso precedente.

iv) Notiamo che $\langle x - \bar{x}, e_n \rangle = x_n - \bar{x}_n \stackrel{\text{ii)}}{=} 0$ per ogni n . Cioè

$$x - \bar{x} \perp e_n \implies x - \bar{x} \perp \text{Span}(\mathcal{F}) \implies x - \bar{x} \underset{\substack{\text{continuità} \\ \text{pr. scalare}}}{\perp} \overline{\text{Span}(\mathcal{F})}$$

v) $x - \bar{x} \perp \underbrace{\overline{\text{Span}(\mathcal{F})}}_{\mathcal{F} \text{ è completo}} = H \implies x - \bar{x} = 0$, cioè $x = \bar{x}$.

□

Corollario 3. Siano H spazio di Hilbert, $\mathcal{F} = \{e_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ base di Hilbert, $x, x' \in H$. Valgono le seguenti.

i) $x_n = x'_n \quad \forall n \in \mathbb{N} \iff x = x'$ (\Leftarrow è ovvia).

ii) $\langle x, x' \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} x_n x'_n$ (**Identità di Parseval**).

iii) L'applicazione $H \ni x \mapsto (x_n) \in \ell^2$ è un'isometria surgettiva².

Dimostrazione.

- i) Per l'enunciato v) se due vettori hanno la stessa rappresentazione rispetto a una base di Hilbert coincidono.
- ii) La tesi segue usando l'identità di polarizzazione congiuntamente all'enunciato v) del teorema:

$$\begin{aligned}\langle x, x' \rangle &= \frac{1}{4} (\|x + x'\|^2 - \|x - x'\|^2) = \frac{1}{4} \left(\sum_n \overbrace{(x_n + x'_n)^2}^{x_n^2 + x_n'^2 + 2x_n x'_n} - \sum_n \underbrace{(x_n - x'_n)^2}_{x_n^2 + x_n'^2 - 2x_n x'_n} \right) \\ &= \frac{1}{4} (\cancel{\sum x_n^2} + \cancel{\sum x_n'^2} + 2 \sum x_n x'_n - \cancel{\sum x_n^2} - \cancel{\sum x_n'^2} + 2 \sum x_n x'_n) .\end{aligned}$$

- iii) Il fatto che l'applicazione sia un'isometria segue da Parseval; che sia iniettiva dal fatto che \mathcal{F} è una base di Hilbert e che sia surgettiva dai punti i) e ii) del Lemma 2.

□

Osservazioni.

- Gli enunciati i) e v) non richiedono H completo, mentre ii) non è vero se H non è completo.
- Se H è uno spazio di Hilbert e \mathcal{F} sistema ortonormale infinito, allora \mathcal{F} non è mai una base algebrica¹. Dunque, combinazioni lineari finite di \mathcal{F} non sono mai uguali ad H , ovvero $\text{Span}(\mathcal{F}) \subsetneq H$.

Dimostrazione. Presi $(e_n) \subset \mathcal{F}$, consideriamo $\bar{x} = \sum_{n=0}^{\infty} 2^{-n} e_n$. Allora $\bar{x} \in H \setminus \text{Span}(\mathcal{F})$.

- Siano H uno spazio di Hilbert di dimensione infinita e \mathcal{F} una base di Hilbert. Allora \mathcal{F} è numerabile se e solo se H è separabile.

Dimostrazione.

⇒ Vale $H = \overline{\text{Span}(\mathcal{F})} = \overline{\text{Span}_{\mathbb{Q}}(\mathcal{F})}$. Concludiamo notando che $\overline{\text{Span}_{\mathbb{Q}}(\mathcal{F})}$ è numerabile se \mathcal{F} è numerabile.

⇐ Se \mathcal{F} non fosse numerabile, siccome $\|e - e'\| = \sqrt{2} \quad \forall e, e' \in \mathcal{F}$, potremmo definire per ogni elemento di \mathcal{F} una palla di raggio $\sqrt{2}/2$, dunque potremmo definire un insieme di palle disgiunte. Dato un sottoinsieme denso di H , per definizione, deve intersecare ogni palla e dunque deve essere più che numerabile, dunque H non sarebbe separabile.

Esempio. Lo spazio $H = L^2(X)$, con $X = \mathbb{R}^n$, μ misura di Lebesgue ha base di Hilbert numerabile.

²In particolare è bigettiva ma l'iniettività è ovvia.

¹Per base algebrica s'intende un insieme di vettori di uno spazio vettoriale le cui combinazioni lineari generano tutto lo spazio.

- Dato \mathcal{F} sistema ortonormale in H , allora \mathcal{F} è completo se e solo se \mathcal{F} è massimale (nella classe dei sistemi ortonormali rispetto all'inclusione).

Dimostrazione.

\Rightarrow Dato che \mathcal{F} è completo segue che $\overline{\text{Span}(\mathcal{F})} = X$, quindi

$$\mathcal{F}^\perp = (\text{Span}(\mathcal{F}))^\perp \underbrace{= \overline{\text{Span}(\mathcal{F})}^\perp}_{\text{continuità del prodotto scalare}} = H^\perp = \{0\}.$$

dunque \mathcal{F} è massimale.

\Leftarrow Se \mathcal{F} non è completo, esiste $x \in H \setminus \text{Span}(\mathcal{F})$. Definiamo \bar{x} come nel Teorema 1. Notiamo che $x - \bar{x} \perp \text{Span}(\mathcal{F})$, dunque $x - \bar{x} \perp \mathcal{F}$ e $x - \bar{x} \neq \{0\}$, da cui $\mathcal{F} \cup \left\{ \frac{x - \bar{x}}{\|x - \bar{x}\|} \right\}$ è un sistema ortonormale che include strettamente \mathcal{F} . \nmid

Osservazione. Nell'implicazione \Rightarrow non abbiamo usato la completezza di H .

- Ogni sistema ortonormale \mathcal{F} si completa a $\tilde{\mathcal{F}}$ base di Hilbert di H .

Dimostrazione. Sia $X = \{ \mathcal{F} \text{ sistema ortonormale in } H \text{ tale che } \tilde{\mathcal{F}} \subset \mathcal{F} \}$. Per Zorn, X contiene un elemento massimale. Denotiamolo con $\tilde{\mathcal{F}}$. Allora $\tilde{\mathcal{F}}$ è una base di Hilbert.

Teorema 4. Dato V sottospazio vettoriale chiuso di H . Allora

- $H = V + V^\perp$, cioè per ogni $x \in H$ esiste $\bar{x} \in V$ e $\tilde{x} \in V^\perp$ tale che $x = \bar{x} + \tilde{x}$.
- Gli elementi \bar{x} e \tilde{x} sono univocamente determinati (e indicati con x_V e x_V^\perp).
- \bar{x} è caratterizzato come l'elemento di V più vicino a x .

Dimostrazione.

- Dato che V è chiuso, V è completo, cioè V è un sottospazio di H , dunque V ammette base ortonormale $\mathcal{F} = \{e_n \mid n \in \mathbb{N}\}$. Definiamo $\bar{x} \in \overline{\text{Span}(\mathcal{F})}$ come nel Teorema 1 e $\tilde{x} := x - \bar{x} \in \overline{\text{Span}(\mathcal{F})}^\perp = V^\perp$ (per iv)).
- Se $x = \bar{x} + \tilde{x} = \bar{x}' + \tilde{x}'$, dove $\bar{x}, \bar{x}' \in V$ e $\tilde{x}, \tilde{x}' \in V^\perp$, allora

$$\bar{x} - \bar{x}' = \tilde{x}' - \tilde{x} \quad \underbrace{\implies}_{V \cap V^\perp = \{0\}} \quad \bar{x} - \bar{x}' = \tilde{x}' - \tilde{x} = 0.$$

- Per ogni $y \in V$ sia $f(y) = \|x - y\|^2$. Mostriamo che \bar{x} è l'unico minimo di f .

$$f(y) = \|x - y\|^2 = \left\| \underbrace{x - \bar{x}}_{\in V^\perp} + \underbrace{\bar{x} - y}_{\in V} \right\|^2 = \|x - \bar{x}\|^2 + \|\bar{x} - y\|^2 = f(\bar{x}) + \|\bar{x} - y\|^2 \geq f(\bar{x}).$$

□

Osservazione. Serve V chiuso. Se per esempio V è denso in H ma $V \neq H$, allora

$$\overline{V^\perp} = \overline{V}^\perp = H^\perp = \{0\} \implies V \subseteq V + V^\perp \subseteq V + \overline{V^\perp} = V \subsetneq H.$$

Un esempio di tale V è $\text{Span}(\mathcal{F})$ con \mathcal{F} base di H (H di dimensione infinita).

Teorema 5 (di rappresentazione di Riesz.) Dato $\Lambda: H \rightarrow \mathbb{R}$ lineare e continuo, esiste $x_0 \in H$ tale che

$$\Lambda(x) = \langle x, x_0 \rangle \quad \text{per ogni } x \in H. \quad (*)$$

Lemma 6. Dato $\Lambda: X \rightarrow \mathbb{R}$ lineare, $(\ker \Lambda)^\perp$ ha dimensione 0 o 1.

Dimostrazione Se per assurdo $\dim(\ker \Lambda)^\perp \geq 2$, allora $(\ker \Lambda)^\perp$ conterrebbe un sottospazio W di dimensione 2. Dunque, $\dim(\ker \Lambda|_W) = \{1, 2\}$, essendo che $\dim \mathbb{R} = 1$. Ma questo non è possibile, in quanto abbiamo definito $W = \ker^\perp$. \square

Dimostrazione Teorema 5. Sia $V := \ker \Lambda$. Dato che Λ è continuo segue che V è chiuso. Se $V = H \implies \Lambda \cong 0$ e prendiamo $x_0 = 0$.

Se $V \neq H$, allora $V^\perp \neq \{0\}$ e definiamo $x_1 \in V^\perp$ con $\|x_1\| = 1$. Poniamo $x_0 := cx_1$ con $c := \Lambda x_1$ e $\tilde{\Lambda}(x) := \langle x, x_0 \rangle$. Abbiamo che

- $x \in V \implies x \perp x_1 \implies x \perp x_0 \implies \tilde{\Lambda} = 0 = \Lambda(x)$. Quindi $\tilde{\Lambda} = \Lambda$ su V .
- $\tilde{\Lambda}(x_1) = \langle x_1, x_0 \rangle = \langle x_1, cx_1 \rangle = c\|x_1\|^2 = c = \Lambda(x_1)$. Quindi $\tilde{\Lambda} = \Lambda$ su $\text{Span}(x_1) = V^\perp$.
- $\tilde{\Lambda} = \Lambda$ su $V + V^\perp = H$.

\square

Osservazione. Esistono funzioni $\Lambda: H \rightarrow \mathbb{R}$ lineari ma non continue se H ha dimensione infinita.

Dimostrazione. Prendo $\Lambda: H \rightarrow \mathbb{R}$ lineare definito come

$$\begin{cases} \Lambda(e_n) = n & \forall n \\ \Lambda(e) = \text{qualsiasi } e \in \mathcal{G} \setminus \{e_n\}. \end{cases}$$

Allora

$$+\infty = \sup_n |\Lambda(e_n)| \leq \sup_{\|x\| \leq 1} |\Lambda(x)|$$

da cui segue che Λ non è continuo.

3.1 Spazi di Hilbert complessi

Definizione. Sia H uno spazio vettoriale su \mathbb{C} con prodotto hermitiano $\langle \cdot; \cdot \rangle$, ovvero tale che

- $\langle \cdot; \cdot \rangle$ è lineare nella prima variabile
- $\langle x; x' \rangle = \overline{\langle x'; x \rangle}$ ovvero è antilineare nella seconda variabile.
- $\langle x; x \rangle \geq 0$ per ogni x e vale 0 se e solo se $x = 0$.

Analogamente si pone $\|x\| := \sqrt{\langle x; x \rangle}$. C'è un'identità di polarizzazione ma è leggermente diversa dalla versione reale.

Definizione. H si dice di Hilbert se è **completo**.

Esempio. Su $L^2(X; \mathbb{C})$ si mette il prodotto scalare dato da

$$\langle u; v \rangle := \int_X u \cdot \bar{v} \, d\mu.$$

Teorema. (della base di Hilbert per spazi complessi) Dato $\mathcal{F} = \{e_n\}$ sistema ortonormale in H e $x \in H$ allora per ogni n si pone¹

$$x_n = \langle x; e_n \rangle$$

Vale anche l'identità di Parseval $\|x\|^2 = \sum |x_n|^2$ dove $|\cdot|$ è il modulo di un numero complesso, in particolare nella versione con prodotto scalare diventa

$$\langle x, x' \rangle = \sum_n x_n \overline{x'_n}.$$

¹E non $\langle e_n; x \rangle$!

Capitolo 4

Serie di Fourier

Lo scopo della serie di Fourier (complessa) è di rappresentare una funzione $f: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ (o più in generale una funzione $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ 2π -periodica) come

$$f(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{inx}$$

In particolare, chiamiamo i coefficienti c_n **coefficienti di Fourier** di $f(x)$ e tutta l'espressione a destra **serie di Fourier** di $f(x)$.

Motivazione. La rappresentazione in serie di Fourier serve ad esempio a risolvere certe equazioni alle derivate parziali ed è anche utilizzata per la “compressione dati”.

Problemi.

- Come si trovano (se esistono) i coefficienti di Fourier?
- Ed in che senso la serie converge?

Osservazione. La serie appena vista è indicizzata da $-\infty$ a $+\infty$, più avanti vedremo che la definizione esatta non sarà importante ma per ora usiamo la definizione

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n := \lim_{N \rightarrow +\infty} \sum_{n=-N}^N a_n$$

ed ogni tanto scriveremo anche $\sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n$ per brevità.

Teorema 1. L'insieme $\mathcal{F} = \left\{ e_n(x) := \frac{e^{inx}}{\sqrt{2\pi}} \right\}$ è una base ortonormale di $L^2([-\pi, \pi]; \mathbb{C})$.

Da cui *formalmente* segue che

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} \langle f; e_n \rangle \cdot e_n = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \left(\int_{-\pi}^{\pi} f(t) \frac{\overline{e^{int}}}{\sqrt{2\pi}} dt \right) \frac{e^{inx}}{\sqrt{2\pi}} \\ &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{2\pi} \underbrace{\left(\int_{-\pi}^{\pi} f(t) e^{-int} dt \right)}_{c_n} e^{inx} \end{aligned}$$

Definizione. Data $f \in L^2([-\pi, \pi]; \mathbb{C})$ i coefficienti di Fourier di f sono

$$c_n = c_n(f) := \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx.$$

Notiamo in particolare che è anche ben definito anche per $f \in L^1$ (anche se per ora non ci dice molto in quanto L^1 non è uno spazio di Hilbert).

Corollario. Per ogni $f \in L^2([-\pi, \pi]; \mathbb{C})$ abbiamo

i) La serie $\sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n e^{inx}$ converge a f in L^2 .

ii) Vale l'identità di Parseval

$$\|f\|_2^2 = 2\pi \sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n|^2 \quad \langle f, g \rangle = 2\pi \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(f) \overline{c_n(g)}$$

Osservazione. Usando la i) ed il fatto che la convergenza in L^2 implica la convergenza quasi ovunque a meno di sottosuccessioni otteniamo che $\forall f \exists N_n \uparrow \infty$ tale che

$$\sum_{n=-N_k}^{N_k} c_n e^{inx} \xrightarrow{k} f(x) \quad \forall x \in [-\pi, \pi].$$

In particolare nel 1966 Carleson ha dimostrato che in realtà vale proprio

$$\sum_{n=-N}^N c_n e^{inx} \xrightarrow{N} f(x) \quad \forall x.$$

Prima di dimostrare il Teorema 1 riportiamo il teorema di Stone-Weierstrass.

Teorema (di Stone-Weierstrass.) Sia K uno spazio compatto e T_2 (essenzialmente è uno spazio metrico compatto) e sia $C(K)$ l'insieme delle funzioni continue reali su K , mentre $C(K; \mathbb{C})$ le funzioni continue complesse su K dotate della norma del sup.

Dato $\mathcal{A} \subset C(K)$ diciamo che è una **sottoalgebra** se è uno spazio vettoriale e chiuso rispetto al prodotto e diciamo che **separa i punti** se $\forall x_1, x_2 \in K$ con $x_1 \neq x_2$ allora $\exists f \in \mathcal{A}$ tale che $f(x_1) \neq f(x_2)$.

- *Caso reale:* se \mathcal{A} è una sottoalgebra di $C(K)$ che separa i punti e contiene le costanti allora $\overline{\mathcal{A}} = C(K)$.
- *Caso complesso:* se \mathcal{A} è una sottoalgebra di $C(K; \mathbb{C})$ che separa i punti, contiene le costanti e *chiusa per coniugio* allora $\overline{\mathcal{A}} = C(K; \mathbb{C})$.

Osservazioni.

