

Appunti di Analisi 4

Osea

Primo semestre, 2024 - 2025, prof. Pierluigi Colli

Il corso tratterà sostanzialmente due tematiche:

- **Misura e Integrale di Lebesgue**
- Rudimenti di **Analisi Funzionale**, in particolare spazi di Hilbert e serie di Fourier e qualcosa relativa agli spazi normati.

In particolare legati dagli **spazi** L^p che rientrano in entrambe le categorie. Purtroppo non c'è un testo che contiene tutti e soli gli argomenti del corso, ma sul kiro c'è molto materiale didattico che può essere utilizzato.

Indice

1	Misura e integrazione di Lebesgue	2
1.1	Algebre, σ -algebre, misure	2
1.2	Misura esterna	6
1.3	Misura di Lebesgue	7
1.4	Insiemi Trascurabili	12
1.5	Funzioni misurabili	13
1.6	Integrale di Lebesgue	17
1.7	Teoremi di passaggio al limite sotto il segno di integrale	22
1.8	Convergenze di funzioni misurabili	31
1.9	Teoremi di Fubini e Tonelli	34
1.10	Misure Relative	38
1.11	Derivata di Radon-Nikodym	45
1.12	Misure di Lebesgue-Stieltjes	51
2	Analisi Funzionale	54
2.1	Spazi normati	54
2.2	Spazi L^p	61
2.3	Spazi di Hilbert	67
2.4	Risultati di densità su $L^p(\Omega)$	70
2.5	Operatori lineari e continui tra spazi normati	73
2.6	Spazi di successioni ℓ^p	77
2.7	Funzioni a variazione limitata	81
2.8	Estensione di altre formule di integrazione	86
2.9	Spazi di Sobolev	86
2.10	Proiezioni in spazi di Hilbert	89
2.11	Sottospazi ortogonali	94
2.12	Serie di Fourier	96

1 Misura e integrazione di Lebesgue

Il libro era di Haim Brezis e si chiamava *Analisi Funzionale e Applicazioni*, era la versione in italiano ed era edita da Liguori. Aveva un'appendice curata da Carlo Sbordone (?). Di tale libro esiste la versione in inglese che è molto più ricca e completa.

1.1 Algebre, σ -algebre, misure

Sia Ω un insieme ambiente, e sia \mathcal{M} una famiglia di sottoinsiemi di Ω , ossia $\mathcal{M} \subseteq 2^\Omega$.

Definizione 1.1: Algebra

Una famiglia \mathcal{M} di sottoinsiemi di Ω si dice **algebra** se

1. $\emptyset \in \mathcal{M}$
2. Se $A \in \mathcal{M}$ allora $A^C \in \mathcal{M}$
3. Se $A, B \in \mathcal{M}$ allora anche $A \cup B \in \mathcal{M}$

Osservazione. Poiché $\emptyset \in \mathcal{M}$, anche $\Omega \in \mathcal{M}$ perché il complementare di \emptyset .

Osservazione. Se $A, B \in \mathcal{M}$, anche $(A^C \cup B^C)^C = A \cap B \in \mathcal{M}$

Osservazione. Se $A, B \in \mathcal{M}$ anche $A \cap B^C = A \setminus B \in \mathcal{M}$

In pratica un'algebra è una famiglia di sottoinsiemi di Ω chiusa rispetto alle comuni operazioni di insiemi.

Esempio 1.1. $P(\Omega)$ è banalmente un'algebra perché contiene tutti i sottoinsiemi.

Anche $\{\emptyset, \Omega\}$ lo è poiché la loro unione è Ω .

Esempio 1.2. In $\Omega = \mathbb{R}^2$ consideriamo \mathcal{M} costituita dai rettangoli. Allora \mathcal{M} è un'algebra? NO, perché per quanto potrei metterci l'insieme vuoto e tutto \mathbb{R}^2 , se considero ad esempio $[0, 1] \times [0, 2] \cup [0, 2] \times [0, 1]$ ottengo un poligono che non è un rettangolo.

Invece, potrei considerare la famiglia delle unioni finite di rettangoli, anche non limitati, e considerando anche l'insieme vuoto. Questa è un'algebra perché l'intersezione di due rettangoli è un rettangolo, e il complementare di un'unione finita di rettangoli è un'intersezione di finiti rettangoli.

Definizione 1.2: funzione finitamente additiva

Sia Ω un'insieme e \mathcal{M} un'algebra di sottoinsiemi di Ω .

Una funzione $\mu : \mathcal{M} \rightarrow [0, +\infty]$ si dice **finitamente additiva** se

1. $\mu(\emptyset) = 0$
2. Se $A, B \in \mathcal{M}$ e $A \cap B = \emptyset$ allora $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$

Va inteso che se per uno dei due $\mu(A) = +\infty$ allora $\mu(A \cup B) = +\infty$

Esempio 1.3. Nel caso dell'algebra delle unioni finite di rettangoli, potrei considerare la funzione che restituisce la somma delle aree dei rettangoli.

Proposizione 1.1. Se μ è una funzione finitamente additiva su \mathcal{M} algebra allora

1. (monotonia) Se $A, B \in \mathcal{M}$ e $A \subseteq B$ allora $\mu(A) \leq \mu(B)$
2. (sottrattività) Se $A, B \in \mathcal{M}$ e $A \subseteq B$ e $\mu(A) < +\infty$ allora $\mu(B \setminus A) = \mu(B) - \mu(A)$

3. (sub-additività) Se $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{M}$ allora $\mu(\bigcup_{i=1}^n A_i) \leq \sum_{i=1}^n \mu(A_i)$

Dimostrazione.

1. $B = A \cup (B \setminus A)$, quindi $\mu(B) = \mu(A) + \mu(B \setminus A) \geq \mu(A)$
2. Da sopra, ma necessito di aggiungere l'ipotesi $\mu(A) < +\infty$ per evitare di sottrarre $+\infty$
3. Considero $B_1 = A_1$, $B_2 = A_2 \setminus A_1$ ecc. ponendo sempre $B_n = A_n \setminus \bigcup_{i=1}^{n-1} A_i$, per cui $\bigcup_{i=1}^n B_i = \bigcup_{i=1}^n A_i$ e so che $\mu(\bigcup_{i=1}^n B_i) = \sum_{i=1}^n \mu(B_i) \leq \sum_{i=1}^n \mu(A_i)$ dove prima si è usata la finita additività essendo B_i a due a due disgiunti, e la disuguaglianza per la monotonia.

□

Definizione 1.3: Misura

Sia Ω insieme, \mathcal{M} algebra su Ω , allora $\mu : \mathcal{M} \rightarrow [0, +\infty]$ si dice **misura** se:

1. $\mu(\emptyset) = 0$
2. (Numerabile additività / σ -additività) Se $\{A_n\}$ è una successione di insiemi di \mathcal{M} a due a due disgiunti e tali che $\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i \in \mathcal{M}$ allora $\mu(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu(A_i)$

Osservazione. È evidente che la σ -additività implica l'additività finita, poiché si può prendere $A_1 = A$, $A_2 = B$ e $A_i = \emptyset$ per ogni $i \geq 3$

Il problema delle algebre in questo caso è che bisogna specificare nella definizione di misura che l'unione della successione deve essere nell'algebra, il che motiva la seguente definizione.

Definizione 1.4: σ -algebra

Sia Ω un insieme, \mathcal{M} una famiglia di sottoinsiemi di Ω . Allora \mathcal{M} si dice **σ -algebra** se:

1. $\emptyset \in \mathcal{M}$
2. Se $A \in \mathcal{M}$ allora anche $A^C \in \mathcal{M}$
3. Se $A_n \in \mathcal{M}$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ allora $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{M}$

Osservazione. Di nuovo è evidente che una σ -algebra è un'algebra.

Osservazione. Se $A_n \in \mathcal{M} \forall n \in \mathbb{N}$ posso concludere che $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{M}$, sì, poiché è il complementare dell'unione dei complementari, come prima.

Esempio 1.4. $\mathcal{M} = P(\Omega)$ è anche una σ -algebra. Vale lo stesso anche per $\mathcal{M} = \{\emptyset, \Omega\}$.

Esempio 1.5. L'unione finita di rettangoli, anche non limitati, che include l'insieme vuoto, invece non lo è, poiché un aperto qualunque di \mathbb{R}^2 è esprimibile come unione numerabile di rettangoli.

Teorema 1.2

Dato Ω e una famiglia \mathcal{F} di sottoinsiemi di Ω , esiste sempre una σ -algebra \mathcal{M} che contiene \mathcal{F} ed è contenuta in ogni σ -algebra che contiene \mathcal{F} , e viene denotata $\sigma(\mathcal{F})$

Dimostrazione. Data \mathcal{F} , allora esiste almeno $P(\Omega) \supseteq \mathcal{F}$. Prendo allora tutte le σ -algre che contengono \mathcal{F} e l'intersezione è una σ -algebra ed è contenuta in tutte. \square

Esempio 1.6. Dato un insieme Ω , sia τ la collezione di aperti di Ω . La σ -algebra $\sigma(\tau)$ generata da τ viene detta σ -algebra di Borel e contiene tutti gli aperti, tutti i chiusi e tutte le unioni e intersezioni numerabili di aperti e chiusi.

Dato Ω un insieme e una σ -algebra \mathcal{M} su Ω , la coppia (Ω, \mathcal{M}) viene detta **spazio misurabile** e la terna $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$, dove μ è una misura su \mathcal{M} viene detta **spazio di misura**.

Uno spazio di misura si dice **finito** se $\mu(\Omega) < +\infty$ e uno spazio di misura si dice **σ -finito** se $\Omega = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n$ con $B_n \in \mathcal{M} \forall n \in \mathbb{N}$ e $\mu(B_n) < +\infty \forall n \in \mathbb{N}$. Inoltre se $\mu(A) = 0$ allora A si dice **trascurabile**. Ancora una proprietà si dice **vera quasi ovunque** se vale per ogni $x \in \Omega \setminus A$ dove A è trascurabile.

Esempio 1.7. $\Omega = \mathbb{R}^N$, $\mathcal{M} = 2^{\mathbb{R}^N}$, sia O l'origine. Allora δ_O è la misura che ha valore 1 se e solo se $O \in A \in \mathcal{M}$, altrimenti 0. Allora questa è una misura perché data una successione di insiemi a due a due disgiunti della σ -algebra la misura della loro unione è 1 se e solo se uno degli insiemi contiene O , e nel caso può essere solo uno, perché tali insiemi sono a due a due disgiunti. In particolare questa è una misura finita.

Esempio 1.8 (Misura del contare $\#$). Consideriamo lo spazio di misura $(\mathbb{N}, 2^{\mathbb{N}}, \#)$, dove per un insieme $A \subseteq \mathbb{N}$,

$$\#(A) = \begin{cases} n & \text{se } A \text{ ha } n \text{ elementi} \\ +\infty & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Verifichiamo che si tratta di una misura:

1. $\#(\emptyset) = 0$ ovviamente.
2. Se $\{A_n\}$ è una successione di insiemi a due a due disgiunti, allora

$$\#A := \# \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) = \sum_{i=1}^{\infty} \#(A_i)$$

Infatti si possono verificare due casi: se $\#A < \infty$ allora significa che ogni A_i è finito oppure vuoto e solo un numero finito di A_i (al massimo $\#A$ insiemi) sono diversi dall'insieme vuoto, e quindi il numero di elementi di A è la somma dei numeri di elementi degli A_i .

L'altro caso è quando $\#A = +\infty$ che si può realizzare in diversi modi: se nella successione abbiamo un insieme A_i con un numero infinito di elementi e in tal caso l'eguaglianza è immediatamente soddisfatta, oppure si ha che $\#A_i < +\infty$ per ogni $i \in \mathbb{N}$ ma la serie non può convergere, poiché significherebbe che esiste una sottosuccessione di elementi non vuoti, e tutti hanno almeno un elemento.

Notare che questo **non** è uno spazio di misura finito, ma è uno spazio di misura σ -finito perché $\mathbb{N} = \bigcup_{n=1}^{\infty} \{n\}$ dove naturalmente ogni singoletto ha $\#\{n\} = 1$. Inoltre è interessante notare che in questo spazio l'unico insieme trascurabile è l'insieme vuoto.

Teorema 1.3: Continuità della misura

Sia Ω, \mathcal{M}, μ uno spazio di misura e sia $\{A_n\}$ una successione di insiemi di \mathcal{M} .

1. Se $\{A_n\}$ è crescente, ossia $A_n \subseteq A_{n+1}, \forall n \in \mathbb{N}$, allora

$$\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$$

2. Se $\{A_n\}$ è decrescente, ossia $A_n \supseteq A_{n+1}, \forall n \in \mathbb{N}$, e $\mu(A_1) < +\infty$, allora

$$\mu\left(\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$$

Dimostrazione. 1. Noto che

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = A_1 \cup (A_2 \setminus A_1) \cup (A_3 \setminus A_2) \cup \dots \cup (A_n \setminus A_{n-1}) \cup \dots$$

E che gli insiemi nelle parentesi in questa espressione sono tutti a due a due disgiunti. Allora abbiamo per la σ -additività che

$$\mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \mu(A_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \mu(A_n \setminus A_{n-1}) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\mu(A_1) + \sum_{k=1}^n \mu(A_{k+1} \setminus A_k) \right)$$

Ma ora possiamo riapplicare la σ -additività della misura all'interno al limite ottenendo che

$$\mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} (\mu(A_1 \cup (A_2 \setminus A_1) \cup \dots \cup (A_{n+1} \setminus A_n))) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_{n+1})$$

2. Vogliamo costruire una successione crescente. Poniamo $B_1 = A_1, B_2 = A_1 \setminus A_2, B_3 = A_1 \setminus A_3$ ecc. Allora $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n = A_1 \setminus \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n$ e $B_n \subseteq B_{n+1}$. Allora per la continuità della misura crescente $\mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n\right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n)$ da cui la tesi, poiché essendo $\mu(A_1) < +\infty$ possiamo scrivere