- Se $K = [0, 1]$, \mathcal{A} = “polinomi reali” $\implies \overline{\mathcal{A}} = C(K; \mathbb{C})$.
- L'ipotesi di separare i punti è necessaria, se ad esempio $\exists x_1, x_2$ tali che $x_1 \neq x_2$ e per ogni f abbiamo $f(x_1) = f(x_2)$ allora varrà analogamente anche per ogni funzione nella chiusura ma le funzioni continue separano i punti.
- È anche necessario che $\mathcal{A} \supset$ “costanti”, ad esempio dato $x_0 \in K$ ed $\mathcal{A} := \{f \in C(K) \mid f(x_0) = 0\}$ abbiamo che $\overline{\mathcal{A}} = \mathcal{A} \subsetneq C(K)$.
- Anche la chiusura per coniugio è necessaria, infatti ad esempio preso $K = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq 1\}$, \mathcal{A} = “polinomi complessi”, \mathcal{A} separa i punti e contiene le costanti però $\overline{\mathcal{A}}$ sono solo le funzioni olomorfe su K .

In particolare, vorremmo applicare questo teorema alle funzioni 2π -periodiche ristrette a $[-\pi, \pi]$ che però non verificano la separazione dei punti in quanto per la periodicità $f(-\pi) = f(\pi)$. Nel seguente corollario vediamo come possiamo estendere leggermente il teorema passando ai quozienti topologici.

Corollario. Sia \mathcal{A} una sottoalgebra di $C(K)$ (o analogamente per $C(K; \mathbb{C})$) che contiene le costanti (e nel caso complesso anche chiusa per coniugio). Definiamo la relazione di equivalenza $x_1 \sim x_2$ se $f(x_1) = f(x_2)$ per ogni $f \in \mathcal{A}$. Allora,

$$\overline{\mathcal{A}} = \{f \in C(K) \mid f(x_1) = f(x_2) \text{ se } x_1 \sim x_2\}.$$

Dimostrazione Corollario. È chiaro che $\mathcal{A} \subset X := \{f \in C(K) \mid f(x_1) = f(x_2) \text{ se } x_1 \sim x_2\}$. Data $g \in X$, definiamo $\tilde{g}: K/\sim \rightarrow \mathbb{C}$ in modo che $g = \tilde{g} \circ \pi$. Osserviamo che K/\sim è compatto e T_2 e che $\tilde{\mathcal{A}} = \{\tilde{f}: f \in \mathcal{A}\}$ soddisfa le ipotesi del teorema di Stone-Weierstrass, quindi $\overline{\tilde{\mathcal{A}}} = C(K/\sim; \mathbb{C})$, quindi per ogni $g \in X$ esiste una successione $\tilde{g}_n \in \tilde{\mathcal{A}}$ tale che $\tilde{g}_n \rightarrow \tilde{g}$ uniformemente e quindi $g_n \rightarrow g$ uniformemente.

$$\begin{array}{ccc} K & \xrightarrow{g} & \mathbb{C} \\ \downarrow \pi & \nearrow \tilde{g} & \\ K/\sim & & \end{array}$$

□

Dimostrazione Teorema 1. Vogliamo vedere che

i) \mathcal{F} è un sistema ortonormale.

Dimostrazione. Basta calcolare $\langle e_n; e_m \rangle$ per ogni $n, m \in \mathbb{Z}$

$$\langle e_n; e_m \rangle = \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{inx}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\overline{e^{imx}}}{\sqrt{2\pi}} dx = \begin{cases} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} 1 dx = 1 & \text{se } n = m \\ \frac{1}{2\pi} \left[\frac{e^{i(n-m)x}}{i(n-m)} \right]_{-\pi}^{\pi} = 0 & \text{se } n \neq m \end{cases}$$

ii) \mathcal{F} è completo.

Dimostrazione. Questo punto richiede il teorema di Stone-Weierstrass.

Consideriamo

$$\mathcal{A} = \text{Span}_{\mathbb{C}}(\mathcal{F}) = \left\{ \sum_n a_n e^{inx} \right\} = \{p(e^{inx}) \mid p \text{ polinomio a esponenti interi}\}.$$

Segue che \mathcal{A} è una sottoalgebra che separa i punti di K tranne $-\pi$ e π ed è chiusa per coniugio.

Per il corollario¹ $\overline{\mathcal{A}}^C = \{f \in C([-\pi, \pi]; \mathbb{C}) \mid f(-\pi) = f(\pi)\}$. Dato che la convergenza uniforme implica la convergenza in L^2 per spazi di misura finita, abbiamo:

$$\overline{\mathcal{A}}^{L^2} \supseteq \{f \in C([-\pi, \pi]; \mathbb{C}) \mid f(-\pi) = f(\pi)\}.$$

Inoltre, $\overline{\mathcal{A}}^{L^2} \supseteq \{f \in C([-\pi, \pi]; \mathbb{C})\}$ in quanto, una $f \in C([-\pi, \pi]; \mathbb{C})$ può essere approssimata in L^2 tramite funzioni f_n che coincidono in $\{-\pi, \pi\}$. Definiamo $f_n = f \cdot \varphi_n$, dove le

¹Notiamo che la topologia su \mathcal{A} è quella data dalla norma del sup delle funzioni continue quindi la chiusura è rispetto a tale norma e la indichiamo con $\overline{\mathcal{A}}^C$.

φ_n sono tali che $\varphi_n(-\pi) = \varphi_n(\pi) = 0$, $\varphi_n = 1$ su $[1/n - \pi, \pi - 1/n]$; notiamo che $f_n \rightarrow f$ in L^2 .

[TODO: Disegnino delle φ_n]

Infine poiché le funzioni continue sono dense in L^2 segue che $\overline{\mathcal{A}}^{L^2} = L^2$.

□

Esempio (calcolo coefficienti di Fourier).

- $\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2} = \frac{1}{2}e^{ix} + \frac{1}{2}e^{-ix}$, allora $c_n = \begin{cases} \frac{1}{2} & n = \pm 1 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$.
- $(\sin x)^2 = \left(\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}\right)^2 = \frac{1}{4}e^{2ix} + \frac{1}{4} - \frac{1}{4}e^{-2ix}$, allora $c_n = \begin{cases} -\frac{1}{4} & n = \pm 2 \\ \frac{1}{2} & n = 0 \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$.
- $f(x) = x, c_0 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx = 0$. Per $n \neq 0$:

$$c_n = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x e^{-inx} dx = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{x e^{-inx}}{-in} \right]_{-\pi}^{\pi} - \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{-inx}}{-in} dx = \frac{(-1)^n i}{n}.$$

Calcoliamo ora $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n|^2$. Valgono le uguaglianze

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n|^2 i &= 2 \sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} \\ \sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n|^2 i &= \frac{1}{2\pi} \|x\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} x^2 dx = \frac{2}{2\pi} \cdot \frac{\pi^3}{3} = \frac{\pi^2}{3}. \end{aligned}$$

Dunque $\sum_{n=1}^{+\infty} \frac{1}{n^2} = \frac{\pi^2}{6}$.

4.1 Regolarità di f e dei coefficienti

Proposizione 1. Data $f \in [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ tale che

(R) $f \in C^1$ (basta f continua e C^1 a tratti).

(CB) $f(-\pi) = f(\pi)$.

Allora $c_n(f') \stackrel{(*)}{=} in c_n(f)$.

Derivazione formale della formula

$$f(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n e^{inx} \xrightarrow{\text{derivata}} f'(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} in c_n e^{inx}$$

Dimostrazione. Vale quanto segue

$$\begin{aligned}
 c_n(f') &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x)' e^{-inx} dx \\
 &\stackrel{\text{int. per parti}}{=} \frac{1}{2\pi} \overbrace{\int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx}^{f(-\pi)=f(\pi), e^{-in\pi}=e^{-in(-\pi)}} - \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x)(-in)e^{-inx} dx \\
 &= (in) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) e^{-inx} dx = in c_n(f).
 \end{aligned}$$

□

Esercizio. Trovare l'analogo della formula della derivata nel caso di cui non valga la condizione al bordo (CB). [TO DO]

Osservazione. In verità, basta ancora meno. Possiamo riformulare la Proposizione 1 come segue.

Proposizione 1'. Data $f: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ tale che

(R') f è continua.

(CB) esiste $g \in L^1([-\pi, \pi], \mathbb{C})$ tale che $f(x) = f(-\pi) + \int_{-\pi}^x g(t) dt$.

Allora la formula (\star) diventa $c_n(g) = in c_n(f)$.

Proposizione 2. Data f come nella Proposizione 1, valgono le seguenti

i) $\sum_{n \in \mathbb{Z}} n^2 |c_n(f)|^2 = \frac{\|f'\|_2^2}{2\pi} < +\infty.$

ii) $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |n|^\alpha |c_n(f)| < +\infty$ per ogni $\alpha < 1/2$.

iii) La serie di Fourier converge ²totalmente.

Dimostrazione.

i) $\sum_{n \in \mathbb{Z}} n^2 |c_n(f)|^2 \stackrel{(*)}{=} \sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n(f')|^2 \stackrel{\text{Parseval}}{=} \frac{\|f'\|_2^2}{2\pi} \stackrel{f' \in L^1([-\pi, \pi], \mathbb{C}) \subset L^2([-\pi, \pi], \mathbb{C})}{<} +\infty.$

ii) $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |n|^\alpha |c_n(f)| \stackrel{(n \neq 0)}{\leq} \sum_{n \in \mathbb{Z}} |n| |c_n(f)| \cdot \frac{1}{|n|^{1-\alpha}} \stackrel{\text{C-S per } \ell^2}{\leq} \overbrace{\left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} |n|^2 |c_n(f)|^2 \right)^{1/2}}^{< +\infty \text{ per il punto ii)}} \cdot \overbrace{\left(\sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{1}{|n|^{2-2\alpha}} \right)^{1/2}}^{\alpha < 1/2 \Rightarrow < +\infty} < +\infty.$

iii) Dal punto precedente con $\alpha = 0$ otteniamo $\sum_{n \in \mathbb{Z}} \|c_n(f) e^{inx}\|_\infty = \sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n(f)| < +\infty.$ □

² $\sum a_n(x)$ converge totalmente se converge la serie $\sum \|a_n(x)\|_\infty$.

Proposizione 3. Data $f \in [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ tale che

(R_k) $f \in C^k$ (oppure $f \in C^{k-1}$ e $D^{k-1}f$ è C^1 a tratti).

(CB_{k-1}) $D^h f(-\pi) = D^h f(\pi)$ per $h = 0, 1, \dots, k-1$.

Allora

i) $c_n(D^h f) = (in)^h c_n(f)$ per ogni $n \in \mathbb{Z}$ per ogni $h = 1, \dots, k$.

ii) $\sum |n|^{2k} |c_n(f)|^2 \leq \frac{\|D^k f\|_2^2}{2\pi} < +\infty$.

iii) $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |n|^\alpha |c_n(f)| < +\infty$ per ogni $\alpha < k - 1/2$.

iv) La serie di Fourier di f converge totalmente con tutte le derivate fino all'ordine $k-1$.

Proposizione 4. Se f è continua e $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |n|^{k-1} |c_n(f)| < +\infty$ allora $f \in C^{k-1}$ e soddisfa (CB_{k-1}).

Dimostrazione. Preso $h = 0, 1, \dots, k-1$ vale

$$\begin{aligned} D^h(c_n(f)e^{inx}) &= c_n(f)(in)^h e^{inx} \\ \|D^h(c_n(f)e^{inx})\| &= |c_n(f)| |n|^h \leq |c_n(f)| |n|^{k-1}. \end{aligned}$$

Dunque $\sum D^h(c_n(f)e^{inx})$ converge totalmente e quindi uniformemente per ogni $h \leq k-1$ ad $\tilde{f}: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ di classe C^{k-1} . Ma

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left\| \sum_{-N}^N c_n e^{inx} - \tilde{f}(x) \right\|_2 \leq \left\| \sum_{-N}^N c_n e^{inx} - \tilde{f}(x) \right\|_\infty \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} 0.$$

Ma $\sum c_n e^{inx} \rightarrow \tilde{f}$ uniformemente, allora $\sum_{-N}^N c_n e^{inx} \rightarrow \tilde{f}$ in L^2 . Allora $f = \tilde{f}$ nel senso L^2 .

Siccome f, \tilde{f} sono continue e coincidono quasi ovunque, vale $f = \tilde{f}$. Abbiamo usato il lemma

Lemma. Date f, \tilde{f} continue e $f(x) = \tilde{f}(x)$ per quasi ogni x , allora $f(x) = \tilde{f}(x)$ per ogni x . \square

Osservazione. $f \in C^{k-1}([-\pi, \pi]) + (CB_{k-1})$ se e solo se f è la restrizione a $[-\pi, \pi]$ di una funzione 2π -periodica e C^{k-1} .

4.2 Convergenza puntuale della serie di Fourier

Teorema. Data $f \in L^1([-\pi, \pi], \mathbb{C})$ (estesa in modo 2π -periodico a tutto \mathbb{R}) tale che esiste $\bar{x} \in \mathbb{R}$ ed esiste $\alpha > 0$ tale che f è α -Holderiana in \bar{x} , cioè esiste $\delta > 0, M < +\infty$ per cui

$$|f(\bar{x} + t) - f(\bar{x})| \leq M |t|^\alpha \quad \forall t: |t| < \delta \iff \limsup_{t \rightarrow 0} \frac{|f(\bar{x} + t) - f(\bar{x})|}{|t|^\alpha} < +\infty.$$

Allora $\sum_{-\infty}^{\infty} c_n(f) e^{in\bar{x}}$ converge a $f(\bar{x})$. Cioè $\sum_{-N}^N c_n(f) e^{in\bar{x}} \xrightarrow{N \rightarrow \infty} f(\bar{x})$

Lavoro preparatorio: rappresentare somme parziali di serie di Fourier con "convoluzione":

Data $f \in L^1([-\pi, \pi], \mathbb{C})$, $N = 1, 2, \dots$ (estesa a funzioni 2π -periodiche su \mathbb{R}).

$$S_N f(x) := \sum_{n=-N}^N c_n e^{inx}$$

Riscriviamo

$$\begin{aligned} S_N f(x) &:= \sum_{n=-N}^N c_n e^{inx} = \sum_{n=-N}^N \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\pi}^{\pi} f(y) e^{-iny} dy \right) e^{inx} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(y) \left(\sum_{n=-N}^N e^{in(x-y)} \right) dy. \end{aligned}$$

Poniamo $D_N(z) := \sum_{n=-N}^N e^{inz}$ che si definisce **nucleo di Dirichlet**. Allora

$$\begin{aligned} S_N f(x) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(y) D_N(x-y) dy \quad \stackrel{x-y=t, dy=dt}{=} \frac{1}{2\pi} \int_{x-\pi}^{x+\pi} f(x-t) D_N(t) dt \\ &\stackrel{(\star)}{=} \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) D_N(t) dt \end{aligned}$$

Dove (\star) è il seguente lemma.

Lemma. Se g è T -periodica e $g \in L^1([-\pi, \pi], \mathbb{C})$, allora

$$\int_0^T g(\tau) d\tau = \int_c^{c+T} g(\tau-s) d\tau \quad \forall s \forall c.$$

Ne segue che

$$S_N f(x) := \sum_{n=-N}^N c_n(f) e^{inx} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) D_N(t) dt$$

dove

$$D_N(t) = \sum_{n=-N}^N e^{int} = \frac{\sin((N+1/2)t)}{\sin(t/2)}.$$

Infatti,

$$\begin{aligned} D_N(t) &= \sum_{n=-N}^N e^{int} = \sum_{n=-N}^N (e^{it})^n = e^{-iNt} \cdot \sum_{n=0}^{2N} (e^{it})^n \\ &= \frac{e^{-i(N+1/2)t}}{e^{-it/2}} \cdot \frac{e^{(2N+1)it} - 1}{e^{it} - 1} = \frac{e^{(N+1/2)it} - e^{-(N+1/2)it}}{e^{it/2} - e^{-it/2}} \\ &= \frac{\sin((N+1/2)t)}{\sin(t/2)}. \end{aligned}$$

Il seguente lemma riassume quanto detto finora.

Lemma. (di rappresentazione di $S_n f$ come convoluzione) Data $f \in L^1([-\pi, \pi], \mathbb{C})$ (estesa a funzioni 2π -periodiche su \mathbb{R}) vale Ricapitolando data f come sopra abbiamo visto che

$$S_N f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x-t) D_N(t) dt \quad \text{con } D_N(t) := \sum_{n=-N}^N e^{int} = \frac{\sin\left(\left(N + \frac{1}{2}\right)t\right)}{\sin\left(\frac{t}{2}\right)}$$

Osservazione. In particolare: $\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} D_N(t) dt = 1$.

Lemma. (di Riemann-Lebesgue (generalizzato)). Data $g \in L^1(\mathbb{R})$ e $h \in L^\infty(\mathbb{R})$ con h T -periodica, allora

$$\int_{\mathbb{R}} g(x)h(yx) dx \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} \underbrace{\left(\int_{\mathbb{R}} g(x) dx \right)}_a \underbrace{\left(\int_0^T h(x) dx \right)}_m$$

Dimostrazione. Per ogni s, y poniamo $\Phi(y, s) := \int_{\mathbb{R}} g(x)h(yx + s) dx$ con $s, y \in \mathbb{R}$. Dunque, vogliamo dimostrare che $\Phi(y, 0) \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} am$. Vedremo che valgono le seguenti

$$\text{i) } \forall y \int_0^T \Phi(y, s) ds = am.$$

$$\text{ii) } \forall s \Phi(y, s) - \Phi(y, 0) \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} 0.$$

da cui segue subito che

$$\Phi(y, 0) - ma = \int_0^T \Phi(y, 0) - \Phi(y, s) ds \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} 0$$

per convergenza dominata; dove dalla ii) segue la convergenza puntuale e come dominazione usiamo

$$|\Phi(y, 0) - \Phi(y, s)| \leq 2 \|g\|_1 \|h\|_\infty.$$

Mostriamo ora i due punti.

i) Esplicitiamo e applichiamo Fubini-Tonelli

$$\begin{aligned} \int_0^T \Phi(y, s) ds &= \int_0^T \int_{\mathbb{R}} g(x)h(yx + s) dx ds = \int_{\mathbb{R}} \underbrace{\int_0^T h(yx + s) ds}_m g(x) dx \\ &= m \int_{\mathbb{R}} g(x) dx = ma \end{aligned}$$

e possiamo usare Fubini-Tonelli in quanto

$$\int_{\mathbb{R}} \int_0^T |h(yx + s)| ds \cdot |g(x)| dx \leq \int_{\mathbb{R}} \|h\|_\infty |g(x)| dx = \|h\|_\infty \cdot \|g\|_1.$$

ii) Notiamo che

$$\begin{aligned} \Phi(y, s) &= \int_{\mathbb{R}} g(x)h(y(x + s/y)) dx = \left(\begin{matrix} t = x + s/y \\ dt = dx \end{matrix} \right) = \int_{\mathbb{R}} g(t - s/y) h(yt) dt \\ \implies \Phi(y, s) - \Phi(y, 0) &= \int_{\mathbb{R}} \left(g\left(t - \frac{s}{y}\right) - g(t) \right) h(yt) dt \\ \implies |\Phi(y, s) - \Phi(y, 0)| &= \int_{\mathbb{R}} |\tau_{s/y}g - g| \cdot |h(yt)| dt \leq \|\tau_{s/y}g - g\|_1 \cdot \|h\|_\infty \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} 0. \end{aligned}$$

□

Dimostrazione del Teorema.

$$\begin{aligned}
S_N f(\bar{x}) - f(\bar{x}) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\bar{x} - t) D_N(t) dt - \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(\bar{x}) D_N(t) dt \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} (f(\bar{x} - t) - f(\bar{x})) D_N(t) dt \\
&= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(\bar{x} - t) - f(\bar{x})}{\sin \frac{t}{2}} \sin \left(\left(N + \frac{1}{2} \right) t \right) dt \\
&= \int_{-\pi}^{\pi} g(t) \cdot \sin \left(\left(N + \frac{1}{2} \right) t \right) dt
\end{aligned}$$

Applicando il Lemma di Riemann-Lebesgue otteniamo:

$$S_N f(\bar{x}) - f(\bar{x}) \xrightarrow{N \rightarrow +\infty} \left(\int g(x) dx \right) \cdot \int_0^\pi \sin x dx = 0.$$

In particolare, per applicare il lemma serve $g \in L^1([-\pi, \pi])$; ma infatti per $|t| \leq \delta$

$$|g(t)| \leq \frac{|f(\bar{x} - t) - f(\bar{x})|}{|\sin \frac{t}{2}|} \leq \frac{M|t|^\alpha}{|t|/\pi} = \frac{M\pi}{|t|^{1-\alpha}} \in L^1([-\delta, \delta]).$$

Invece per $\delta \leq |t| \leq \pi$ basta

$$|g(t)| \leq \frac{|f(\bar{x} - t)| + |f(\bar{x})|}{\sin \frac{\delta}{2}} \in L^1([-\pi, \pi]).$$

□

Proposizione. Data $f \in L^1([-\pi, \pi])$ estesa per periodicit  e dato \bar{x} tale che esistano i limiti a destra e sinistra di f in \bar{x} detti L^+ e L^- ed f α -H lderiana a sinistra e destra si pu  vedere che vale

$$S_N f(\bar{x}) \xrightarrow{N} \frac{L^+ + L^-}{2}.$$

Capitolo 5

Applicazioni della serie di Fourier

5.1 Equazione del calore

Sia Ω un aperto di \mathbb{R}^d e $u(t, x): [0, T) \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ e chiamiamo x la *variabile spaziale* e t la *variabile temporale*. In dimensione 3 l'insieme Ω rappresenta un solido di materiale conduttore omogeneo e $u(t, x)$ rappresenta la temperatura in x all'istante t . Dunque u risolve l'equazione del calore

$$u_t = c \cdot \Delta u$$

dove con u_t indichiamo la derivata parziale di u rispetto al tempo, c è una costante fisica che porremo uguale ad 1 e Δu è il laplaciano rispetto alle dimensioni spaziali ovvero

$$\Delta u = \sum_{i=1}^d \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} = \operatorname{div}(\nabla_x u).$$

Vedremo che la soluzione di $u_t = \Delta u$ esiste ed è unica specificando $u(0, \cdot) = u_0$ condizione iniziale con $u_0: \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ data e delle condizioni al bordo come ad esempio

- *Condizioni di Dirichlet:* $u = v_0$ su $[0, T) \times \partial\Omega$ con v_0 funzione fissata. Possiamo pensare come fissare delle sorgenti di calore costanti sul bordo.
- *Condizioni di Neumann:* $\frac{\partial u}{\partial \nu}$ con ν direzione normale al bordo. Essenzialmente ci sta dicendo che non c'è scambio di calore con l'esterno.

In particolare scriveremo

$$\begin{cases} u_t = \Delta u & \text{su } \Omega \\ u(0, \cdot) = u_0 \\ \text{Una delle condizioni al bordo su } \partial\Omega \dots \end{cases}$$

5.2 Risoluzione dell'equazione del calore (su \mathbb{S}^1)

Come conduttore consideriamo un anello di materiale omogeneo e sottile che parametrizziamo con $[-\pi, \pi]$. Dunque consideriamo $u: [0, T) \times [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$ con le condizioni

$$\begin{cases} u_t = u_{xx} \\ u(\cdot, \pi) = u(\cdot, -\pi) \\ u_x(\cdot, \pi) = u_x(\cdot, -\pi) \\ u(0, \cdot) = u_0 \end{cases} \quad (\text{P})$$

in particolare la (ii) e la (iii) condizione non sono né quelle di Dirichlet né di Neumann, sono delle condizioni che effettivamente ci dicono che siamo “su \mathbb{S}^1 ”¹; invece l'ultima è la condizione iniziale ed u_0 è data.

5.2.1 Risoluzione formale

Scriviamo u in serie di Fourier rispetto a x cioè

$$u(t, x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n e^{inx}$$

con $c_n := c_n(u(t, \cdot))$ da cui derivando formalmente dentro le sommatorie otteniamo che u_t e u_{xx} SONO

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \dot{c}_n(t) e^{inx} = u_t = u_{xx} &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} -n^2 c_n(t) e^{inx} \\ u_t = u_{xx} \iff \dot{c}_n(t) = -n^2 c_n(t) \quad \forall n \forall t \quad \text{e} \quad u(0, \cdot) = u_0 &\iff c_n(0) = c_n(u_0) =: c_n^0 \end{aligned}$$

Dunque risolvere (P) equivale per ogni n che c_n che risolva il problema di Cauchy dato da

$$\begin{cases} \dot{y} = -n^2 y \\ y(0) = c_n^0 \end{cases} \quad (\text{P}')$$

con soluzione $y(t) = \alpha e^{-n^2 t}$ cioè $c_n(t) = c_n^0 e^{-n^2 t}$ e quindi abbiamo

$$u(t, x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n^0 e^{-n^2 t} e^{inx} \quad (*)$$

Studiando questa soluzione formale possiamo fare le seguenti osservazioni che poi diventeranno dei teoremi

- *La soluzione esiste per $t \in [0, +\infty)$ ed è molto regolare per $t > 0$*

Vedremo che la soluzione formale è proprio una soluzione al problema per $t \geq 0$, in particolare il termine $e^{-n^2 t} \rightarrow 0$ in modo più che polinomiale ed infatti vedremo che la soluzione sarà proprio C^∞ per $t > 0$.

- *La soluzione è unica*

Tutti i problemi di Cauchy per i coefficienti $c_n(t)$ hanno un'unica soluzione dunque anche la soluzione u è unica.

¹Bastano solo queste condizioni sulla funzione e sulla sua derivata perché intuitivamente le altre seguono applicando la (i).

- In generale non esiste soluzione nel passato.

Se il numero di coefficienti $c_n^0 \neq 0$ è infinito allora il termine $e^{-n^2 t} \rightarrow +\infty$ molto velocemente per $t < 0$ e la serie diverge.

Teorema 1 (Esistenza e Regolarità).

Se $u_0: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ (presa in L^2) è tale che $\sum_{n \in \mathbb{Z}} |c_n^0| < +\infty$ (ad esempio se $u_0 \in C^1$ ed è 2π -periodica) allora

$$u(t, x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} \underbrace{c_n^0 e^{-n^2 t} e^{inx}}_{u_n(t, x)}$$

definisce una funzione $u: [0, +\infty) \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ tale che

- u è 2π -periodica in x ed è reale se u_0 è reale.
- u è continua.
- u è C^∞ su $(0, +\infty) \times \mathbb{R}$.
- Risolve (P). In particolare vale $u_{tt} = u_{xx}$ e valgono le condizioni di periodicità per $t > 0$; e infine vale $u(0, \cdot) = u_0$ su $[-\pi, \pi]$.

Vediamo alcuni lemmi tecnici preparatori e sia R un rettangolo di \mathbb{R}^d ovvero prodotto di intervalli con estremi aperti o chiusi.

Lemma 4. Date $v_n: R \rightarrow \mathbb{C}$ di classe C^k con $k = 1, 2, \dots, +\infty$ tali che

- $v_n \rightarrow v$ uniformemente.
- $\forall \underline{h} = (h_1, \dots, h_d) \in \mathbb{N}^d$ con $|\underline{h}| := h_1 + \dots + h_d \leq k$ (se $k = +\infty$ allora basta $|\underline{h}| < +\infty$) posto

$$D^{\underline{h}} v_n := \frac{\partial^k}{\partial x_1^{h_1} \dots \partial x_d^{h_d}} v_n$$

$D^{\underline{h}} v_n \rightarrow D^{\underline{h}} v$ converge uniformemente.

allora $v \in C^k$ e $D^{\underline{h}} v = \lim_n D^{\underline{h}} v_n$.

Dimostrazione. Si parte dal caso $d = 1$ e $k = 1$ e si procede per induzione. [TODO: Esercizio] \square

Corollario. 5 Date $u_n: R \rightarrow \mathbb{C}$ di classe C^k con $k = 1, \dots, +\infty$ tali che

$$\forall \underline{h} \text{ con } |\underline{h}| \leq k \quad \sum_n \|D^{\underline{h}} u_n\| < +\infty$$

allora $u := \sum_n u_n$ è una funzione ben definita su R e C^k e $D^{\underline{h}} u = \sum_n D^{\underline{h}} u_n$ per ogni \underline{h} con $|\underline{h}| \leq k$.

Lemma. 6 Data $u: R \rightarrow \mathbb{C}$ e rettangoli $R_i \subset R$ relativamente aperti in R tali che u è C^k sugli R_i per ogni i allora u è di classe C^k su $\tilde{R} := \bigcup_i R_i$.

Dimostrazione. Intuitivamente essere C^k è una proprietà locale ma preso $x \in R \implies \exists i \ x \in R_i$ e dunque segue per l'ipotesi sugli R_i . \square

Lemma. 7 Data $f \in L^2((-\pi, \pi); \mathbb{C})$

$$f \text{ è reale q.o.} \iff c_{-n}(f) = \overline{c_n(f)}$$

Osservazione. Notiamo che se $f \in L^1$ la freccia $\boxed{\Leftarrow}$ è molto più difficile.

Dimostrazione Teorema 1.

- i) u_0 reale $\implies c_{-n}^0 = \overline{c_n^0} \implies c_{-n}^0 e^{-(-n)^2 t} = \overline{c_n^0 e^{-n^2 t}} \iff c_{-n}(u(t, \cdot)) = \overline{c_n(u(t, \cdot))}$.
- ii) Sia $R := [0, +\infty) \times \mathbb{R}$, $\|u_n\|_{L^\infty(R)} = \|c_n^0 e^{-n^2 t}\|_{L^\infty(R)} = |c_n^0|$ dunque $\sum_{n \in \mathbb{Z}} u_n$ converge totalmente su R e quindi u è ben definita e continua su R .
- iii) Presi $h, k = 0, 1, 2, \dots$ se proviamo a calcolare $D_t^h D_x^k u_n = c_n^0 (-n)^{2h} (in)^k e^{-n^2 t} e^{inx}$ vediamo non si riesce a stimare per $t \rightarrow 0$ infatti

$$\|D_t^h D_x^k u_n\|_{L^\infty(R)} = |c_n^0| \cdot |n|^{2h+k} \xrightarrow{n} \infty.$$

Serve prendere $\delta > 0$ e sia $R_\delta := (\delta, +\infty) \times \mathbb{R}$

$$\|D_t^h D_x^k u_n\|_{L^\infty(R_\delta)} = |c_n^0| \cdot |n|^{2h+k} e^{-n^2 \delta}$$

in particolare per ogni h, k abbiamo che $|n|^{2h+k} e^{-n^2 \delta} \xrightarrow{n} 0 \implies |n|^{2h+k} e^{-n^2 \delta} \leq m_{h,k} \implies \|D_t^h D_x^k u_n\|_{L^\infty(R_\delta)} \leq m_{h,k} \cdot |c_n^0|$ e quindi $\sum_n D_t^h D_x^k u_n$ converge totalmente su R_δ .

Quindi u è C^∞ su R_δ per ogni $\delta > 0$ e siccome R_δ è aperto in R per il Lemma. 6 u è C^∞ su $\bigcup_{\delta > 0} R_\delta = (0, +\infty) \times \mathbb{R}$.

- iv) Essendo che u è 2π -periodica in x , valgono le condizioni al bordo; inoltre u_0 e $u(0, \cdot)$ hanno gli stessi coefficienti di Fourier, dunque $u_0 = u(0, \cdot)$ quasi ovunque, ma essendo continue vale $u_0 = u(0, \cdot)$ su $[-\pi, \pi]$; infine, $(u_n)_t = (u_n)_{xx} \implies \sum (u_n)_t = \sum (u_n)_{xx} \implies u_t = u_{xx}$ per $t > 0$.

□

Ora enunciamo il teorema di unicità, vogliamo un teorema con il minor numero di ipotesi possibile e che ci dà più informazioni; quindi in questo caso cerchiamo la più grande famiglia di funzioni (quindi la meno regolare possibile) sulla quale vale l'unicità della soluzione.

Teorema. 2 (Unicità) Sia $u: [0, T) \times [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ continua, C^1 nel tempo e C^2 nello spazio per $t > 0$. Se u risolve (P) su $t > 0$ allora u è unica.

Definizione. Dato R un rettangolo e $u: R \rightarrow \mathbb{C}$ diciamo che u è C^k nella variabile x_i se $\left(\frac{\partial}{\partial x_i}\right)^h u$ esiste per $h = 1, \dots, k$ ed è continua su R .

Lemma. 8 Data $u: I \times [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ di classe C^k in $t \implies c_n(D_t^h u(t, \cdot)) = D_t^h c_n(u(t, \cdot))$ per $h \leq k$.

Dimostrazione.

$$c_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u(t, x) e^{-inx} dx \implies \dot{c}_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} u_t(t, x) e^{-inx} dx = c_n(u_t(t, \cdot))$$

per il teorema di derivazione sotto il segno di integrale (Analisi 2?) □

Dimostrazione Teorema 2. Poniamo $c_n(t) := c_n(u(t, \cdot))$. Sappiamo che per $t > 0$ vale $\dot{c}_n(t) \stackrel{(*)}{=} c_n(u_t(t, \cdot)) \stackrel{(**)}{=} c_n(u_{xx}(t, \cdot)) = -n^2 c_n(t)$, dove $(*)$ segue dal Lemma 8 e $(**)$ segue dalla regolarità dei coefficienti. Dunque i coefficienti c_n risolvono il problema di Cauchy

$$\begin{cases} \dot{y} = -n^2 y \\ y(0) = c_n^0 \end{cases}$$

che ha un'unica soluzione.

Nota. Sia $y: [0, T) \rightarrow \mathbb{R}^k$ funzione continua su $[0, T)$ e derivabile su $(0, T)$ che risolve l'equazione differenziale ordinaria $\dot{y} = f(t, y)$ su $(0, T)$ con $f: [0, T) \times \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^k$ continua. Allora y è C^1 su $[0, T)$ e risolve $\dot{y} = f(t, y)$ su $[0, T)$.

Dalla nota sopra otteniamo che c_n è unico. \square

Notazione. $\mathcal{C}_{\text{per}}^k = \{f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C} \text{ } \pi\text{-periodiche e } \mathcal{C}^k\}$.

Teorema 3 (di non esistenza nel passato). Esiste $u_0 \in \mathcal{C}_{\text{per}}^\infty$ tale che per ogni $\delta > 0$ non esiste $u: (-\delta, 0] \times [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ soluzione di (P) (u continua, \mathcal{C}^1 in t e \mathcal{C}^2 in x per $t < 0$)

Dimostrazione. Sia u su $(-\delta, 0) \times [-\pi, \pi]$ un'eventuale soluzione. Sia $c_n(t)$ al solito. Dalla dimostrazione del Teorema 2 abbiamo che c_n risolve (P').