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n) = \mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n\right) = \mu\left(A_1 \setminus \bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \mu(A_1) - \mu\left(\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n\right)$$

ma anche

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} (\mu(A_1) - \mu(A_n)) = \mu(A_1) - \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$$

da cui la tesi. □

Osservazione. Notiamo che se fosse $\mu(A_1) = +\infty$ il risultato non segue necessariamente. Ad esempio nello spazio di misura $(\mathbb{N}, 2^{\mathbb{N}}, \#)$ Possiamo considerare la successione $A_1 = \mathbb{N}, A_2 = \mathbb{N} \setminus \{1\}, A_3 = \mathbb{N} \setminus \{1, 2\}$ ecc. Allora $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n = \emptyset$ ma $\mu(A_n) = +\infty$ per ogni $n \in \mathbb{N}$. Quindi il limite delle misure è $+\infty$ ma la misura dell'intersezione è 0

1.2 Misura esterna

Definizione 1.5: Misura esterna

Sia Ω un insieme e consideriamo l'algebra 2^Ω , allora $\lambda : 2^\Omega \rightarrow [0, +\infty]$ si dice **misura esterna** se

1. $\lambda(\emptyset) = 0$
2. (monotonia) Se $A \subseteq B$ allora $\lambda(A) \leq \lambda(B)$
3. (sub-additività) Se $\{A_n\}$ è una successione di insiemi di 2^Ω allora

$$\lambda\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \lambda(A_n)$$

Ora vogliamo introdurre su \mathbb{R}^N una misura esterna, che chiameremo μ^* . Lavoriamo con intervalli di \mathbb{R}^n , ossia prodotti cartesiani di intervalli reali di estremi sinistri $\{a_1, \dots, a_N\}$ e destri $\{b_1, \dots, b_N\}$ di ogni tipologia. Naturalmente abbiamo che $a_i \leq b_i$ per ogni $i \in \{1, \dots, N\}$. Un intervallo I di \mathbb{R}^n è dunque il prodotto cartesiano degli n intervalli di estremi a_i e b_i , con $i \in \{1, \dots, N\}$. Per questi intervalli possiamo definire $|I| = \prod_{i=1}^N (b_i - a_i)$ la misura elementare. Allora definiamo

$$\mu^*(A) := \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |I_i| : A \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n \right\}$$

Procediamo ora col verificare che questa è una misura esterna.

1. Naturalmente $\mu^*(\emptyset) = 0$ perché l'insieme vuoto è contenuto in ogni insieme, in particolare per ogni ε posso creare una successione di intervalli con $\sum_{i=1}^{\infty} |I_i| < \varepsilon$
2. Se $A \subseteq B$ allora $\mu^*(A) \leq \mu^*(B)$. Infatti tutte le successioni di intervalli che ricoprono B ricoprono anche A .
3. Abbiamo $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ e vogliamo mostrare che $\mu^*(A) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu^*(A_n)$. Possiamo supporre che la serie converga finita e tutti gli $\mu^*(A_n)$ siano quindi finiti, perché altrimenti la disuguaglianza è banalmente soddisfatta. Allora per la definizione di μ^* abbiamo che per ogni n e per ogni $\varepsilon > 0$, esiste una successione $\{I_{n,k}\}_{k \in \mathbb{N}}$ tale che $A_n \subseteq \bigcup_{k=1}^{\infty} I_{n,k}$ e $\sum_{k=1}^{\infty} |I_{n,k}| < \mu^*(A_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}$. Allora la successione $\{I_{n,k}\}_{n,k \in \mathbb{N}}$ ricopre A . Allora per la definizione di μ^* sicuramente abbiamo che

$$\mu^*(A) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} |I_{n,k}| < \sum_{n=1}^{\infty} \left(\mu^*(A_n) + \frac{\varepsilon}{2^n} \right) = \varepsilon + \sum_{n=1}^{\infty} \mu^*(A_n)$$

Dove sommare su k e poi su n è equivalente a ogni altro modo di svolgere la somma perché la serie è assolutamente convergente.

Si può verificare che $\mu^*(I) = |I|$ per gli intervalli, infatti naturalmente $\mu^*(I) \leq |I|$ perché il ricoprimento $\{I\}$ fa parte dell'insieme su cui si fa l'inf. Per l'altra disuguaglianza, consideriamo per ogni $\varepsilon > 0$ una successione $\{I_i\}$ di intervalli tale che

$$\sum_{i=1}^{\infty} |I_i| < \mu^*(I) + \frac{\varepsilon}{2}$$

Ora dico che esiste una successione di intervalli aperti J_i tale che $I_i \subseteq J_i$ e inoltre $\sum_{i=1}^{\infty} |J_i| \leq \sum_{i=1}^{\infty} |I_i| + \frac{\varepsilon}{2}$ (basta richiedere che $|J_i| \leq |I_i| + \frac{\varepsilon}{2^{i+1}}$). Succede allora che

$I \subseteq \bigcup_{i=1}^{\infty} J_i$. Ora diciamo che esiste un intervallo chiuso $K \subseteq I$ tale che $|K| \geq |I| - \varepsilon$, succede quindi che $K \subseteq \bigcup_{i=1}^{\infty} J_i$, dunque essendo K compatto e J_i aperti esiste un sottoricoprimento finito di K . A meno di riordinare i J_i quindi $K \subseteq \bigcup_{i=1}^k J_i$ per un qualche $k \in \mathbb{N}$. Allora abbiamo

$$|I| - \varepsilon \leq |K| \leq \sum_{i=1}^k |J_i| \leq \sum_{i=1}^{\infty} |J_i| \leq \mu^*(I) + \varepsilon$$

che essendo vero per ogni ε ci porta a ottenere la disuguaglianza $|I| \leq \mu^*(I)$.

1.3 Misura di Lebesgue

Ora invece vogliamo costruire la misura di Lebesgue e gli insiemi misurabili secondo Lebesgue, ma prima introduciamo un po' di proposizioni.

Proposizione 1.4. Per $\delta > 0$ fissato e per $A \subseteq \mathbb{R}^N$ si ha che

$$\mu^*(A) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^{\infty} |I_i| : A \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n, \quad \text{diam}(I_n) \leq \delta \right\}$$

Dimostrazione. Se io prendo un qualunque ricoprimento di A con intervalli, posso costruirne uno analogo dove il diametro di ogni intervallo è $\leq \delta$. Questo si può fare eventualmente "spezzando" gli intervalli in intervalli più piccoli, tenendo la somma della serie uguale. \square

Proposizione 1.5. Se F_1, \dots, F_n sono insiemi chiusi, limitati e disgiunti a due a due, allora la

$$\mu^* \left(\bigcup_{i=1}^n F_i \right) = \sum_{i=1}^n \mu^*(F_i)$$

Dimostrazione. Iniziamo con due insiemi, F_1 e F_2 chiusi e limitati, con $F_1 \cap F_2 = \emptyset$. Allora per la subadditività della misura esterna $\mu^*(F_1 \cup F_2) \leq \mu^*(F_1) + \mu^*(F_2)$. Inoltre, $\forall \varepsilon > 0$ esiste (per la definizione con l'inf) un ricoprimento $\{I_n\}$ di $F_1 \cup F_2$ tale che $\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(F_1 \cup F_2) + \varepsilon$, chiediamo inoltre che $\text{diam}(I_n) \leq \frac{d}{3}$, con d la distanza tra F_1 e F_2 .