Quindi $c_n(t) = c_n^0 e^{-n^2 t}$. Scegliamo c_n^0 (cioè u_0) in modo che

- $c_n^0 = O(|n|^{-a})$ per $n \rightarrow \pm\infty$ per ogni $a > 0$. ($\Rightarrow \sum |n|^k |c_n^0| < +\infty \quad \forall k \Rightarrow u_0 \in \mathcal{C}_{\text{per}}^\infty$).
- $c_n^0 e^{-n^2 t} \not\rightarrow 0$ per ogni $t < 0$.

Con un tale c_n^0 la soluzione non esiste al tempo t . Infatti, se per assurdo esistesse, i coefficienti di Fourier $c_n(t)$ sarebbero quadrato sommabili, ovvero dovrebbero tendere a zero $\not\Leftarrow$.

Prendiamo $c_n^0 = e^{-|n|}$. \square

Esercizio. Dato u_0 sia T_* il massimo T per cui (P) ammette soluzione su $(-T, 0] \times [-\pi, \pi]$. Caratterizzare T_* in termini del comportamento asintotico di c_n^0 per $n \rightarrow \pm\infty$.

Suggerimento. Guardare $\log(|c_n^0|)/n^2$.

5.3 Equazione delle onde

Sia $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ aperto, I intervallo temporale, $u: I \times \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$, l'equazione delle onde è

$$u_{tt} = v^2 \nabla u = \nabla_x u = \sum_{i=1}^d \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}$$

dove v si chiama **velocità di propagazione**.

La soluzione è univocamente determinata specificando

- Le condizioni al bordo (come per il calore), ad esempio quelle di Dirichlet: $u = v_0$ su $I \times \partial\Omega$ oppure di Neumann: $\partial u / \partial \nu = 0$ su $I \times \partial\Omega$.
- Condizioni iniziali: $u(0, \cdot) = u_0, u_t(0, \cdot) = u_1$.

Esempio 1. Per $d = 1$, $\Omega = [0, 1]$ rappresenta una sbarra sottile di materiale elastico. La sbarra è soggetta a vibrazioni longitudinali (onde sonore). La funzione $u(t, x)$ rappresenta lo spostamento dalla posizione di riposo x al tempo t . In tal caso, l'equazione delle onde è

$$u_{tt} = v^2 u_{xx}.$$

Esempio 2. Per $d = 2$, Ω rappresenta una sbarra sottile di materiale elastico che vibra trasversalmente. La funzione $u(t, x)$ rappresenta lo spostamento verticale del punto di coordinata

$x \in \Omega$ a riposo. Allora u soddisfa¹

$$u_{tt} = v^2 \nabla v.$$

5.4 Risoluzione dell'equazione delle onde

Consideriamo il caso uno dimensionale. In tal caso l'equazione delle onde è la seguente.

$$\begin{cases} u_{tt} = v^2 u_{xx} \\ u(\cdot, \pi) = u(\cdot, -\pi) \\ u_x(\cdot, \pi) = u_x(\cdot, -\pi) \\ u(0, \cdot) = u_0 \\ u_t(0, \cdot) = u_1 \end{cases} \quad (P)$$

5.4.1 Risoluzione formale

Scriviamo $u(t, x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n(t) e^{inx}$. Deriviamo in t e due volte in x .

$$\begin{aligned} u_{tt} &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} \ddot{c}_n e^{inx} \\ u_{xx} &= \sum_{n \in \mathbb{Z}} -v^2 n^2 c_n e^{inx} \end{aligned}$$

Abbiamo che

$$\begin{aligned} u_{tt} = v^2 u_{xx} &\iff \ddot{c}_n = -v^2 n^2 c_n \\ u(0, \cdot) = u_0 &\iff c_n(0) = c_n^0 := c_n(u_0) \quad u_t(0, \cdot) = u_1 \iff \dot{c}_n(0) = c_n^1 := c_n(u_1) \end{aligned}$$

Quindi u risolve (P) se e solo se per ogni n , c_n risolve

$$\begin{cases} \ddot{y} = -n^2 v^2 y \\ y(0) = c_n^0 \\ \dot{y}(0) = c_n^1 \end{cases} \quad (P')$$

Dunque,

- Per $n = 0$, $\ddot{y} = 0$ se e solo se y è un polinomio di primo grado, ovvero $c_0(t) = c_0^0 + c_0^1 t$.
- Per $n \neq 0$, $y = \alpha_n^+ e^{inv t} + \alpha_n^- e^{-inv t}$ con

$$\alpha_n^\pm = \frac{1}{2} \left(c_n^0 \pm \frac{c_n^1}{inv} \right)$$

Quindi, la soluzione è

$$u(t, x) = c_0^0 + c_0^1 t + \sum_{n \neq 0} \left[\alpha_n^+ e^{in(x+vt)} + \alpha_n^- e^{in(x-vt)} \right] \quad (*)$$

Inoltre,

$$u(t, x) = c_0^0 + c_0^1 t + \varphi^+(x + vt) + \varphi^-(x - vt) \quad (**)$$

con φ^\pm funzioni con coefficienti di Fourier α_n^\pm che si dicono **onde viaggianti**.

Nota. La (**) è specifica delle equazioni delle onde.

¹Per oscillazioni piccole.

5.5 Risoluzione dell'equazione delle onde

Consideriamo il problema

$$\begin{cases} u_{tt} = v^2 u_{xx} \\ u(\cdot, \pi) = u(\cdot, -\pi) \\ u_x(\cdot, \pi) = u_x(\cdot, -\pi) \\ u(0, \cdot) = u_0 \\ u_t(0, \cdot) = u_1 \end{cases} \quad (\text{P})$$

ed abbiamo visto che ha soluzione

$$u(t, x) = c_0^0 + c_0^1 t + \sum_{n \neq 0} (\alpha_n^+ e^{in(x+vt)} + \alpha_n^- e^{in(x-vt)}) \quad (*)$$

$$\alpha_n^\pm = \frac{1}{2} \left(c_n^0 \pm \frac{c_n^1}{inv} \right).$$

Inoltre, possiamo scrivere l'equazione (*) come

$$u(t, x) = c_0^0 + c_0^1 t + \varphi^+(x + vt) + \varphi^-(x - vt) \quad (**)$$

dove φ^+, φ^- sono funzioni 2π -periodiche.

Vedremo i seguenti risultati

- Esistenza usando la forma (**), specifico per equazione delle onde.
- Esistenza usando la forma (*), che però richiede maggiore regolarità su u_0 e u_1 .
- Unicità.

Teorema 1. Dati $u_0 \in C_{\text{per}}^1$ allora esistono c_0^0, c_0^1 e $\varphi^+, \varphi^- \in C_{\text{per}}^2$ tali che la u in (**) è di classe C^2 su $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$, 2π -periodica in x e risolve (P).

Lemma 4. Date $h, g \in C^1(\mathbb{R})$ con g primitiva di h e $T > 0$ allora g è T -periodica $\iff h$ è T -periodica e $\int_0^T h(x) dx = 0$.

Dimostrazione. Notiamo che h è T -periodica se e solo se $\forall x \int_x^{T+x} h(x) dx = \text{cost.}$

$$\int_x^{T+x} h(x) dx = g \Big|_x^{T+x} = g(T+x) - g(x) = 0 \iff g \text{ è } T\text{-periodica}$$

Dimostrazione Teorema 1.

Parte 1. Se $c_0^0, c_0^1 \in \mathbb{R}$ e $\varphi^+, \varphi^- \in C_{\text{per}}^2$ allora la u data da (**) è C^2 su $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ e 2π -periodica in x e risolve $u_{tt} = v^2 u_{xx}$.

$$\begin{aligned} u_{tt} &= [\ddot{\varphi}^+(x + vt) + \ddot{\varphi}^-(x - vt)]v^2 \\ u_{xx} &= \ddot{\varphi}^+(x + vt) + \ddot{\varphi}^-(x - vt) \end{aligned} \implies u_{tt} = v^2 u_{xx}$$

Parte 2. $\exists c_0^0, c_0^1 \in \mathbb{R}$ e $\varphi^+, \varphi^- \in C_{\text{per}}^2$ tali che la u data da (**) soddisfa la condizione iniziale in (P), per $t = 0$, poste $\varphi^\pm = \varphi^\pm(x \pm v0)$

$$\begin{cases} c_0^0 + \varphi^+ + \varphi^- = u_0 \\ c_0^1 + v(\dot{\varphi}^+ - \dot{\varphi}^-) = u_1 \end{cases} \implies \begin{cases} \varphi^+ + \varphi^- = u_0 - c_0^0 \\ (\varphi^+ - \varphi^-)' = (u_1 - c_0^1)/v \end{cases}$$

ed ora fissiamo $c_0^0 = \oint_{-\pi}^{\pi} u_0 dx$ e $c_0^1 = \oint_{-\pi}^{\pi} u_1 dx$. In questo modo possiamo applicare il lemma precedente ed ottenere

$$\begin{cases} \varphi^+ + \varphi^- = g_0 \\ (\varphi^+ - \varphi^-)' = g_1' \end{cases} \implies \varphi^+ = \frac{1}{2}(g_0 + g_1) \quad \varphi^- = \frac{1}{2}(g_0 - g_1)$$

□

Teorema 2. Siano $u_0, u_1 \in C_{\text{per}}^0$ tali che $\sum n^2 |c_n^0| < +\infty$ e $\sum |n| \cdot |c_n^1| < +\infty$. Allora (*) definisce una funzione $u: \mathbb{R} \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ di classe C^2 , 2π -periodica in x che risolve (P).

Dimostrazione.

$$u(t, x) = c_0^0 + c_0^1 t + \sum_{n \neq 0} \left(\underbrace{\alpha^+ e^{in(x+vt)}}_{v_n^+} + \underbrace{\alpha^- e^{in(x-vt)}}_{v_n^-} \right)$$

Passo 1. Dimostriamo che $u \in C^0(\mathbb{R} \times \mathbb{R})$ e 2π -periodica in x .

La funzione u soddisfa le condizioni di periodicità. Per mostrare la continuità è sufficiente mostrare che la serie converge totalmente su $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$.

$$\|v_n^\pm\|_{L^\infty(\mathbb{R} \times \mathbb{R})} = |\alpha^\pm| = O\left(|c_n^0| + \frac{|c_n^1|}{n}\right)$$

che sono sommabili in n .

Passo 2. Mostriamo che $u \in C^2(\mathbb{R} \times \mathbb{R})$.

Abbiamo

$$\begin{aligned} D_t^h D_x^k v_n^\pm &= \alpha_n^\pm e^{in(x \pm vt)} (in)^k (ivn)^h \\ \implies \|D_t^h D_x^k v_n^\pm\|_{L^\infty(\mathbb{R} \times \mathbb{R})} &= |\alpha_n^\pm| \cdot |v|^h \cdot |n|^{k+h} = O(|c_n^0| \cdot |n|^{k+h} + |c_n^1| \cdot |n|^{k+h-1}) \end{aligned}$$

che è sommabile se $k + h \leq 2$ in n . La serie in (*) converge totalmente su $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$ con tutte le derivate di ordine $\leq 2 \implies u \in C^2$.

Passo 3. Dimostriamo che u risolve l'equazione $u_{tt} = v^2 u_{xx}$.

u risolve l'equazione perché derivata e serie commutano e per come abbiamo impostato (P') $c_n(u(0, \cdot)) = c_n(u_0) \implies u(0, \cdot) = u_0$. $c_n(u_t(0, \cdot)) = c_n(u_1) \implies u_t(0, \cdot) = u_1$.

Teorema 3. (Unicità) Se $u: I \times [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{C}$ è C^2 in x e t e risolve (P) allora è unica.

Dimostrazione. Si ripercorre la stessa dell'equazione del calore. Dimostriamo che i coefficienti $c_n(t) = c_n(u(t, \cdot))$ definiti per $t \in I$ risolvono (P')...

5.6 Altre applicazioni della serie di Fourier

5.6.1 Disuguaglianza isoperimetrica

Sia D un aperto limitato con frontiera C^1 parametrizzata da un unico cammino γ (quindi niente buchi o più di una componente connessa). Allora $L^2 \geq 4\pi A$ dove L è la lunghezza di ∂D e A è l'area di D . Inoltre vale l'uguale se e solo se D è un disco.

Dimostrazione.

Possiamo scegliere $\gamma: [-\pi, \pi] \rightarrow \mathbb{R}^2 \simeq \mathbb{C}$ e γ parametrizzazione di ∂D in senso antiorario ed a velocità costante (da cui $|\dot{\gamma}(t)| = L/2\pi$)

Passo 1.

$$L^2 = 2\pi \int_{-\pi}^{\pi} |\dot{\gamma}|^2 dt = 2\pi \|\dot{\gamma}\|_2^2 = 4\pi^2 \sum |c_n(\dot{\gamma})|^2 = 4\pi^2 \sum n^2 |c_n|^2$$

Passo 2.

$$A \stackrel{(*)}{=} \frac{1}{2} \langle -i\dot{\gamma}, \gamma \rangle = \frac{1}{2} 2\pi \sum (-i(nc_n))c_n = \pi \sum n|c_n|^2$$

Vediamo che vale questa formula per l'area usata in (*), poniamo $\gamma = \gamma_x + i\gamma_y$ allora

$$\begin{aligned} \langle \dot{\gamma}, \gamma \rangle &= \int_{-\pi}^{\pi} \dot{\gamma} \bar{\gamma} dt \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} (\gamma_x - i\gamma_y)(\dot{\gamma}_x + i\dot{\gamma}_y) dt = \\ &= \int_{\gamma} (x - iy)(dx + i dy) = \\ &= \int_D 2i dx dy = 2iA \end{aligned}$$

Passo 3. Infine $L^2 = 4\pi \sum n^2 |c_n|^2$ e $4\pi A = 4\pi \sum n |c_n|^2$, dunque segue subito che $L^2 \geq 4\pi A$ e vale l'uguale se e solo se $n^2 = n$ o se $c_n = 0$ per ogni $n \implies \gamma(t) = c_0 + c_1 e^{it}$ che è una circonferenza di centro c_0 e raggio $|c_1|$.

5.7 Appendice

Studiamo alcune variazioni dell'equazione del calore.

Nota. Un problema del tipo $u_t = a(t) \cdot u_{xx}$ si può risolvere ripercorrendo i passaggi della risoluzione dell'equazione del calore. Viceversa, il problema $u_t = a(x) \cdot u_{xx}$ non si può risolvere allo stesso modo, in quanto, non è vero che il prodotto di serie di Fourier ha come coefficienti il prodotto dei coefficienti.

Studiamo ora variazioni alle condizioni di bordo.

Osservazione. Quando proviamo a risolvere $u_t = u_{xx}$, passiamo alla serie di Fourier e deriviamo; per fare questo passaggio servono le condizioni al bordo¹; dunque, togliendo le condizioni di periodicità il sistema non funziona più molto bene.

Introduciamo delle varianti della serie di Fourier.

- **Serie di Fourier su $[-\pi, \pi]^d$.** Data $u \in L^2([-\pi, \pi]^2, \mathbb{C})$, definiamo

$$u(x) = \sum_{\underline{n} \in \mathbb{Z}^d} \underline{c}_n e^{i\underline{n}x} \quad \underline{c}_n = \underline{c}_n(u) := \frac{1}{(2\pi)^d} \int_{[-\pi, \pi]^d} u(x) e^{-i\underline{n}x} dx$$

con base di Hilbert

$$\mathcal{F} = \left\{ \frac{e^{i\underline{n}x}}{(2\pi)^{d/2}} : n \in \mathbb{Z}^d \right\}$$

¹Anche se avevamo derivato le formule formalmente anche a posteriori l'ipotesi delle condizioni al bordo era necessaria.

C'è da dimostrare che \mathcal{F} è una base di Hilbert.

Dimostrazione (idea).

- Ortonormalità. È un conto [TO DO].
- Completezza. Si può dimostrare come per $d = 1$, oppure si usa il seguente lemma.
Lemma. Sia $\mathcal{F}_1 := \{e_n^1\}$ base di Hilbert di $L^2(X_1, \mathbb{C})$ e $\mathcal{F}_2 := \{e_n^2\}$ base di Hilbert di $L^2(X_2, \mathbb{C})$. Allora, una base di Hilbert di $L^2(X_1 \times X_2, \mathbb{C})$ è

$$\mathcal{F} = \left\{ e_{n_1, n_2}(x_1, x_2) \mid e_{n_1}^1(x_1) e_{n_2}^2(x_2) \right\}$$

Formula chiave. Se $u \in C_{\text{per}}^1(\mathbb{R}^d) = \{\text{funzioni } 2\pi\text{-periodiche in tutte le variabili}\}$. Abbiamo che

$$c_{\underline{n}}(\nabla u) = i\underline{n}c_{\underline{n}}(u), \quad c_{\underline{n}}(\Delta u) = -|\underline{n}|^2 c_{\underline{n}}(u) \quad \text{se } u \in \mathcal{C}_{\text{per}}^2$$

- **Serie in seni.** Data $u \in L^2([0, \pi])$, allora

$$u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(nx) \quad b_n = b_n(u) := \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(x) \sin(nx) dx$$

con base di Hilbert

$$\mathcal{F} = \left\{ \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sin(nx) \mid n \geq 1 \right\}$$

Dimostrazione. Mostriamo l'ortonormalità e la completezza.