Tutti gli I_n tali che $I_n \cap F_1 \neq \emptyset$ danno un ricoprimento di F_1 , e similmente tutti gli I_m tali che $I_m \cap F_2 \neq \emptyset$ danno un ricoprimento di F_2 . Allora necessariamente

$$\mu^*(F_1) + \mu^*(F_2) \leq \sum_{I_n \cap F_1 \neq \emptyset} |I_n| + \sum_{I_m \cap F_2 \neq \emptyset} |I_m| \leq \mu^*(F_1 \cup F_2) + \varepsilon$$

Infine procedendo per induzione si ottiene il risultato con n insiemi. \square

Proposizione 1.6. \forall aperto limitato G e $\forall \varepsilon > 0$, esiste $F \subseteq G$ chiuso tale che

$$\mu^*(F) > \mu^*(G) - \varepsilon$$

Dimostrazione. Costruisco una successione I_n di intervalli disgiunti tali che $G = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n$ e $\mu^*(G) \leq \sum_{i=1}^{\infty} |I_n|$ (notare che vengono presi tutti i punti perché G è aperto usando la reticolazione in figura 1). Dico che esiste $\bar{n} \in \mathbb{N}$ tale che $\sum_{i=1}^{\bar{n}} |I_n| > \mu^*(G) - \frac{\varepsilon}{2}$.

Per ognuno degli I_i fisso un intervallo chiuso $J_i \subseteq I_i$ e tale che $|J_i| > |I_i| - \frac{\varepsilon}{2\bar{n}}$. In questo modo ho che evidentemente i J_i sono chiusi, limitati e disgiunti a due a due. Allora $F = \bigcup_{i=1}^{\bar{n}} J_i$. Allora per la proposizione precedente $\mu^*(F) = \sum_{i=1}^{\bar{n}} \mu^*(J_i) = \sum_{i=1}^{\bar{n}} |J_i| > \sum_{i=1}^{\bar{n}} |I_i| - \frac{\varepsilon}{2} > \mu^*(G) - \varepsilon$. \square

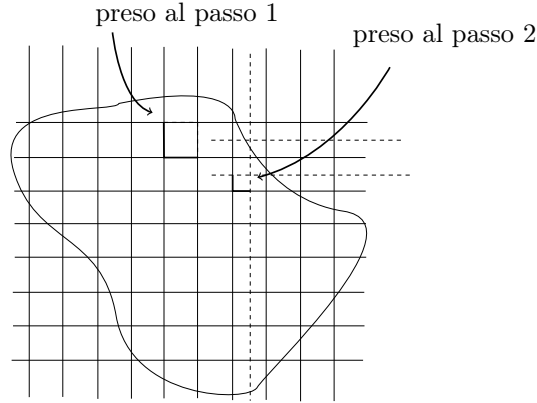


Figura 1: Reticolazione usata per costruire I_n della dimostrazione della Proposizione 1.6

Proposizione 1.7. \forall aperto limitato G , \forall chiuso $F \subseteq G$, allora $\mu^*(G \setminus F) = \mu^*(G) - \mu^*(F)$.

Dimostrazione. Applico la proposizione 1.6 a $G \setminus F$, ottenendo che esiste un chiuso $F_1 \subseteq G \setminus F$ tale che $\mu^*(F_1) > \mu^*(G \setminus F) - \varepsilon$. Allora $\mu^*(F) + \mu^*(F_1) = \mu^*(F \cup F_1)$, da cui

$$\mu^*(F) + \mu^*(G \setminus F) < \mu^*(F) + \mu^*(F_1) + \varepsilon = \mu^*(F \cup F_1) + \varepsilon \leq \mu^*(G) + \varepsilon$$

Inoltre $\mu^*(G) \leq \mu^*(F) + \mu^*(G \setminus F)$ da cui l'uguaglianza. Poiché sono tutti valori finiti, posso sottrarre $\mu^*(F)$ da ambo i lati ottenendo la tesi. \square

Definizione 1.6: Misurabilità secondo Lebesgue

Un insieme $A \subseteq \mathbb{R}^N$ è **misurabile secondo Lebesgue** se $\forall \varepsilon > 0$ esistono un chiuso $F_\varepsilon \subseteq A$ e un aperto $G_\varepsilon \supseteq A$ tali che $\mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \leq \varepsilon$

Osservazione. La misura esterna μ^* ristretta alla classe degli insiemi misurabili sarà una misura.

Teorema 1.8

La famiglia \mathcal{M} degli insiemi misurabili secondo Lebesgue è un'algebra.

Dimostrazione. 1. \emptyset è misurabile, poiché $F = \emptyset$ e $G = \emptyset$ soddisfano la definizione.

2. Se A è misurabile, allora $\forall \varepsilon > 0$ esistono $F_\varepsilon \subseteq A$ chiuso e $G_\varepsilon \supseteq A$ aperto tali che $\mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \leq \varepsilon$. Allora $F_\varepsilon^C \supseteq A^C$ aperto e $G_\varepsilon^C \subseteq A^C$ chiuso, e $\mu^*(G_\varepsilon^C \setminus F_\varepsilon^C) = \mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \leq \varepsilon$.

3. Se A, B sono misurabili, allora $\forall \varepsilon > 0$ esistono $F_\varepsilon \subseteq A$ chiuso e $G_\varepsilon \supseteq A$ aperto tali che $\mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \leq \frac{\varepsilon}{2}$, e $F'_\varepsilon \subseteq B$ chiuso e $G'_\varepsilon \supseteq B$ aperto tali che $\mu^*(G'_\varepsilon \setminus F'_\varepsilon) \leq \frac{\varepsilon}{2}$.

Allora

chiuso $F_\varepsilon \cap F'_\varepsilon \subseteq A \cap B \subseteq G_\varepsilon \cap G'_\varepsilon$ aperto

e

$$\mu^*(G_\varepsilon \cap G'_\varepsilon \setminus F_\varepsilon \cap F'_\varepsilon) \leq \mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) + \mu^*(G'_\varepsilon \setminus F'_\varepsilon) \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$



Figura 2: $G_\varepsilon \cap G'_\varepsilon \setminus F_\varepsilon \cap F'_\varepsilon \subseteq (G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \cup (G'_\varepsilon \setminus F'_\varepsilon)$

□

Proposizione 1.9. Se $A \subseteq \mathbb{R}^N$ è limitato, allora A è misurabile se e solo se $\forall \varepsilon > 0, \exists F_\varepsilon \subseteq A$ chiuso tale che $\mu^*(F_\varepsilon) > \mu^*(A) - \varepsilon$

Dimostrazione.

\Rightarrow Se A è misurabile, allora $\forall \varepsilon > 0$ esistono $F_\varepsilon \subseteq A$ chiuso e $G_\varepsilon \supseteq A$ aperto tali che $\mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \leq \varepsilon$. Allora $\mu^*(A) \leq \mu^*(F_\varepsilon) + \mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) \leq \mu^*(F_\varepsilon) + \varepsilon$

\Leftarrow Dico che esiste una successione I_n di intervalli aperti e di diametro ≤ 1 tali che $A \subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n$ e $\sum_{i=1}^{\infty} |I_n| < \mu^*(A) + \varepsilon$. Prendo come G_ε l'unione di tutti gli I_n tali che $I_n \cap A \neq \emptyset$. Allora G_ε è aperto limitato contenente A , questo perché avendo diametro minore o eguale a 1 l'unione si “distacca” da A al più di 1. Allora

$$\mu^*(G_\varepsilon \setminus F_\varepsilon) = \mu^*(G_\varepsilon) - \mu^*(F_\varepsilon) \leq \sum_{i=1}^{\infty} |I_n| - \mu^*(F_\varepsilon) < \mu^*(A) + \varepsilon - \mu^*(F_\varepsilon) < 2\varepsilon$$

Dove nell'ultima disuguaglianza si è usata l'ipotesi.

□

Teorema 1.10

La famiglia \mathcal{M} degli insiemi misurabili secondo Lebesgue è una σ -algebra e inoltre μ^* è σ -additiva su \mathcal{M} . In altre parole, μ^* ristretto a \mathcal{M} è una misura.

Dimostrazione. Divideremo la dimostrazione in tre parti.

1. Sia $\{A_n\} \subseteq \mathcal{M}$ con $A_n \cap A_m = \emptyset, \forall n \neq m$ e $\exists I$ intervallo tale che $A_n \subseteq I, \forall n \in \mathbb{N}$.

Allora $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \subseteq I$. Ora possiamo usare la proposizione 1.9 per dire che, dato $\varepsilon > 0, \forall n \in \mathbb{N}$ esiste un $F_n \subseteq A_n$ chiuso tale che $\mu^*(F_n) > \mu^*(A_n) - \frac{\varepsilon}{2^{n+1}}$. Inoltre $\mu^*(A) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i)$ allora esiste $k \in \mathbb{N}$ tale che $\sum_{i=1}^k \mu^*(A_i) > \mu^*(A) - \frac{\varepsilon}{2}$ per il limite. Allora sia $F = \bigcup_{n=1}^k F_n$ chiuso. Allora possiamo dire che $\mu^*(F) = \sum_{i=1}^k \mu^*(F_i) > \sum_{i=1}^k \mu^*(A_i) - \frac{\varepsilon}{2} > \mu^*(A) - \varepsilon$. Ora poiché

abbiamo trovato un chiuso contenuto in A con la proprietà richiesta, allora A è misurabile, poiché è limitato (proposizione 1.9).

Ora se k è generico

$$\sum_{i=1}^k \mu^*(A_i) < \sum_{i=1}^k \mu^*(F_i) + \frac{\varepsilon}{2} = \mu^*\left(\bigcup_{i=1}^k F_i\right) + \frac{\varepsilon}{2} \leq \mu^*(A) + \frac{\varepsilon}{2}$$

Da cui trovo che, per $\varepsilon \rightarrow 0$ e $k \rightarrow \infty$

$$\mu^*(A) \geq \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i) \geq \mu^*(A)$$

dove la seconda uguaglianza è per la subaddittività della misura esterna.

2. Sia $\{A_n\} \subseteq \mathcal{M}$ con $A_n \cap A_m = \emptyset$, $\forall n \neq m$. Di nuovo sia $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$.

Reticoliamo \mathbb{R}^N con intervalli $\{I_j\}$ tali che $I_i \cap I_j = \emptyset$, $\forall i \neq j$ e $\bigcup_{j=1}^{\infty} I_j = \mathbb{R}^N$. Ci interessiamo agli insiemi $B_j = \bigcup_{i=1}^{\infty} (A_i \cap I_j)$. Allora i B_j sono misurabili per il punto 1, infatti $(A_i \cap I_j) \subseteq I_j$ e sono disgiunti a due a due. Ora notiamo che $B_j \cap B_i = \emptyset$ $\forall A_j \neq i$. Inoltre $\bigcup_{j=1}^{\infty} B_j = A$. Ora per $\varepsilon > 0$ fissato e $\forall j$ esistono F_j chiuso e G_j aperto tali che $F_j \subseteq B_j \subseteq G_j$ e $\mu^*(G_j \setminus F_j) \leq \frac{\varepsilon}{2^j}$. A questo punto abbiamo

$$F := \bigcup_{j=1}^{\infty} F_j \subseteq A \subseteq \bigcup_{j=1}^{\infty} G_j =: G$$

È evidente che G è aperto. Inoltre F è chiuso, perché data una successione $\{x_n\}$ convergente in \mathbb{R}^N e a valori in F . Poiché è convergente è limitata, e allora i suoi valori cadono in un numero finito di insiemi F_j . Poiché l'unione di quegli F_j è chiusa allora $x \in F$ è chiuso.

Adesso prendiamo

$$G \setminus F = \bigcup_{j=1}^{\infty} (G_j \setminus F) \subseteq \bigcup_{j=1}^{\infty} (G_j \setminus F_j)$$

che ha misura $\mu^*(G \setminus F) \leq \sum_{j=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^j} = \varepsilon$ quindi A è misurabile.

Ora vogliamo mostrare la σ -addittività. Possiamo assumere che $\mu^*(A_i) < +\infty$ per ogni i , altrimenti la tesi è banale. Ora supponiamo che $\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i) = +\infty$, allora ne deduciamo che

$$\sum_{i=1}^k \mu^*(A_i) \stackrel{\mathcal{M} \text{ è un'algebra}}{=} \mu^*\left(\bigcup_{i=1}^k A_i\right) \leq \mu^*(A) \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

e quindi $\mu^*(A) = +\infty$.

Supponiamo infine che $\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i)$ converga, allora poiché $\mu^*(A_i)$ è minore o eguale a $\sum_{j=1}^{\infty} \mu^*(A_i \cap I_j)$ abbiamo che

$$\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{j=1}^{\infty} \mu^*(A_i \cap I_j) \stackrel{1.}{=} \sum_{j=1}^{\infty} \mu^*(B_j)$$

Ora analizziamo la ridotta

$$\sum_{j=1}^n \mu^*(B_j) \leq \sum_{j=1}^n \mu^*(F_j) + \sum_{j=1}^n \mu^*(G_j \setminus F_j) \leq \mu^*\left(\bigcup_{j=1}^n F_j\right) + \sum_{j=1}^n \frac{\varepsilon}{2^j} \leq \mu^*(A) + \varepsilon$$

Dove nella disuguaglianza centrale si è usata la proposizione 1.5. Mettendo tutto assieme e avendo $n \rightarrow \infty$ e $\varepsilon \rightarrow 0$ otteniamo che $\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(A_i) \leq \mu^*(A)$ e naturalmente l'altra disuguaglianza è data dalla sub-additività.

3. Sia $\{A_n\} \subseteq \mathcal{M}$ e $A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i$ e vogliamo provare che $A \in \mathcal{M}$.

Costruisco un'altra successione $\{B_n\} \subseteq \mathcal{M}$ di insiemi a due a due disgiunti. Definisco $B_1 = A_1$, $B_2 = A_2 \setminus A_1$, $B_3 = A_3 \setminus (A_1 \cup A_2)$, ecc. Sono misurabili perché sappiamo già che \mathcal{M} è un'algebra. Ora poiché $A = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} B_i$, A è misurabile per il punto 2.