Ortonormalità. Sono conti. [TO DO]

Completezza. Data $u \in L^2([0, \pi])$. Sia \tilde{u} l'estensione dispari a $[-\pi, \pi]$. Allora

$$\tilde{u} = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{a}_n \cos(nx) + \tilde{b}_n \sin(nx) \underset{\tilde{u} \text{ dispari}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \tilde{b}_n \sin(nx).$$

Osservazione. I coefficienti $\tilde{b}_n = b_n$. Si può vedere in diversi modi, un modo possibile è questo.

$$\tilde{b}_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tilde{u}(x) \sin(nx) dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \tilde{u} \sin(nx) dx = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(x) \sin(nx) dx = b_n.$$

Formula chiave. Data $u \in \mathcal{C}^2([0, \pi])$ con condizioni al bordo $u(\cdot, 0) = u(\cdot, \pi)$. Allora

$$b_n(\ddot{u}) = -n^2 b_n(u)$$

dove

$$\begin{aligned} b_n(\ddot{u}) &:= \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \ddot{u}(x) \sin(nx) dx \\ &= \frac{2}{\pi} |\dot{u}(x) \sin(nx)|_0^{\pi} - \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \dot{u}(x) \cos(nx) dx \\ &= -n \frac{2}{\pi} |u(x) \cos(nx)|_0^{\pi} - n^2 \underbrace{\left(\frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(x) \sin(nx) dx \right)}_{b_n(x)} \end{aligned}$$

□

Applicazione (della serie in seni). Risoluzione di EDP su $[0, \pi]$ con condizioni di Dirichlet (omogenee) al bordo.

Esempio. Risolvere

$$\begin{cases} u_t = u_{xx} & \text{su } [0, \pi] \\ u(\cdot, 0) = u(\cdot, \pi) = 0 \\ u(0, \cdot) = u_0 \end{cases} \quad (\text{P})$$

Soluzione. Poniamo $b_n^0 := b_n(u_0)$. Scriviamo $u(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n(t) \sin(nx)$ serie di seni in x .

Formalmente,

$$u_t = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{b}_n(t) \sin(nx) \quad u_{xx} = \sum_{n=1}^{\infty} -n^2 b_n(t) \sin(nx)$$

Dunque,

$$u_t = u_{xx} \iff \dot{b}_n(t) = -n^2 b_n(t) \quad \forall t \forall n$$

Cioè $b_n(t)$ risolve il problema di Cauchy.

$$\begin{cases} \dot{y} = -n^2 y \\ y(0) = \dot{b}_n \end{cases} \quad (\text{P}')$$

Ovvero $b_n(t) = b_n^0 e^{-n^2 t}$, da cui

$$u(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \underbrace{b_n^0 e^{-n^2 t} \sin(nx)}_{u_n}. \quad (*)$$

Teorema 1 (di esistenza nel futuro). Se $u_0: [0, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$ è continua è $\sum_n |b_n^0| < +\infty$ (basta $u_0 \in \mathcal{C}^1$ e $u(0) = u(\pi) = 0$). Allora la u in $(*)$ è ben definita e continua su $[0, +\infty) \times \mathbb{R}$ e risolve (P).

Dimostrazione. Dimostriamo il teorema per passi.

Passo 1. Mostriamo che u è ben definita e continua su $(0, +\infty) \times \mathbb{R}$: studiamo la norma del sup. Sia $R = [0, +\infty) \times \mathbb{R}$.

$$\|u_n\|_{L^\infty(R)} \leq |b_n^0| \implies u_n \text{ converge totalmente su } \mathbb{R}.$$

Passo 2. Mostriamo che \mathcal{C}^∞ su $(0, +\infty) \times \mathbb{R}$. Sia $R_\delta = (\delta, +\infty) \times \mathbb{R}$. Stimiamo le derivate.

$$\begin{aligned} D_t^k D_x^h u_n &= b_n^0 (-n^2)^k e^{-n^2 t} \cdot n^h \cdot \underbrace{\quad}_{\star} \\ \implies \|D_t^k D_x^h u_n\|_{L^\infty(R_\delta)} &= |b_n^0| \underbrace{e^{-n^2 \delta} \cdot |n|^{2k+h}}_{\substack{\text{limitato in } n \\ \text{perché è infinitesimo in } n}} \end{aligned}$$

Allora le norme delle derivate sono sommabili per ogni n , dunque $u \in \mathcal{C}^\infty(R_\delta)$ per ogni δ , da cui $u \in \mathcal{C}^\infty((0, +\infty), \mathbb{R})$.

Passo 3. Mostriamo che la $u(t, x)$ definita in $(*)$ risolve (P).

- u risolve $u_t = u_{xx}$ per $t > 0$. Infatti, l'equazione è lineare per quanto mostrato al punto sopra e dunque posso scambiare serie e derivata.

- u soddisfa la condizione iniziale $u(0, \cdot) = u_0$, perché hanno gli stessi coefficienti di Fourier.
- Sono soddisfatte anche le condizioni al bordo, infatti

$$u(\cdot, 0) = u(\cdot, \pi) = 0$$

□

Domanda. Quale ipotesi su u_0 garantisce $\sum_n |b_n^0| < +\infty$? Basta $u_0 \in \mathcal{C}^1$ e $u(0) = u(\pi) = 0$.

Teorema 2 (non esistenza nel passato). Esiste $u_0: [0, \pi] \rightarrow \mathbb{R} \mathcal{C}^\infty$ (+ condizioni al bordo) tale che per ogni $\delta > 0$ (P) non ha alcuna soluzione $u: (-\delta, 0] \times [0, \pi] \rightarrow \mathbb{R}$ continua e \mathcal{C}^1 in t e \mathcal{C}^2 in x .

Teorema 3 (di unicità). [TO DO: aggiungere (è sempre lo stesso).]

5.7.1 Considerazioni finali su SdF e serie in seni

Notiamo che l'efficacia per la soluzione di certe EDP dipende dal fatto che

$$c_n(u) = inc_n(u) \quad b_n(\ddot{u}) = -n^2 b_n(u)$$

che segue (almeno formalmente) da $(e^{inx})' = ine^{inx}$ e $(\sin(nx))'' = -n^2 \sin(nx)$.

Cioè che $\{e^{inx}/\sqrt{2\pi}\}$ è una base ortonormale di $L^2([-\pi, \pi], \mathbb{C})$ di autovettori di D e $\{\sqrt{2/\pi} \sin(x)\}$ è una base ortonormale di autovettori di D^2 .

Analogamente per risolvere $u_t = \Delta u$ su Ω , basterebbe avere $\{e_n\}$ base ortonormale di $L^2(\Omega)$ fatta di autovettori del laplaciano.

Per avere una base ortonormale di autovettori di un operatore T serve che T sia autoaggiunto (almeno in dimensione finita).

Definizione. Dato H spazio di Hilbert complesso o reale, D sottospazio denso di H , $T: D \rightarrow H$ lineare (non necessariamente continuo), dico che T è **autoaggiunto** se $\langle Tx, y \rangle = \langle x, Ty \rangle$ per ogni $x, y \in D$.

Proposizione. Dato T come sopra

- Se λ è autovalore di T (ovvero tale che $\exists x \neq 0$ tale che $Tx = \lambda x$) allora λ è reale.
- Dati $\lambda_1 \neq \lambda_2$ autovalori allora $V_{\lambda_1} \perp V_{\lambda_2}$ dove $V_\lambda := \{x \mid Tx = \lambda x\}$.

Nota. In dimensione infinita manca un teorema spettrale, ovvero tale che $\overline{\bigoplus_\lambda V_\lambda} = H$.

Esempio 1. Sia $H = L^2([-\pi, \pi], \mathbb{C})$, $D = \{u \in \mathcal{C}^2(-\pi, \pi) \mid u(-\pi) = u(\pi)\}$ e $T: D \rightarrow H$ tale che $u \mapsto iu$. Mostrare che

- T è autoaggiunto
- Gli autovalori di T sono $\lambda_n = n$ con $n \in \mathbb{Z}$ $V_{\lambda_n} = V_n = \text{Span}\{e^{inx}\}$.
- T non è continuo

In questo caso esiste una base ortonormale di L^2 di autovettori di T . [TO DO: aggiustare].

Dimostrazione.

i) Dati $u, c \in D(= \mathcal{C}_{\text{per}}^1)$, allora

$$\begin{aligned}\langle Tu, v \rangle &= \int_{-\pi}^{\pi} i\dot{u}\bar{v} \, dx = |iu\bar{v}|_{-\pi}^{\pi} - \int_{-\pi}^{\pi} iu\bar{v} \, dx \\ &= \int_{-\pi}^{\pi} u\bar{i\dot{v}} \, dx = \langle u, Tv \rangle\end{aligned}$$

ii) Questo è un esercizio di equazioni differenziali ordinarie. Risolviamo il problema

$$\begin{cases} -iu = \lambda u & \text{su } [-\pi, \pi] \\ u(\pi) = u(-\pi) \end{cases}$$

da cui $\dot{u} - i\lambda u = 0$, che ha polinomio associato $t - i\lambda = 0$ con radice $i\lambda$. In conclusione la soluzione del problema sopra è $\alpha e^{i\lambda x}$.

Dalla condizione al bordo abbiamo che $\alpha e^{i\lambda\pi} = e^{-i\lambda\pi}$ dunque $e^{i\lambda\pi} = e^{-i\lambda\pi} \iff e^{2i\lambda\pi} = 1 \iff \lambda \in \mathbb{Z}$.

iii) Siccome gli autovalori sono illimitati, T non è continuo. □

Esempio 3. Sia $H = L^2([-\pi, \pi], \mathbb{C})$ $D = \{u \in \mathcal{C}^1(-\pi, \pi)\}$ e $T: D \rightarrow H$ tale che $u \mapsto i\dot{u}$.

Dimostrazione. Dati $u, v \in D$ abbiamo

$$\begin{aligned}\langle Tu, v \rangle &= \int_{-\pi}^{\pi} i\dot{u}\bar{v} \, dx = |iu\bar{v}|_{-\pi}^{\pi} - \int_{-\pi}^{\pi} iu\bar{v} \, dx \\ &= i(u(\pi)\bar{v}(\pi) - u(-\pi)\bar{v}(-\pi)) + \langle u, Tv \rangle \neq \langle u, Tv \rangle.\end{aligned}$$

In quanto, in generale, il termine $u(\pi)\bar{v}(\pi) - u(-\pi)\bar{v}(-\pi)$ è diverso da zero.

Esercizio. Cercare $T: L^2([0, 1]) \rightarrow L^2([0, 1])$ continuo autoaggiunto senza autovalori.

Suggerimento. Cercare T del tipo $T: u \mapsto gu$ con $g \in L^\infty$.

Capitolo 6

Trasformata di Fourier

Data $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ poniamo

$$f(x) \stackrel{(*)}{=} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(y) e^{iyx} dy \quad \hat{f}(y) := \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-iyx} dx.$$

Dove \hat{u} si chiama *trasformata di Fourier*¹ di u e la formula $(*)$ si dice *formula di inversione*.

Derivazione formale (della formula di inversione). Prendiamo $f \in \mathcal{C}_C^1(\mathbb{R}, \mathbb{C})$ e $\delta > 0$ tale che $\text{supp}(f) \subset [-\pi/\delta, \pi/\delta]$.

Scriviamo f in serie di Fourier su $[-\pi/\delta, \pi/\delta]$ (serve un cambio di variabile per ricondursi alla serie di Fourier su $[-\pi, \pi]$).

$$f(x) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} c_n^\delta(f) e^{in\delta x}$$
$$c_n^\delta(f) := \frac{\delta}{2\pi} \int_{-\pi/\delta}^{\pi/\delta} f(x) e^{-in\delta x} dx = \frac{\delta}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-in\delta x} dx = \frac{\delta}{2\pi} \hat{f}(n\delta).$$

Dunque,

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{\delta}{2\pi} \underbrace{\hat{f}(n\delta) e^{i(n\delta)x}}_{\hat{f}(y) e^{iyx} \text{ calcolata in } y=n\delta}$$

dove $\sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{\delta}{2\pi} \hat{f}(n\delta) e^{i(n\delta)x}$ è la somma di Riemann di $\int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(y) e^{iyx} dy$. Dunque

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \sum_{n \in \mathbb{Z}} \frac{\delta}{2\pi} \hat{f}(n\delta) e^{i(n\delta)x} \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{f}(y) e^{iyx} dy.$$

Quest'ultimo passaggio non è giustificato rigorosamente ma si può rendere rigoroso per $f \in \mathcal{C}_C^1(\mathbb{R})$.

Definizione. Data $f \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ la **trasformata di Fourier** \hat{f} è definita da

$$\hat{f}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-ixy} dx \quad \forall y \in \mathbb{R}.$$

¹Sostituisce la serie di Fourier quando si passa da funzioni su \mathbb{R} 2π -periodiche a funzioni su \mathbb{R} .

Teorema. Data $f \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$, allora

- i) \widehat{f} è ben definita in ogni punto di \mathbb{R} .
- ii) Vale $\|\widehat{f}\|_\infty \leq \|f\|_1$.
- iii) \widehat{f} è continua
- iv) \widehat{f} è infinitesima.

Dimostrazione.

- i) $\widehat{f}(y)$ è ben definita per ogni $y \in \mathbb{R}$. Infatti, $f(x)e^{-iyx} \in L^1$ dato che

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(x)e^{-iyx}| dx = \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)| dx = \|f\|_1.$$

- ii) $\|\widehat{f}\|_\infty \leq \|f\|_1$. Infatti,

$$|\widehat{f}|_\infty \leq \int |f(x)e^{-iyx}| dx = \|f\|_1$$

- iii) \widehat{f} è continua. Se $y_n \rightarrow y$, allora

$$\widehat{f}(y_n) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ixy_n} dx \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-iny} dx = \widehat{f}(y)$$

per convergenza dominata. Infatti, la convergenza puntuale segue dalla continuità dell'esponenziale; mentre la dominazione è data da $|f(x)e^{-ixy_n}| = |f(x)|$.

- iv) $\widehat{f}(y) \xrightarrow{y \rightarrow \pm\infty} 0$ per il lemma di Riemann-Lebesgue.

□

6.1 Proprietà della trasformata di Fourier

Data $f \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ abbiamo posto

$$\forall y \in \mathbb{R} \quad \mathcal{F}(f)(y) = \widehat{f}(y) := \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-iyx} dx$$

ed abbiamo visto che

Teorema 1. $\widehat{f} \in C_0(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ e $\|\widehat{f}\|_\infty \leq \|f\|_1$.

Proposizione 2. Data $f \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ allora

- i) $\forall h \in \mathbb{R}$ vale $\widehat{\tau_h f} = e^{-ihy} \widehat{f}$
- ii) $\forall h \in \mathbb{R}$ vale $\widehat{e^{ihx} f} = \tau_h \widehat{f}$
- iii) $\forall \delta \neq 0$ vale $\widehat{\sigma_\delta f} = \widehat{f}(\delta y)$

Derivazione. Partendo dalla formula di inversione

$$\begin{aligned} f(x) &= \frac{1}{2\pi} \int \widehat{f}(y) e^{iyx} dy \\ f(x-h) &= \frac{1}{2\pi} \int \underbrace{\widehat{f}(y) e^{-ihy}}_{= \widehat{f(x-h)}} e^{iyx} dy \end{aligned}$$

Dimostrazione. Facciamo il calcolo diretto

$$\begin{aligned} \widehat{\tau_h f} &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-h) e^{-ixy} dx = \\ &= \left(\begin{array}{l} t = x-h \\ dt = dx \end{array} \right) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-i(t+h)y} dt = \\ &= e^{-ihy} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-ity} dt = e^{-ihy} \widehat{f}(t). \end{aligned}$$

Analogamente seguono anche le altre □

Proposizione 3. Sia $f \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ con $f, f' \in L^1$ allora $\widehat{f'} = iy\widehat{f}$ (da confrontare con $c_n(f') = inc_n(f)$ nel caso della serie di Fourier).

Derivazione. Si deriva la formula di inversione

$$f'(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(y) iye^{ixy} dy$$

Dimostrazione. Vediamo prima una dimostrazione che non funziona e cerchiamo di aggiustarla. Abbiamo che

$$\widehat{f'}(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f'(x) e^{-iyx} dx = \underbrace{\left[f(x) e^{-iyx} \right]_{-\infty}^{+\infty}}_{=0} + iy \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-iyx} dx = iy\widehat{f}(y)$$

serve che $f(x) \rightarrow 0$ per $|x| \rightarrow +\infty$ (ad esempio $f \in C \cap L^1$ lo implica), in realtà $f \in C^1$ e $f, f' \in L^1$ basta, ma la dimostrazione è più complicata.