□

Quindi ora possiamo considerare lo spazio di misura di Lebesgue $(\mathbb{R}^N, \mathcal{M}, \mu)$ con \mathcal{M} gli insiemi misurabili secondo Lebesgue e $\mu = \mu^*$ la misura esterna.

Teorema 1.11: Caratterizzazione degli insiemi misurabili

Un insieme $A \subseteq \mathbb{R}^N$ è misurabile se e solo se A può essere rappresentato come

- Unione numerabile di chiusi e di un insieme trascurabile

oppure

- Intersezione numerabile di aperti meno un trascurabile

Dimostrazione. Gli intervalli sono misurabili, l'insieme vuoto è misurabile. Sia N un insieme trascurabile, allora N è misurabile. Infatti $\forall \varepsilon > 0$ prendo $\emptyset =: F \subseteq N \subseteq G := \bigcup_{i=1}^{\infty} I_i$ con I_i intervalli aperti e $\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(I_i) < \varepsilon$, a questo punto naturalmente quindi $\mu^*(G \setminus F) < \varepsilon$. Gli aperti sono misurabili, infatti se è limitato si scrive come unione numerabile di intervalli. Ora se A è un aperto qualunque $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} (A \cap (-n, n)^N)$ e quindi è misurabile. Inoltre tutti i chiusi sono misurabili in quanto complementare di aperti. Ne consegue che la σ -algebra \mathcal{B} di Borel generata dalla famiglia τ degli aperti di \mathbb{R}^n è contenuta in \mathcal{M} .

Ne consegue che se scrivo A come unione numerabile di chiusi e di un trascurabile allora A è misurabile. Stessa cosa se scrivo A come intersezione numerabile di aperti meno un trascurabile.

Per il viceversa, supponiamo A misurabile, allora per ogni $n \in \mathbb{N}$ esistono chiuso F_n e aperto G_n con $F_n \subseteq A \subseteq G_n$ e $\mu^*(G_n \setminus F_n) < \frac{1}{n}$. Ora considero $F = \bigcup_{n=1}^{\infty} F_n$ e sia $N = A \setminus F$. N è allora trascurabile perché $\mu^*(N) = \mu^*(A \setminus F) \leq \mu^*(G_n \setminus F) \leq \mu^*(G_n \setminus F_n) < \frac{1}{n}$ per ogni n quindi $\mu^*(N) = 0$. In pratica quindi $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} F_n \cup N$ unione numerabile di chiusi e di un trascurabile. Il complementare di A quindi si può rappresentare come $A^C = (\bigcup_{n \in \mathbb{N}} F_n)^C \cap N^C = (\bigcap_{n \in \mathbb{N}} F_n^C) \setminus N$ ossia nel secondo modo. □

Proposizione 1.12. Vale la seguente proprietà:

$$\mu^*(A) = \inf\{\mu(G) : G \text{ aperto}, G \supseteq A\} \quad \forall A \subseteq \mathbb{R}^n$$

Se inoltre $A \in \mathcal{M}$ allora

$$\mu(A) = \mu^*(A) = \sup\{\mu(F) : F \text{ chiuso e limitato}, F \subseteq A\}$$

Dimostrazione. La prima è una conseguenza della rappresentabilità di un aperto tramite intervalli. Fissato ora $\varepsilon > 0$ e posto $A_n = A \cap (-n, n)^N$, per A misurabile abbiamo

$$\mu(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n)$$

Se $\mu(A) < +\infty$ esiste n tale che $\mu(A_n) > \mu(A) - \frac{\varepsilon}{2}$ e A_n contiene un chiuso F tale che $\mu(F) > \mu(A_n) - \frac{\varepsilon}{2}$. Se invece $\mu(A) = +\infty$ esiste n con $\mu(A_n) > \varepsilon$ e A_n contiene un chiuso F tale che $\mu(F) > \mu(A_n) - \frac{\varepsilon}{2}$, pertanto $\mu(F) > \frac{\varepsilon}{2}$. □

1.4 Insiemi Trascurabili

Si tratta di insiemi la cui misura esterna è nulla, vediamo alcuni esempi.

Esempio 1.9. In \mathbb{R} i punti sono trascurabili e le unioni numerabili di trascurabili è trascurabile per σ -additività. In particolare quindi \mathbb{Q} è trascurabile in \mathbb{R}

La funzione di Dirichlet è un esempio di funzione che non è integrabile secondo Riemann, ma è integrabile secondo Lebesgue. Vedremo più avanti in dettaglio ma per ora notiamo che la funzione di Dirichlet è

$$d(x) = \begin{cases} 1 & x \in \mathbb{Q} \\ 0 & x \notin \mathbb{Q} \end{cases}$$

Allora $d = 0$ quasi ovunque in \mathbb{R} .

Esempio 1.10. In \mathbb{R}^2 segmenti e rette sono insiemi trascurabili. Quindi ad esempio l'insieme

$$A = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : x \in \mathbb{Q}\}$$

è trascurabile in \mathbb{R}^2 poiché unione numerabile di rette $x = q$ con $q \in \mathbb{Q}$

Esempio 1.11 (Insieme di Cantor). L'insieme di Cantor è un trascurabile che ha la cardinalità del continuo. Si costruisce prendendo una successione di insiemi chiusi in \mathbb{R} .

$$\begin{aligned} C_0 &= [0, 1] \\ C_1 &= \left[0, \frac{1}{3}\right] \cup \left[\frac{2}{3}, 1\right] \\ C_2 &= \left[0, \frac{1}{9}\right] \cup \left[\frac{2}{9}, \frac{3}{9}\right] \cup \left[\frac{6}{9}, \frac{7}{9}\right] \cup \left[\frac{8}{9}, 1\right] \\ &\vdots \end{aligned}$$

C_n è composto da 2^n intervallini ciascuno di lunghezza $\frac{1}{3}^n$. L'insieme di Cantor è definito come

$$C = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} C_n \tag{1.1}$$

Allora C è chiuso perché ogni C_n è chiuso, e C è non vuoto perché ad esempio $0 \in C$.

C_n è una successione decrescenti di insiemi, di cui $\mu(C_0) = 1 < +\infty$. Allora per continuità della misura esterna

$$\mu(C) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(C_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^n = 0$$

quindi C è trascurabile.

Ora vogliamo dimostrare che ha la cardinalità del continuo. Consideriamo di usare la base ternaria, quindi ogni numero in $[0, 1]$ può essere scritto come $0.c_1c_2c_3\dots c_n\dots_3$ con $c_i \in \{0, 1, 2\}$ ed è equivalente a $\sum_{n=1}^{\infty} c_n 3^{-n}$. Quindi ad



Figura 3: Successione la cui intersezione è l'insieme di Cantor

esempio il punto $\frac{1}{3}$ si può scrivere come 0.1 oppure $0.\bar{2}$ dove la barra indica la periodicità. Notare ora che i punti dell'insieme di Cantor si possono rappresentare in base ternaria utilizzando le sole cifre 0 e 2.

I punti dell'intervallo $[0, 1]$ si possono rappresentare anche in base binaria, quindi $y \in [0, 1]$ si può scrivere come $0.d_1d_2\dots d_n\dots_2$ dove $d_i \in \{0, 1\}$ per ogni i e $y = \sum_{n=1}^{\infty} d_n 2^{-n}$. Ad esempio $1 = 0.\bar{1}_2$.