Argomentiamo come segue, $f \in L^1 \implies \liminf_{|x| \rightarrow \infty} |f(x)| = 0$ (in quanto se $\liminf_{|x| \rightarrow \infty} |f(x)| = \delta > 0$ allora la funzione sarebbe $> \delta$ per $|x| \rightarrow +\infty$ ed avrebbe integrale $+\infty$) dunque esistono due successioni $a_n \rightarrow -\infty, b_n \rightarrow +\infty$ tali che $f(a_n) \rightarrow 0$ e $f(b_n) \rightarrow 0$ quindi come prima abbiamo

$$\begin{aligned} \widehat{f'}(y) &= \lim_n \int_{a_n}^{b_n} f'(x) e^{iyx} dx = \\ &= \lim_n \int \mathbb{1}_{[a_n, b_n]} f'(x) e^{iyx} dx = \\ &= \lim_n \left(\underbrace{\left[f(x) e^{-iyx} \right]_{a_n}^{b_n}}_{\rightarrow 0} + iy \int_{a_n}^{b_n} f(x) e^{-iyx} dx \right) = \\ &= \lim_n iy \int_{a_n}^{b_n} f(x) e^{-iyx} dx = \\ &= iy\widehat{f}(y) \end{aligned}$$

□

Proposizione 4. Sia $f \in L^1$ con $xf \in L^1$, allora $\widehat{f} \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ e $(\widehat{f})' = -i\widehat{xf}$.

Dimostrazione.

$$\widehat{f}(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)e^{-ixy} dx \implies (\widehat{f})'(y) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x)(-ix)e^{-ixy} dx = -i\widehat{xf}$$

Proposizione 5. (Derivazione sotto segno di integrale) Sia I un intervallo di \mathbb{R} , E misurabile in \mathbb{R}^d e $g: I \times E \rightarrow \mathbb{C}$ tale che

i) $g(\cdot, x) \in C^1(I)$ per q.o. $x \in E$.

ii) $\exists h_0, h_1 \in L^1(E)$ tali che

$$|g(t, x)| \leq h_0(x) \quad \text{e} \quad \left| \frac{\partial g}{\partial t}(t, x) \right| \leq h_1(x)$$

allora $G(t) := \int_E g(t, x) dx$ è ben definita per ogni $t \in I$ e $G \in C^1(I)$ e

$$G'(t) = \int_E \frac{\partial}{\partial t} g(t, x) dx$$

Traccia dimostrazione.

- *Passo 1:* $G(t)$ e $\tilde{G}(t)$ sono ben definite $\forall t \in I$ (grazie alla dominazione) e continue in t (usando convergenza dominata e le dominazioni)
- *Passo 2:* Dobbiamo far vedere che G è C^1 con derivata \tilde{G} , si usa la seguente forma del teorema fondamentale del calcolo integrale

$$\forall t_0, t_1 \in I \text{ con } t_0 < t_1 \quad G(t_1) - G(t_0) \stackrel{(*)}{=} \int_{t_0}^{t_1} \tilde{G}(t) dt$$

ed usando Fubini-Tonelli in (*).

Proposizione 6. (Prodotto di convoluzione e trasformata di Fourier). Siano $f_1, f_2 \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$, allora $f_1 * f_2 \in L^1$ (già visto) e vale

$$\mathcal{F}(f_1 * f_2) = (\mathcal{F}f_1) \cdot (\mathcal{F}f_2)$$

Dimostrazione.

$$\begin{aligned} \widehat{f_1 * f_2}(y) &= \int f_1 * f_2(x) e^{-ixy} dx = \\ &= \iint f_1(x-t) f_2(t) dt e^{-ixy} dx = \\ &= \int \left(\int f_1(x-t) e^{-i(x-t)y} dx \right) f_2(t) e^{-ity} dt = \\ &= \int \widehat{f_1}(y) f_2(t) e^{-ity} dt = \widehat{f_1}(y) \cdot \widehat{f_2}(y) \end{aligned}$$

Definizione. Data $g \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ definiamo l'**antitrasformata di Fourier** di g la funzione

$$\check{g}(x) := \int_{-\infty}^{+\infty} g(y) e^{ixy} dy.$$

Cioè $\check{g}(x) = \widehat{g}(-x)$ e scriviamo anche $\check{g} = \mathcal{F}^*g$. Effettivamente \mathcal{F}^* è l'aggiunto di \mathcal{F} , almeno formalmente¹ infatti abbiamo

$$\langle \mathcal{F}f, g \rangle = \iint f \overline{e^{ixy}g(y)} dx dy = \int f(x) \overline{\check{g}(x)} dx = \langle f, \mathcal{F}^*g \rangle.$$

Teorema 7. Data $f \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ tale che $\widehat{f} \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ allora

$$\forall x \in \mathbb{R} \quad \mathcal{F}^* \mathcal{F}f = 2\pi f \quad \text{cioè} \quad \int \widehat{f}(x) e^{ixy} dy = 2\pi f(x)$$

Nota. Una funzione continua e infinitesima non è, in generale, una funzione L^1 ; in particolare, l'ipotesi $\widehat{f} \in L^1$ è necessaria e non deriva dalle proprietà già note.

Dimostrazione. *Dimostrazione diretta* (passando dalla Delta di Dirac dei fisici):

$$\begin{aligned} \mathcal{F}^* \mathcal{F}f &= \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(y) e^{iyx} dy = \\ &= \iint f(t) e^{-iyt} dt e^{ixy} dy = \\ &= \int f(t) \underbrace{\int e^{i(x-t)y} dy}_{\text{"}\delta(x-t)\text{"}} dt = f(x) \end{aligned}$$

Dimostrazione vera: scegliamo una funzione ausiliaria $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ tale che

- i) $\varphi(0) = 1$ continua in 0 e φ limitata
- ii) $\varphi \in L^1$
- iii) $\check{\varphi} \in L^1$

e poniamo $g_\delta(x) := \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(y) \varphi(\delta y) e^{ixy} dy$.

- *Passo 1:* $g_\delta(x) \rightarrow \mathcal{F}^* \mathcal{F}f(x)$ per ogni $x \in \mathbb{R}$ per convergenza dominata

$$\int \widehat{f}(y) e^{iyx} \varphi(\delta y) dy \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \int \widehat{f}(y) e^{iyx} dy$$

e come dominazione usiamo $|\widehat{f}(y) e^{iyx} \varphi(\delta y)| \leq |\widehat{f}(y)| \cdot \|\varphi\|_\infty$

- *Passo 2:* $g_\delta(x) = \int \left(\int f(t) e^{-ity} dt \right) e^{ixy} \varphi(\delta y) dy$, per Fubini-Tonelli otteniamo

$$\begin{aligned} &= \iint \varphi(\delta y) e^{i(x-t)y} dy f(t) dt = \\ &= \int \sigma_\delta \check{\varphi}(x-t) f(t) dt = \sigma_\delta \check{\varphi} * f(x). \end{aligned}$$

- *Passo 3:* $g_\delta \rightarrow mf$ in L^1 con $m = \int_{\mathbb{R}} \check{\varphi}(x) dx$ (per il teorema di approssimazione e per ipotesi).

¹In L^1 non è definito il prodotto scalare.

- *Passo 4:* Usando il primo ed il terzo passo otteniamo $\mathcal{F}^* \mathcal{F} f = m f$ per quasi ogni x , in quanto la convergenza puntuale e quella in L^1 devono essere compatibili; in particolare, la convergenza in L^1 a meno di sottosuccessioni equivale alla convergenza puntuale e dunque coincidono.
- *Passo 5:* $m = 2\pi$ ad esempio prendendo $\varphi(y) = e^{-|y|}$, segue che

$$\check{\varphi}(y) = \frac{2}{1+x^2}$$

e dunque $m = 2\pi$. In realtà vale per ogni φ che verifica le condizioni dell'ipotesi.

In conclusione, riportiamo la verifica di Fubini-Tonelli:

$$\iint |f(t) e^{-ity} e^{ixy} \varphi(\delta y)| dt dy = \iint |f(t)| \cdot |\varphi(\delta y)| dt dy = \|f\|_1 \cdot \|\varphi(\delta y)\|_1 < +\infty$$

□

Corollario 8. Date $f_1, f_2 \in L^1$ tali che $\widehat{f_1} = \widehat{f_2} \implies f_1 = f_2$ quasi ovunque cioè \mathcal{F} è iniettiva, cioè f è univocamente determinata da \widehat{f} .

Dimostrazione. Per ipotesi, $\widehat{f_1} - \widehat{f_2} = \widehat{f_1 - f_2} = 0$. Applicando il Teorema 7 a $\widehat{f_1 - f_2}$ (possiamo farlo perché $0 \in L^1$) otteniamo

$$0 = \int \widehat{f_1 - f_2}(x) e^{ixy} dy = 2\pi(f_1(x) - f_2(x)) \Rightarrow f_1(x) = f_2(x) \quad \forall x \in \mathbb{R}.$$

□

Esercizio. Date $f_1, f_2 \in L^1([-\pi, \pi]; \mathbb{C})$ e tali che per ogni $n \in \mathbb{Z}$ vale $c_n(f_1) = c_n(f_2)$ allora $f_1 = f_2$ quasi ovunque (e $c_n(f) = 0$ per ogni $n \implies f = 0$ q.o.).

6.2 Trasformata di Fourier su L^2

Abbiamo visto che la *serie di Fourier* si definisce naturalmente su L^2 (uno spazio di Hilbert) mentre la *trasformata di Fourier* ha bisogno di L^1 che non è uno spazio di Hilbert. Vedremo ora come estendere la trasformata di Fourier ad L^2 e come poter fare i conti.

Proposizione 1. Data $f \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C}) \cap L^2(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ vale $\|\widehat{f}\|_2 = \sqrt{2\pi} \|f\|_2$.

Teorema 2. \mathcal{F} si estende per continuità da $L^1 \cap L^2$ a tutto L^2 e $\mathcal{F}/\sqrt{2\pi}$ risulta essere un'isometria (come operatore a valori in L^2).

Corollario 3. (Identità di Plancherel). $\forall f_1, f_2 \in L^2(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ vale $\langle \widehat{f_1}, \widehat{f_2} \rangle = 2\pi \langle f_1, f_2 \rangle$.

Osservazione. Come si può calcolare \widehat{f} per $f \in L^2 \setminus L^1$? Se per quasi ogni $y \in \mathbb{R}$ esiste il limite

$$\lim_n \underbrace{\int_{-n}^n f(x) e^{-ixy} dx}_{\widehat{f_n}(y)}$$

allora coincide con $\widehat{f}(y)$.

Infatti, per ogni n posto $f_n := f \cdot \mathbb{1}_{[-n, n]}$ abbiamo che $\lim_n \int_{-n}^n f(x) e^{-ixy} dx = \widehat{f_n}(x)$. A questo punto, osserviamo che $f_n \rightarrow f$ in L^2 (da controllare per esercizio) e quindi $\widehat{f_n} \rightarrow \widehat{f}$ in L^2

(segue dalla continuità della trasformata). Siccome per ipotesi \widehat{f}_n converge puntualmente quasi ovunque allora $\widehat{f}_n \rightarrow \widehat{f}$ puntualmente quasi ovunque.

Intuitivamente, il Teorema 2 e l'identità di polarizzazione danno il Corollario 3. mentre il Teorema 2 segue dalla Proposizione 1. più un fatto noto usando che $L^1 \cap L^2$ è denso in L^2 .

Fatto Noto. Dati X e Y spazi metrici, Y completo e D denso in X , $g: D \rightarrow Y$ uniformemente continua allora g ammette un'unica estensione $G: X \rightarrow Y$ continua. (Inoltre se X e Y sono spazi normati e g è lineare allora anche G è lineare)

Dimostrazione Proposizione 1.

Dimostrazione che non funziona: Proviamo a svolgere il calcolo diretto

$$\begin{aligned}\|\widehat{f}\|_2^2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \widehat{f}(y) \overline{\widehat{f}(y)} dy \\ &= \iiint f(x) e^{-ixy} \overline{f(t)} e^{-ity} dt dx dy = \\ &= \iint f(x) \overline{f(t)} \underbrace{\left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iy(t-x)} dy \right)}_{\delta(x-t)} dt dx = \\ &= \int \left(\int f(x) \delta(x-t) dx \right) \overline{f(t)} dt = \\ &= 2\pi \int f(t) \overline{f(t)} dt = 2\pi \|f\|_2^2\end{aligned}$$

vediamo però che compare l'integrale $\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-iy(t-x)} dy$ e serve assumere che corrisponda a $\delta(x-t)$ dove δ è la “funzione Delta di Dirac”, vediamo ora la dimostrazione formale usando una funzione ausiliaria.

Dimostrazione formale: Prendiamo $\varphi: \mathbb{R} \rightarrow [0, +\infty]$ tale che

- i) φ continua in 0, crescente per $y < 0$ e decrescente per $y > 0$ e $\varphi(0) = 1$.
- ii) $\varphi \in L^1$ e $\check{\varphi} \in L^1$.

Poniamo per ogni δ

$$I_\delta = \int_{-\infty}^{+\infty} |\widehat{f}(y)|^2 \varphi(\delta y) dy \stackrel{?}{\rightarrow} \int_{-\infty}^{+\infty} |f(y)|^2$$

- *Passo 1:* $I_\delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} \|\widehat{f}\|_2^2$ per convergenza monotona usando l'ipotesi di crescita/descrescenza prima/dopo lo 0.

- *Passo 2:*

$$\begin{aligned}
I_\delta &= \int \widehat{f}(y) \overline{\widehat{f}(y)} \varphi(\delta y) dy = \\
&= \int \left(\int f(x) e^{-ixy} dx \right) \left(\int \overline{f(t)} e^{ity} dt \right) \varphi(\delta y) dy = \\
&\stackrel{\text{FT}}{=} \iint f(x) \overline{f(t)} \underbrace{\left(\int \varphi(\delta y) e^{i(t-x)y} dy \right)}_{\sigma_\delta \check{\varphi}(t-x)} dx dy = \\
&= \int (f(x) \sigma_\delta \check{\varphi}(t-x) dx) \overline{f(t)} dt = \\
&= \int f * \sigma_\delta \check{\varphi}(t) \cdot \overline{f(t)} dt = \\
&= \langle f * \sigma_\delta \check{\varphi}; f \rangle
\end{aligned}$$

e possiamo applicare il teorema di Fubini-Tonelli in quanto le ipotesi sono verificate infatti

$$\begin{aligned}
&\iiint |f(x) \overline{f(t)}| e^{i(t-x)y} \varphi(\delta y) dx dt dy = \\
&= \iiint |f(x)| \cdot |f(t)| \cdot |\varphi(\delta y)| dx dt dy = \\
&= \|f\|_1^2 \|\varphi(\delta y)\|_1 < +\infty
\end{aligned}$$

e $\|\varphi(\delta y)\|_1 < +\infty$ poiché $\varphi \in L^1$.

- *Passo 3:* $I_\delta \xrightarrow{\delta \rightarrow 0} 2\pi \|f\|_2^2$. Infatti $I_\delta = \langle f * \sigma_\delta \check{\varphi}; f \rangle$ e

$$\sigma_\delta \check{\varphi} \xrightarrow{\text{in } L^2} mf \quad \text{con } m = \int \check{\varphi}(x) dx$$

- *Passo 4:* Infine $m = 2\pi$ ad esempio prendendo $\varphi(y) = e^{-|y|}$

$$\check{\varphi}(x) = \frac{2}{1+x^2} \in L^1$$

ed in questo caso m si calcola.

□

6.2.1 Proprietà della trasformata di Fourier in L^2

Proposizione 4.

- $\widehat{\tau_h f} = e^{-ihy} \widehat{f}$
- $\widehat{e^{ihx} f} = \tau_h \widehat{f}$
- $\widehat{\sigma_h f} = \widehat{f}(\delta y)$

Dimostrazione. Le identità valgono in $L^1 \cap L^2$ che è denso in L^2 e dunque si estendono per continuità ad L^2 .

Proposizione 5. Se $f \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ e $f \in L^1 \cup L^2$ e $f' \in L^1 \cup L^2 \implies \widehat{f'} = iy \widehat{f}$.

Dimostrazione. La stessa fatta per $f, f' \in L^1$. Si parte da a_n, b_n tali che $a_n \rightarrow -\infty$ e $b_n \rightarrow +\infty$ con $f(a_n) \rightarrow 0$ e $f(b_n) \rightarrow 0$ e si integra per parti

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(f' \cdot \mathbb{1}_{[a_n, b_n]}) &= \int_{a_n}^{b_n} f'(x) e^{-ixy} dx \\ &= \underbrace{\left[f(x) e^{-ixy} \right]_{a_n}^{b_n}}_{\rightarrow 0} + iy \int_{a_n}^{b_n} f(x) e^{-ixy} dx = iy \mathcal{F}(f \cdot \mathbb{1}_{[a_n, b_n]}).\end{aligned}$$

Per concludere si dimostra che

$$\begin{aligned}\mathcal{F}(f' \cdot \mathbb{1}_{[a_n, b_n]}) &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mathcal{F}(f') \text{ in } L^2 \\ \mathcal{F}(f \cdot \mathbb{1}_{[a_n, b_n]}) &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mathcal{F}(f) \text{ in } L^2\end{aligned}$$

Ovvero si dimostra che

$$\begin{aligned}\int_{b_n}^{+\infty} |f(x) e^{-ixy}|^2 dx + \int_{-\infty}^{a_n} |f(x) e^{-ixy}|^2 dx &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \\ \int_{b_n}^{+\infty} |f'(x) e^{-ixy}|^2 dx + \int_{-\infty}^{a_n} |f'(x) e^{-ixy}|^2 dx &\xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0\end{aligned}$$

Ma questo è vero in quanto $f, f' \in L^2$.