Adesso possiamo quindi costruire una funzione suriettiva dall'insieme di Cantor ai punti di $[0, 1]$ in questo modo:

$$\begin{aligned} x \in C &\mapsto y \in [0, 1] \\ x = 0.c_1c_2\dots c_n\dots_3 &\mapsto y = 0.d_1d_2\dots d_n\dots_2 \\ d_n &= \frac{c_n}{2} \quad \forall n \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Ossia associamo a ogni punto dell'insieme di Cantor il numero reale ottenuto dividendo ogni sua cifra in base ternaria per due e leggendolo in base binaria. È una funzione suriettiva perché per ogni punto $y \in [0, 1]$ possiamo ottenere un $x \in C$ moltiplicando per due ogni cifra e leggendo il numero in base ternaria. Notare che questa funzione non è iniettiva poiché, ad esempio, sia $\frac{1}{3} = 0.0\bar{2}_3$ che $\frac{2}{3} = 0.2_3$ hanno come immagine $\frac{1}{2} = 0.1_2 = 0.0\bar{1}_2$. Non è difficile comunque trovare una funzione iniettiva, ad esempio l'inclusione da C a $[0, 1]$ è una funzione iniettiva e quindi abbiamo che C e $[0, 1]$ hanno la stessa cardinalità.

1.5 Funzioni misurabili

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile e sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$

Definizione 1.7: Funzione misurabile

La funzione $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$ si dice **misurabile** se $\forall \alpha \in \mathbb{R}$ l'insieme

$$f^{-1}((\alpha, +\infty]) = \{x \in \Omega : f(x) > \alpha\} \in \mathcal{M}$$

La definizione verrà parzialmente motivata dalla seguente proposizione:

Proposizione 1.13. *Ciascuna delle seguenti affermazioni implica le altre:*

- i) $f^{-1}((\alpha, +\infty]) \in \mathcal{M} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$
- ii) $f^{-1}([\alpha, +\infty]) \in \mathcal{M} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$
- iii) $f^{-1}([-\infty, \alpha)) \in \mathcal{M} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$
- iv) $f^{-1}([-\infty, \alpha]) \in \mathcal{M} \quad \forall \alpha \in \mathbb{R}$

Dimostrazione. Dimostriamo che $i) \implies ii) \implies iii) \implies iv) \implies i)$.

Scriviamo quindi

$$f^{-1}([\alpha, +\infty]) = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \left\{ x \in \Omega : f(x) > \alpha - \frac{1}{n} \right\}$$

che è intersezione numerabile di insiemi misurabili (se vale la i)), quindi è misurabile.

Se ora vale la ii), allora

$$f^{-1}([-\infty, \alpha)) = (f^{-1}([\alpha, +\infty]))^C \in \mathcal{M}$$

per cui vale la iii). Analogamente alla prima implicazione, se vale la iii) allora

$$f^{-1}([-\infty, \alpha]) = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} \left\{ x \in \Omega : f(x) > \alpha + \frac{1}{n} \right\} \in \mathcal{M}$$

e quindi vale la iv). Infine se vale la iv) allora, analogamente alla seconda implicazione,

$$f^{-1}((\alpha, +\infty]) = (f^{-1}([-\infty, \alpha]))^C \in \mathcal{M}$$

e quindi vale la i). □

Grazie alla proposizione so che f è misurabile se e solo se le controimmagini di tutte le semirette sono misurabili. A questo punto però anche tutti i segmenti sono misurabili, infatti ad esempio $[a, b] = [a, +\infty] \cap [-\infty, b]$ quindi se le controimmagini di $[a, +\infty]$ e di $[-\infty, b]$ sono misurabili, allora anche la controimmagine di $[a, b]$ è misurabile, in quanto l'intersezione delle due. Ora avendo quindi che le controimmagini degli intervalli sono misurabili, abbiamo che anche le controimmagini dei borelliani sono misurabili, in quanto i borelliani sono unioni numerabili di intervalli.

Praticamente ogni funzione che possa venire in mente a chiunque è misurabile, e costruire una funzione non misurabile è un'operazione non banale e richiede l'assioma della scelta. Ora procediamo con alcune proprietà della classe delle funzioni misurabili.

Proposizione 1.14. *Siano f, g funzioni misurabili. Allora anche $\max(f, g)$ e $\min(f, g)$ sono misurabili.*

Dimostrazione.

$$\{x \in \Omega : \max(f, g)(x) > \alpha\} = \{x \in \Omega : f(x) > \alpha\} \cup \{x \in \Omega : g(x) > \alpha\}$$

che è unione di insiemi misurabili, quindi è misurabile. Analogamente per il minimo con l'intersezione. □

Proposizione 1.15. *Sia f una funzione misurabile, allora anche $-f, f^+, f^-, |f|$ sono misurabili*

Dimostrazione. Per $-f$:

$$\{x \in \Omega : -f(x) > \alpha\} = \{x \in \Omega : f(x) < -\alpha\}$$

che è misurabile per ipotesi.

Naturalmente anche la funzione 0 è misurabile, poiché la controimmagine delle semirette è \emptyset oppure Ω che sono entrambi misurabili. Quindi anche $f^+ = \max(f, 0)$ e $f^- = -\min(f, 0)$ sono misurabili per sopra e per la proposizione precedente.

Per $|f|$:

$$\{x \in \Omega : |f(x)| > \alpha\} = \begin{cases} \{x \in \Omega : f(x) > \alpha\} \cup \{x \in \Omega : f(x) < -\alpha\} & \alpha \geq 0 \\ \Omega & \alpha < 0 \end{cases}$$

□

Proposizione 1.16. *Se f_n è una successione di funzioni misurabili allora*

$$g(x) = \sup_n f_n(x), \quad h(x) = \inf_n f_n(x), \quad u(x) = \limsup_n f_n(x), \quad v(x) = \liminf_n f_n(x)$$

sono tutte misurabili

Corollario 1.16.1. *Se f_n converge puntualmente a f allora f è misurabile.*

Dimostrazione. Sia $g(x) = \sup_n f_n(x)$, allora

$$\{x \in \Omega : g(x) > \alpha\} = \bigcup_{n=1}^{\infty} \{x \in \Omega : f_n(x) > \alpha\}$$

poiché significa che esiste almeno un n tale che $f_n(x) > \alpha$.

Sia $h(x) = \inf_n f_n(x)$, consideriamo

$$\{x \in \Omega : h(x) \geq \alpha\} = \bigcap_{n=1}^{\infty} \{x \in \Omega : f_n(x) > \alpha\}$$

poiché significa che per ogni n vale $f_n(x) > \alpha$.

Per quanto riguarda $u(x) = \sup_n \inf_{k \geq n} f_k(x)$ e $v(x) = \inf_n \sup_{k \geq n} f_k(x)$ si ha quindi che sono il sup e l'inf di successioni di funzioni misurabili per la prima parte della proposizione, quindi sono misurabili per la prima parte della proposizione.