Proposizione 6. Se $f \in C^1, f \in L^1, f' \in L^2 \implies \widehat{f} \in L^1$ e soddisfa le ipotesi del teorema di inversione.

Dimostrazione. Sappiamo che $iy\widehat{f} = \widehat{f'} \in L^2 \implies y\widehat{f} \in L^2$.

$$\begin{aligned}\int_{\mathbb{R}} |\widehat{f}(y)| dy &= \int_{|y| \leq 1} |\widehat{f}(y)| dy + \int_{|y| \geq 1} |\widehat{f}(y)| dy \\ &\leq 2\|\widehat{f}\|_{\infty} + \int_{|y| \geq 1} |\widehat{f}(y)y| \frac{1}{|y|} dy \\ &\leq 2\|f\|_1 + \|\widehat{f}y\|_2 \left(\int_{|y| \geq 1} \frac{1}{|y|^2} dy \right)^{1/2} \\ &\leq 2\|f\|_1 + 2\|f'\|_2\end{aligned}$$

Corollario. $f \in C_C^1 \implies f, \widehat{f} \in L^1$

Proposizione 7. Se $f_1, f_2 \in L^2(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ (e dunque $f_1 f_2 \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ per Hölder) allora

$$2\pi \widehat{f_1 f_2} = \widehat{f_1} * \widehat{f_2}$$

Dimostrazione. $f_1, f_2 \in L^2 \implies f_1 f_2 \in L^1$ segue da Hölder. Dimostriamo la proposizione per $f_1, f_2 \in C_C^1 \implies f_1, f_2, f_1 f_2 \in C_C^1 \implies$ tutte in L^1 e con trasformate in L^1 .

$$\mathcal{F}^* \left(\frac{1}{2\pi} \widehat{f_1} * \widehat{f_2} \right) = \frac{1}{2\pi} \mathcal{F}^*(\widehat{f_1}) \mathcal{F}^*(\widehat{f_2}) = \frac{1}{2\pi} (2\pi f_1) \cdot (2\pi f_2) = 2\pi f_1 \cdot f_2 = \mathcal{F}^*(\widehat{f_1 f_2})$$

ed usando che \mathcal{F}^* è iniettiva otteniamo che $2\pi \widehat{f_1 f_2} = \widehat{f_1} * \widehat{f_2}$.

Per $f_1, f_2 \in L^2$ si procede per continuità e si approssimano f_1 ed f_2 con $f_{1,n}$ e $f_{2,n}$ in C_C^1 . \square

6.3 Conclusione sulla TdF

Proposizione 4. (di 2 lezioni fa) Se $f, xf \in L^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$, allora $\hat{f} \in C^1(\mathbb{R}; \mathbb{C})$ e $(\hat{f})' = -ix\hat{f}$.

Corollario. Se $f, x^k f \in L^1$ con $k = 1, 2, \dots$, allora $x^h f \in L^1$ per ogni $h = 0, \dots, k$ e $\hat{f} \in C_0^k$ e $D^h \hat{f} = \widehat{(-ix)^h f}$.

Dimostrazione. Vale $|x^h| \leq 1 + |x|^k$ per ogni x e per ogni $h = 1, \dots, k$. Allora $|x^h f| \leq (1 + |x|^k)|f| \in L^1$. Il resto dell'enunciato è per induzione su k .

Corollario. Se $x^k f \in L^1$ per ogni $k = 0, 1, \dots$, allora $\hat{f} \in C^\infty$ (anzi C_0^∞ siccome le derivate sono trasformate).

Teorema (Paley-Weiner). Se $e^{\alpha|x|} \cdot f(x) \in L^1$ per qualche $\alpha > 0$, allora \hat{f} è analitica¹.

Dimostrazione. In $\mathbb{R} \times \mathbb{R} \simeq \mathbb{C}$ definisco $g(z)$.

Ricordiamo che $\hat{f}(y) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-iyx} dx$. Poniamo

$$g(z) := \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-izx} dx$$

Passo 1. $g(z)$ è definita per ogni $z \in \mathbb{R} \times [-\alpha, \alpha]$. Infatti,

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-izx} dx = \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|e^{tx} dt \leq \int_{-\infty}^{\infty} |f(x)|e^{\alpha|x|} dx < +\infty$$

Passo 2. Mostriamo che $g(z)$ è olomorfa su $\mathbb{R} \times (-\alpha, \alpha)$. Sviluppo g in serie di potenze in 0.

Nota. Questo mi serve per dire che è olomorfa in una palla di raggio α centrata in 0. Per concludere bisogna traslare il centro la palla per tutta la retta reale e mostrare la stessa cosa [TO DO: spiegare meglio + disegno palla].

$$g(z) = \int_{\mathbb{R}} f(x)e^{-izx} dx = \int_{\mathbb{R}} f(x) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-izx)^n}{n!} dx \stackrel{(*)}{=} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\int_{\mathbb{R}} \frac{(-ix)^n}{n!} f(x) dx \right) z^n = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$$

La serie $\sum_n a_n z^n$ è convergente per $|z| \leq \alpha$, quindi g è olomorfa su $B(0, \alpha)$. Notiamo che in $(*)$ abbiamo usato Fubini-Tonelli; controlliamo che potevamo applicarlo, dunque verifichiamo quanto segue.

$$\int_{\mathbb{R}} |f(x)| \sum_{n=0}^{\infty} \left| \frac{(-izx)^n}{n!} \right| dx < +\infty$$

Abbiamo

$$\int_{\mathbb{R}} |f(x)| \sum_{n=0}^{\infty} \frac{|zx|^n}{n!} dx = \int_{\mathbb{R}} |f(x)| e^{|z||x|} dx \stackrel{\text{se } |z| \leq \alpha}{\leq} \int_{\mathbb{R}} |f(x)| e^{\alpha|x|} dx$$

Per concludere si dimostra (allo stesso modo) che g si sviluppa in serie in ogni punto $y_0 \in \mathbb{R}$ con raggio di convergenza α . □

¹Questa condizione è implicata, ad esempio, dall'ipotesi $f \in C_C$

¹Restrizione di $g: \underbrace{\mathbb{R} \times (-\alpha, \alpha)}_{\mathbb{R} \times \mathbb{R} \simeq \mathbb{C}} \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa

Corollario. Se $f \in L^1$ è olomorfa e a supporto compatto allora \hat{f} è la restrizione di $g: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa [TO DO: controllare].

Nota. Se $f \in L^1$ e a supporto compatto, si ha $f(x)e^{\alpha|x|} \in L^1$ per ogni α .

6.4 Applicazioni TdF

Risoluzione equazioni del calore su \mathbb{R} .

$$\begin{cases} u_t = u_{xx} (x \in \mathbb{R}) \\ u(0, \cdot) = u_0 \end{cases}$$

Risoluzione formale. Denotiamo con $\hat{u} := \hat{u}(t, y)$ la trasformata di Fourier rispetto alla variabile x

$$\hat{u}_t(t, y) = \int \frac{\partial}{\partial t} u(t, x) e^{-ixy} dx = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int u(t, x) e^{-ixy} dx \right) = \hat{u}_t$$

Inoltre, $\hat{u}_t = \widehat{u_{xx}} = (iy)^2 \hat{u} = -y^2 \hat{u}$. Quindi, per ogni y , $\hat{u}(\cdot, y)$ risolve

$$\begin{cases} \dot{z} = -y^2 z \\ z(0) = \widehat{u_0}(y) \end{cases} \quad (\text{P})$$

Soluzione generale $z = \alpha e^{-y^2 t}$, da cui la soluzione per (P) è $\hat{u}(t, y) = \widehat{u_0}(y) e^{-y^2 t}$.

Siano

$$\rho(x) := \frac{e^{-x^2/2}}{\sqrt{2\pi}}, \quad \widehat{\sigma_{\sqrt{2t}} \rho} = \hat{\rho}(\sqrt{2t}y).$$

Però è noto che¹ $\hat{\rho}(y) = e^{-y^2/2} \implies \hat{\rho}(\sqrt{2t}y) = e^{-(\sqrt{2t}y)^2/2} = e^{-y^2 t}$. Da cui

$$\hat{u}(t, y) = \widehat{u_0}(y) e^{-y^2 t} = \widehat{u_0}(y) \cdot \widehat{\sigma_{\sqrt{2t}} \rho}(y) = \mathcal{F}(u_0 * \sigma_{\sqrt{2t}} \rho) \implies u(t, y) = u_0 * (\sigma_{\sqrt{2t}} \rho)$$

Dunque

$$u(t, x) := \begin{cases} u_0(x) & \text{per } t = 0 \\ u_0 * \sigma_{\sqrt{2t}} \rho(x) & \text{per } t > 0 \end{cases} \quad (*)$$

Teorema. Se $u_0: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ è continua e limitata, allora u data in (*) è ben definita su $[0, +\infty) \times \mathbb{R}$, continua, C^∞ per $t > 0$ e risolve (P).

Data $u: [0, T) \times \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ soluzione di (P) tale che esiste $h_0, h_1 \in L^1(\mathbb{R})$ tali che

$$|u(t, x)| \leq h_0(x), \quad |u_t(t, x)| \leq h_1(x)$$

allora $\hat{u}(\cdot, y)$ è univocamente determinata su $[0, T)$, dunque u è univocamente determinata per l'iniettività di TdF.

¹Si vede all'esercitazione che segue?

Capitolo 7

Integrazione di superfici

7.1 Superfici

Definizione. Data $f: \Omega \subset \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^d$ di classe C^1 e dato $x \in \Omega$, la mappa lineare da \mathbb{R}^k a \mathbb{R}^d associata alla matrice $\nabla f(x)$ si dice **differenziale di f in x** e si indica con $d_x f$.

Nota. La mappa $d_x f$ è univocamente determinata da

$$f(x+h) = f(x) + d_x f(h) + o(|h|)$$

dove $d_x f$ è il termine di primo grado dello sviluppo di Taylor di f .

Definizione. Siano $1 \leq k \leq d$ e $m = 1, 2, \dots$. L'insieme $\Sigma \subset \mathbb{R}^d$ si definisce **superficie** (senza bordo) di dimensione k e classe C^m se per ogni $x \in \Sigma$ esiste U intorno aperto¹ di $x \in \Sigma$ ed esiste una mappa $\phi: D \rightarrow \mathbb{R}^d \in C^m$ con D aperto di \mathbb{R}^k tale che

- $\phi(D) = \Sigma \cap U$
- $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ è un omeomorfismo
- $\nabla \phi(s)$ ha rango massimo ($= k$) per ogni $s \in D$

Ovvero ϕ è una **parametrizzazione locale** della superficie

Osservazione. Se $k = d$ abbiamo che Σ è una superficie se e solo se Σ è aperto.

Proposizione. Dati k, d, m come sopra, $\Sigma \subset \mathbb{R}^d$ e $x \in \Sigma$ sono fatti equivalenti

- Esistono U e $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ tale che ϕ è una parametrizzazione regolare
- Esistono U intorno di x e $g: U \rightarrow \mathbb{R}^{d-k} \in C^m$ tale che
 - $\Sigma \cap U = g^{-1}(0)$
 - ∇g ha rango massimo, ovvero $d - k$
- Esistono U intorno di x e $h: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^{d-k}$ di classe C^m tale che $\Sigma \cap U = \Gamma_h \cap U$ (dove Γ_h è il grafico di h) avendo identificato $\mathbb{R}^k \times \mathbb{R}^{d-k}$ con \mathbb{R}^d tramite una scelta di k coordinate tra le d di \mathbb{R}^d

¹D'ora in avanti gli intorni saranno sempre aperti.

Esempi.

- $\mathbb{S}^{d-1} = \{x \in \mathbb{R}^d \mid |x| = 1\}$ è una superficie senza bordo di dimensione $d - 1$ e classe C^∞ in \mathbb{R}^d
- $\mathbb{D} = \{x \in \mathbb{R}^3 \mid x_3 = 0 \text{ e } |x| < 1\}$ è una superficie 2-dimensionale in \mathbb{R}^3
- $\overline{\mathbb{D}}$ non lo è! (È una superficie con bordo)

[TO DO]: disegni in blu sul quaderno

Definizione. Data Σ superficie e fissato $x \in \Sigma$, lo **spazio tangente** a Σ in x è $T_x \Sigma := \text{Im}(d_x \phi)$ dove $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ è una parametrizzazione regolare e $x = \phi(s)$ con $s \in D$.

Nota. Lo spazio tangente è uno spazio vettoriale di stessa dimensione della superficie.

Proposizione.

- $T_x \Sigma = \{\dot{\gamma}(0) \mid \gamma: [0, \delta) \rightarrow \Sigma \text{ cammino } C^1 \text{ con } \gamma(0) = x\}$
- Data $g: U \rightarrow \mathbb{R}^{d-k}$ tale che $\Sigma \cap U = g^{-1}(0)$, $\text{rk}(\nabla g) = d - k$ su U , allora

$$T_x \Sigma = \ker(d_x g) = \{\nabla g_1(x), \dots, \nabla g_{n-k}(x)\}^\perp$$

Definizione. Data Σ superficie in \mathbb{R}^d di classe C^m , $f: \Sigma \rightarrow \mathbb{R}^{d'}$, diciamo che f è di classe $C^{m'}$, con $m' \leq m$ se per ogni $x \in \Sigma$ se esistono U e $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ parametrizzazione regolare, tale che $f \circ \phi: D \rightarrow \mathbb{R}^{d'}$ è di classe $C^{m'}$ con D aperto di \mathbb{R}^k .

Proposizione. $f \in C^{m'} \iff \exists A$ aperto di \mathbb{R}^d che contiene Σ e $F: A \rightarrow \mathbb{R}^{d'}$ estensione di f di classe $C^{m'}$.

Osservazione. Se $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ è una parametrizzazione regolare, allora $\phi^{-1}: \Sigma \cap U \rightarrow D \subset \mathbb{R}^k$ è C^m . La mappa ϕ^{-1} viene definita **carta**.

Definizione. Data $f: \Sigma \rightarrow \mathbb{R}^{d'}$ di classe (almeno) C^1 e $x \in \Sigma$,

$$\begin{aligned} d_x f: T_x \Sigma &\longrightarrow \mathbb{R}^{d'} \\ \dot{\gamma}(0) &\longmapsto (f \circ \gamma)'(0) \quad \gamma: [0, \delta) \rightarrow \Sigma, \gamma \in C^1, \gamma(0) = x \end{aligned}$$

Proposizione. Data $F: A \rightarrow \mathbb{R}^{d'}$ estensione C^1 di f , con $A \subset \mathbb{R}^d$, allora

$$d_x f = d_x F|_{T_x \Sigma}$$

Osservazione. Se $f: \Sigma \rightarrow \Sigma'$, dove $\Sigma \subset \mathbb{R}^d$ e $\Sigma' \subset \mathbb{R}^{d'}$ allora $\text{Im}(d_x f) \subset T_{f(x)} \Sigma'$. Quindi, $d_x f: T_x \Sigma \rightarrow T_{f(x)} \Sigma'$.

7.2 Misure su superfici

In questa sezione studiamo la misura di Lebesgue su superfici definite tramite parametrizzazione¹.

Definizione. Dati V spazio vettoriale k -dimensionale dotato di prodotto scalare (per esempio V sottospazi di \mathbb{R}^d), la **misura di Lebesgue** σ_k su V è data dall'identificazione di V con \mathbb{R}^k tramite la scelta di una base ortonormale.

¹Coincide con la definizione di Hausdorff

Nota. σ_k non dipende dalla scelta della base.

Definizione. Siano V, V' spazi vettoriali di dimensione k dotati di prodotto scalare e $\Lambda: V \rightarrow V'$ lineare. Poniamo

$$|\det \Lambda| := |\det M|,$$

dove M è una matrice $k \times k$ associata a Λ dalla scelta di basi ortonormali su V e V' .

Nota. Si verifica che la definizione è ben posta, ovvero non dipende dalla scelta delle basi. Inoltre, si verifica che per ogni $E \subset V$ misurabile si ha $\sigma_k(\Lambda(E)) = |\det \Lambda| \cdot \sigma_k(E)$ (formula di cambio di variabile negli integrali).

Definizione. Sia $\Lambda: V \rightarrow W$, con V, W spazi vettoriali, non necessariamente di stessa dimensione. Poniamo $V' := \text{Im}(\Lambda)$ e

$$|\det \Lambda| := \begin{cases} 0 & \text{se } \text{rk}(\Lambda) < k \\ \text{come prima} & \text{se } \text{rk}(\Lambda) = k \text{ e } \dim V' = \dim V \end{cases}$$

Proposizione 1. Se $\Lambda: \mathbb{R}^k \rightarrow \mathbb{R}^d$ allora

$$|\det \Lambda|^2 = \det(N^t N) \quad (1)$$

dove N è una matrice $d \times k$ associata a Λ . E inoltre

$$|\det \Lambda|^2 = \sum_{\substack{Q \text{ minore} \\ k \times k \text{ di } N}} \det(Q)^2 \quad (2)$$

Osservazione. Questa proposizione implica che non è necessario trovare una base ortormale dell'immagine di Λ per calcolarne il determinante.

Dimostrazione.

- (1) Supponiamo Λ iniettiva (il caso Λ non iniettivo per esercizio), scegliamo una base ortonormale e_1, \dots, e_k di $\text{Im}(\Lambda)$ e una matrice M $k \times k$ associata a Λ . Sia $B \in \mathbb{R}^{d \times k}$ una matrice avente colonne uguali a e_1, \dots, e_k . Allora $N = BM$. Dunque,

$$\det(N^t N) = \det(M^t \underbrace{B^t B}_{=I} M) = \det(M^t M) = (\det M)^2 =: |\det \Lambda|^2.$$

- (2) La seconda formula richiede la formula di Binet generalizzata.

□

7.3 Superfici k -dimensionali in \mathbb{R}^d di classe C^1

Definizione. Un insieme $E \subset \Sigma$ è **misurabile** (secondo Lebesgue) se $\forall \phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ parametrizzazione regolare e $D \subset \mathbb{R}^k$, l'insieme $\phi^{-1}(E \cap U) \subset \mathbb{R}^k$ è misurabile secondo Lebesgue.

Notazione. $\mathcal{M}(\Sigma) := \{E \subset \Sigma \text{ misurabili}\}.$

Proposizione 1. Esiste un'unica misura σ_k su $\mathcal{M}(\Sigma)$ tale che per ogni E misurabile e per ogni $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ parametrizzazione regolare

$$\sigma_k(E \cap U) = \int_{\phi^{-1}(E \cap U)} \overbrace{\det(d_s \phi)}^{J\phi(s)} ds \quad (1)$$

Commenti.

- σ_k misura di volume k -dimensionale su Σ .
- σ_k coincide con la misura di Hausdorff \mathcal{H}^k ristretta a Σ .
- $J\phi(s) = \sqrt{\det(\nabla^t \phi(s) \nabla \phi(s))} = \sqrt{\sum_Q (\det Q)^2}$ dove Q sono i minori $k \times k$ di $\nabla \phi(s)$.
- Se $k = 1$, vale $J\phi(s) = \sqrt{\det(\phi'(s))^t \phi'(s)} = |\phi'(s)|$.

Dimostrazione.

Passo 1: costruzione di σ_k .

Prendiamo $\sigma_i: D_i \rightarrow \Sigma \cap U_i$ parametrizzazioni regolari, dove $\{D_i\}$ è una famiglia numerabile, tale che $\Sigma \subset \bigcup U_i$. Prendiamo Σ_i misurabili e disgiunti tali che $\bigcup \Sigma_i = \Sigma$ e $\Sigma_i \subset U_i$.

Per ogni $E \in \mathcal{M}(\Sigma)$ poniamo

$$\sigma_k(E) = \sum_i \int_{\phi^{-1}(E \cap \Sigma_i)} J\phi_i(s) \, ds$$

Evitiamo di verificare che sia una misura σ -addittiva.

Per dimostrare la proposizione si usa il seguente lemma.

Lemma. Date $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ e $\tilde{\phi}: \tilde{D} \rightarrow \Sigma \cap \tilde{U}$ e E misurabili contenuto in $U \cap \tilde{U}$, allora

$$\int_{\phi^{-1}(E)} J\phi(s) \, ds = \int_{\tilde{\phi}(E)} J\tilde{\phi}(\tilde{s}) \, d\tilde{s} \quad (2)$$

Dimostrazione lemma. Usiamo il cambio di variabile $s = \phi^{-1}(\tilde{\phi}(\tilde{s})) =: g(\tilde{s})$.

$$\begin{aligned} \int_F J\phi(s) \, ds &= \int_{g^{-1}(F)=\tilde{F}} J\phi(s) Jg(\tilde{s}) \, d\tilde{s} = \int_{\tilde{F}} |\det(d_s \phi)| \cdot |\det(d_{\tilde{s}} g)| \, d\tilde{s} \\ &= \int_{\tilde{F}} |\det(d_{\tilde{s}}(\phi \circ g))| \, d\tilde{s} = \int_{\tilde{F}} J\tilde{\phi}(\tilde{s}) \, d\tilde{s} \end{aligned}$$

Da cui la tesi. □

Corollario 2. Data $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ C^1 parametrizzazione bigettiva (non necessariamente regolare), $f: \Sigma \cap U \rightarrow \mathbb{R}$ misurabile e integrabile rispetto a σ_k .

$$\int_{\Sigma \cap U} f(x) \, d\sigma_k(x) = \int_D f(\phi(s)) J\phi(s) \, ds \quad (3)$$

Se $\phi: D \rightarrow \Sigma \cap U$ è solo C^1 , come vanno corrette (1) e (3)?

$$\int_{E \cap U} \# \phi^{-1}(x) \, d\sigma_k(x) = \int_{\phi^{-1}(E \cap U)} J\phi(s) \, ds \quad (1')$$

e

$$\int_{E \cap U} f(x) \# \phi^{-1}(x) \, d\sigma_k(x) = \int_D f(\phi(s)) J\phi(s) \, ds \quad (3')$$

Nota. Le formule sopra giustificano il fatto che parametrizzazione non esattamente bigettive possono essere usate lo stesso per il calcolo dei volumi.

Esempio. Parametrizzazione di $\mathbb{S}^d \subset \mathbb{R}^{d+1}$ con coordinate sferiche.

Consideriamo $\phi_d: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{S}^d$ definita come

$$\phi_d(\alpha_1, \dots, \alpha_d) = (\cos \alpha_1, \sin \alpha_1 \cos \alpha_2, \sin \alpha_1 \sin \alpha_2 \cos \alpha_3, \dots, \sin \alpha_1 \cdots \sin \alpha_{d-1} \cos \alpha_d, \sin \alpha_1 \cdots \sin \alpha_d)$$

Definizione ricorsiva

$$\phi_1(\alpha_1) = (\cos \alpha_1, \sin \alpha_1), \quad \phi_d(\alpha) = (\cos \alpha_1, \sin \alpha_1 \cdot \phi_{d-1}(\alpha_2, \dots, \alpha_d))$$

Dunque

- $\phi_d([0, \pi]^{d-1} \times [0, 2\pi]) = \mathbb{S}^d$ è una parametrizzazione in coordinate sferiche ed è iniettiva.
- $J\phi_d(\alpha) = \sin(\alpha_1)^{d-1} \sin(\alpha_2)^{d-2} \cdots \sin(\alpha_{d-1})^1$

Proposizione 3. Sia Σ superficie come al solito. Allora esiste un'unica misura μ sui $\mathcal{M}(\Sigma)$ tale che per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $\delta > 0$ tale che data $f: \Sigma \cap U \rightarrow \mathbb{R}^k \in C^1$ che è δ -isometria, cioè

$$\frac{1}{1+\delta}|x-x'| \leq |f(x) - f(x')| \leq (1+\delta)|x-x'| \quad \forall x, x' \in \Sigma \cap U \quad (\text{P})$$

Allora

$$\frac{1}{1+\varepsilon}\sigma_k(E) \leq |f(E)| \leq (1+\varepsilon)\sigma_k(E) \quad \forall E \text{ mis } \subset \Sigma \cap U$$

Corollario 4. Poichè σ_k e la restrizione di \mathcal{H}^k a Σ hanno la proprietà (P), coincidono.

Dimostrazione (Unicità). Prendiamo μ, μ' che soddisfano (P). Fissiamo $E, \varepsilon > 0$ e δ di conseguenza usando (P). Allora

- Per ogni $x \in \Sigma$ esiste $\phi_x: U_x \cap \Sigma \rightarrow \mathbb{R}^k$ tale che $d_x \phi_x: T_x \Sigma \rightarrow \mathbb{R}^k$ è un'isometria.
- per ogni x esiste $V_x \subset U_x$ tale che $\phi_x: \Sigma \cap V_x \rightarrow \mathbb{R}^k$ è δ -isometria.
- Ricopriamo Σ con una successione $V_i := V_{x_i}$.
- Scriviamo $E = \bigsqcup_i E_i$ con $E_i \subset V_i$.

Per (P) abbiamo che

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+\varepsilon}\mu(E_i) &\leq |f(E_i)| \leq (1+\varepsilon)\mu(E_i) \\ \frac{1}{1+\varepsilon}\tilde{\mu}(E_i) &\leq |f(E_i)| \leq (1+\varepsilon)\tilde{\mu}(E_i) \end{aligned}$$

da cui incrociando le disuguaglianze otteniamo

$$\begin{aligned} \frac{1}{(1+\varepsilon)^2}\mu(E_i) &\leq \tilde{\mu}(E_i) \leq (1+\varepsilon)^2\mu(E_i) \\ \Rightarrow \frac{1}{(1+\varepsilon)^2}\tilde{\mu}(E_i) &\leq \mu(E_i) \leq (1+\varepsilon)^2\tilde{\mu}(E_i) \end{aligned}$$

e per arbitrarietà di ε ricaviamo $\mu(E) = \tilde{\mu}(E)$. Per arbitrarietà di E otteniamo $\mu = \tilde{\mu}$. \square

7.4 k -covettori

Dato V spazio vettoriale su \mathbb{R} e $k = 1, 2, \dots$, l'applicazione $\alpha: V^k \rightarrow \mathbb{R}$ si dice **k -covettore o k -lineare e alternante** se

- è lineare in ogni variabile
- per ogni σ permutazione in S_k , $\alpha(v_{\sigma(1)}, \dots, v_{\sigma(k)}) = \text{sgn}(\sigma)\alpha(v_1, \dots, v_k)$ (equivalentemente, α cambia segno scambiando due variabili).

Notazione. $\Lambda^k(V) := \{\alpha \text{ } k\text{-covettori su } V\}$. Formalmente $\Lambda^0(V) := \{0\}$.

Osservazione.

- $\Lambda^k(V)$ è uno spazio vettoriale.
- $\Lambda^1(V) = V^*$ duale di V .
- \det è n -lineare alternante nelle colonne (o righe).
- Se v_1, \dots, v_k sono linearmente dipendenti, allora $\alpha(v_1, \dots, v_k) = 0$.
- Se $k > \dim V$, allora $\Lambda^k(V) = \{0\}$.

Definizione. Dati V, V' spazi vettoriali, $T: V \rightarrow V'$ lineare, $\alpha \in \Lambda^k(V')$, il **pull-back** di α secondo T è

$$T^\# \alpha \in \Lambda^k(V) \quad \text{dato da} \quad T^\# \alpha(v_1, \dots, v_k) = \alpha(Tv_1, \dots, Tv_k)$$

Inoltre, dati $\alpha \in \Lambda^k(V), \beta \in \Lambda^h(V)$ si definisce **prodotto esterno** e si indica con $\alpha \wedge \beta \in \Lambda^{k+h}(V)$ quanto segue

$$\alpha \wedge \beta(v_1, \dots, v_{k+h}) = \frac{1}{k!h!} \sum_{\sigma \in S_{k+h}} \text{sgn}(\sigma) \alpha(v_{\sigma(1)}, \dots, v_{\sigma(k)}) \beta(v_{\sigma(k+1)}, \dots, v_{\sigma(k+h)})$$

7.5 Integrazione di k -forme su superfici

Proposizione 0. Il prodotto esterno \wedge è distributivo (rispetto a $+$), associativo e anticommutativo, ovvero $\alpha \wedge \beta = (-1)^{hk} \beta \wedge \alpha$.

Data e_1, \dots, e_d base di V , e_1^*, \dots, e_d^* è una base di V^* . Denotiamo con $I(d, k) := \{\underline{i} = (i_1, \dots, i_k) \text{ con } 1 \leq i_1 \leq \dots \leq i_k \leq d\}$ l'insieme di multiindici. Per ogni $\underline{i} \in I(d, k)$ indichiamo con $e_{\underline{i}}^* = e_{i_1}^* \wedge \dots \wedge e_{i_k}^* \in \Lambda^k(V)$. Data una matrice $d \times k$ A , $A_{\underline{i}}$ è il minore di A dato dalle righe i_1, \dots, i_k .

Proposizione 1. $e_{\underline{i}}^*(v_1, \dots, v_k) = \det(A_{\underline{i}})$, dove $A \in R^{d \times k}$ matrice delle coordinate di v_1, \dots, v_k , cioè $A_{ij} = (v_j)_i$.

Dimostrazione. Per induzione su k .

- $k = 1$. OK
- **Passo induttivo** $k - 1 \rightarrow k$. Scriviamo $e_{\underline{i}}^* = e_{i_1}^* \wedge e_{\underline{i}'}^*$ con $\underline{i}' = (i_2, \dots, i_k)$. Usando la definizione di prodotto esterno e l'ipotesi induttiva notiamo che questo è uguale allo sviluppo per la prima riga di $\det(A_{\underline{i}})$

□

Proposizione 2. Posta $\{e_{\underline{i}}: \underline{i} \in I(d, k)\}$ è una base di $\Lambda^k(V)$ e in particolare per ogni $\alpha \in \Lambda^k(V)$

$$\alpha = \sum_{\underline{i} \in I(d, k)} \alpha(e_{\underline{i}}) e_{\underline{i}}^*$$

Dimostrazione. Definiamo $\tilde{\alpha}$ come sopra. Prendiamo $\underline{i} \in I(d, k)$, allora

$$\tilde{\alpha}(e_{j_1}, \dots, e_{j_k}) = \sum_{\underline{i}} \alpha(e_{i_1}, \dots, e_{i_k}) \cdot \underbrace{e_{\underline{i}}^*(e_{j_1}, \dots, e_{j_k})}_{=\delta_{ij}} = \alpha(e_{j_1}, \dots, e_{j_k})$$

Si conclude per linearità e alternanza.

Corollario. Vale la seguente identità

$$\dim \Lambda^k(V) = \#I(d, k) = \begin{cases} \binom{d}{k} & \text{se } k < d \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Proposizione 3 (Formula di Binet generalizzata). Dati A, B matrici di $d \times k$ con $k < d$, allora

$$\det(B^t A) = \sum_{\underline{i} \in I(d, k)} \det(B_{\underline{i}}) \det(A_{\underline{i}})$$

Dimostrazione. Basta definire $\alpha(v_1, \dots, v_k) = \det(B^t A)$ dove A è la matrice avente colonne pari a v_1, \dots, v_k . Bisogna verificare che α è k -lineare alternante ([TO DO]), da cui segue che

$$\det(B^t A) = \alpha(v_1, \dots, v_k) \stackrel{\text{Prop 2}}{=} \sum_{\underline{i}} \underbrace{\alpha(e_{i_1}^*, \dots, e_{i_k}^*)}_{\det(B_{\underline{i}}^t)} \cdot \underbrace{e_{\underline{i}}^*(v_1, \dots, v_k)}_{\det A_{\underline{i}}}$$

□

Osservazione. Nel caso in cui $B = A$, otteniamo la formula

$$\det(A^t A) = \sum_{\substack{Q \text{ minore} \\ k \times k \text{ di } A}} \det(Q)^2.$$

Caso particolare $V = \mathbb{R}^d$. Indichiamo con e_1, \dots, e_d i vettori della base canonica, dx_1, \dots, dx_d base duale di \mathbb{R}^d , $dx_{\underline{i}} := e_{\underline{i}}^*$ base canonica di $\Lambda^k(\mathbb{R}^d)$.

Esempio.

$$\begin{aligned} & (dx_1 + 2dx_2) \wedge (2dx_1 \wedge dx_3 - dx_2 \wedge dx_4) \\ &= 2dx_1 \wedge dx_1 \wedge dx_3 - dx_1 \wedge dx_2 \wedge dx_4 + 4dx_2 \wedge dx_1 \wedge dx_3 - 2dx_2 \wedge dx_2 \wedge dx_4 \\ &= -dx_1 \wedge dx_2 \wedge dx_4 - 4dx_1 \wedge dx_2 \wedge dx_3. \end{aligned}$$

Nota. Nel prodotto esterno si cancellano tutti i termini con indici ripetuti.

Definizione. Dato $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ aperto, una k -forma ω su Ω è una "funzione" da Ω in $\Lambda^k(\mathbb{R}^d)$. In coordinate, $\omega(x) = \sum_{\underline{i} \in I(d, k)} w_{\underline{i}}(x) \cdot dx_{\underline{i}}$.

Il **differenziale esterno** di una k -forma ω su Ω di classe C^1 è la $k+1$ -forma su Ω di classe almeno C^0 data da

- $k = 0$. In tal caso f è una funzione (0-forma) e $df(x) = d_x f = \sum \frac{\partial w_{\underline{i}}(x)}{\partial x_j} dx_j \wedge dx_{\underline{i}}$
- $k > 0$ $d\omega := \sum_{\underline{i} \in I(d,k)} d\omega_{\underline{i}}(x) \wedge dx_{\underline{i}} = \sum_{\underline{i} \in I(d,k)} \sum_{j=1}^d \frac{\partial \omega_{\underline{i}}(x)}{\partial x_j} dx_j \wedge dx_{\underline{i}}$.

Proposizione (Leibniz). Valgono le seguenti.

- $d(\omega_1 \wedge \omega_2) = d\omega_1 \wedge \omega_2 + (-1)^{k_1} \omega_1 \wedge d\omega_2$
- $d^2\omega = 0$