Il corollario segue ovviamente poiché se la funzione converge allora il limite è ad esempio uguale al \liminf □

Proposizione 1.17. *Siano f, g misurabili. Allora la somma $f + g$, se è ben definita¹, è misurabile.*

Dimostrazione.

$$\{x \in \Omega : f(x) + g(x) > \alpha\} = \bigcup_{q \in \mathbb{Q}} (\{x \in \Omega : f(x) > \alpha - q\} \cap \{x \in \Omega : g(x) > q\})$$

che è unione numerabile di insiemi misurabili, quindi è misurabile. L'eguaglianza è giustificata dal fatto che se $f(x) + g(x) > \alpha$ e $|g(x)| < \infty$ allora ad esempio $f(x) > \alpha - g(x) > \alpha - q$ per qualche $q < g(x)$ razionale, che esiste perché sicuramente tra $\alpha - f(x)$ e $g(x)$ esiste un razionale per densità di \mathbb{Q} , mentre se $f(x) = +\infty$ allora sicuramente $f(x) > \alpha - q$ per ogni $q \in \mathbb{Q}$ quindi basta sceglierne uno tale che $g(x) > q$ che è fattibile sempre poiché per ipotesi $g(x) > -\infty$. L'altra implicazione invece è data dal fatto che se, per qualche q , $f(x) > \alpha - q$ e $q < g(x)$ allora

¹ossia quando non succede mai che una delle due faccia $+\infty$ e l'altra $-\infty$

$f(x) > \alpha - g(x)$ da cui $x \in (f + g)^{-1}((\alpha, +\infty])$. Infine se invece $g(x) = +\infty$ allora qualsiasi x è in $(f + g)^{-1}((\alpha, +\infty])$, ed esiste sempre un q tale che $f(x) > \alpha - q$ poiché $f(x) > -\infty$. È facile similmente notare che se $f(x)$ oppure $g(x)$ sono eguali a $-\infty$ allora entrambi gli insiemi sono \emptyset . \square

Proposizione 1.18. *Siano f, g misurabili. Allora $f \cdot g$ è misurabile, purché l'operazione sia ben definita.*

Proposizione 1.19. *Iniziamo provando che se h è misurabile allora h^2 è misurabile. Questo perché $h^2(x) > \alpha \iff |h(x)| > \sqrt{\alpha}$ se α è positivo (altrimenti la controimmagine è banalmente misurabile). Ma allora chiedere che h^2 sia misurabile è equivalente a chiedere che lo sia $|h|$.*

Inoltre se h è misurabile, allora ch , con $c \in \mathbb{R}$ è misurabile in quanto $c \cdot h(x) > \alpha \iff h(x) > \frac{\alpha}{c}$.

Notare adesso che $\frac{(f + g)^2 - (f - g)^2}{4}$.

Proposizione 1.20. *Siano f, g misurabili. Allora $\frac{f}{g}$ è misurabile, purché l'operazione sia ben definita.*

Dimostrazione. Basta controllare che se h è misurabile e $h \neq 0$ allora anche $\frac{1}{h}$ è misurabile, poi usare la proposizione precedente. Infatti $\frac{1}{h(x)} > \alpha$ se e solo se

- $0 < h(x) < \frac{1}{\alpha}$ se $\alpha > 0$
- $h(x) < \frac{1}{\alpha}$ o $h(x) > 0$ se $\alpha < 0$
- $h(x) > 0$ se $\alpha = 0$

In tutti i tre e casi gli x che soddisfano tale requisito formano per ipotesi un insieme misurabile. \square

Definizione 1.8: Funzione semplice

Consideriamo uno spazio di misura $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$. Le **funzioni semplici** sono le funzioni che assumono un numero finito di valori reali. Quindi $s : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ è semplice se si può scrivere come combinazione lineare finita di funzioni caratteristiche. Quindi abbiamo

$$s = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{E_i}$$

dove E_1, \dots, E_n sono sottoinsiemi di Ω e $c_1, \dots, c_n \in \mathbb{R}$.

Inoltre la funzione è semplice misurabile se $E_1, \dots, E_n \in \mathcal{M}$.

Esiste sempre una rappresentazione in tale modo di s dove i coefficienti c_1, \dots, c_n sono diversi tra loro e gli insiemi E_1, \dots, E_n sono a due a due disgiunti. Queste funzioni sono particolarmente utili nell'approssimare funzioni. Più precisamente

Proposizione 1.21. *Sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$. Allora esiste una successione $\{s_n\}$ di funzioni semplici tali che $s_n \rightarrow f$ puntualmente. Se f è misurabile, allora anche le s_n possono essere scelte tutte misurabili. Inoltre se $f \geq 0$ ($f \leq 0$) in Ω , allora la successione $\{s_n\}$ può essere presa non decrescente (non crescente).*

Dimostrazione. Cominciamo da f non negativa. Per n fissato scegliamo gli insiemi in base ai valori di f . Quindi scegliamo $i = 1, \dots, n2^n$ e prendiamo

$$E_{n,i} = \left\{ x \in \Omega : \frac{i-1}{2^n} \leq f(x) < \frac{i}{2^n} \right\} \quad \forall n \in \mathbb{N}, \forall i \in \{1, \dots, n2^n\}$$

Inoltre sia

$$F_n = \{x \in \Omega : f(x) \geq n\}$$

Ora possiamo scrivere

$$s_n(x) = \sum_{i=1}^{n2^n} \frac{i-1}{2^n} \chi_{E_{n,i}}(x) + n \chi_{F_n}(x)$$

Ora abbiamo chiaramente per costruzione che $s_n \leq f$. Vogliamo mostrare che per ogni $x \in \Omega$ abbiamo $s_n(x) \rightarrow f(x)$.

- Se $f(x) = +\infty$ allora $s_n(x) = n \rightarrow +\infty$
- Se $f(x) = 0$ allora $s_n(x) = 0 \rightarrow 0$
- Se $n \leq f(x) < n+1$ allora $|f(x) - s_n(x)| \leq \frac{1}{2^n} \rightarrow 0$

È chiaro che se f è misurabile allora ogni s_n è misurabile, gli insiemi scelti sono controimmagini di segmenti e una retta.

Ora dobbiamo controllare che la successione s_n che abbiamo costruito sia crescente. Infatti passando da s_n a s_{n+1} abbiamo un intervallo in più $[n, n+1)$, inoltre se $f(x) < n$ allora $s_{n+1}(x) = s_n(x)$ oppure $s_{n+1}(x) = s_n(x) + \frac{1}{2^{n+1}}$. In conclusione quindi la successione è non decrescente.

Consideriamo ora f di segno qualsiasi. Abbiamo $f = f^+ - f^-$ e osservo che f^+ e f^- sono non negative. Costruisco due successioni di funzioni semplici s_n^+ e s_n^- che convergono rispettivamente a f^+ e f^- e osservo che $s_n = s_n^+ - s_n^-$ è ancora una successione di funzioni semplici che converge a f . \square

Osservazione. Se f è limitata allora la successione s_n converge uniformemente a f , infatti se $f = f^+ - f^-$ e sia f^+ che f^- sono limitate, per cui succede che $|f^+ - s_n^+| \leq \frac{1}{2^n}$ definitivamente e analogamente per f^- .

Lemma 1.22. *Sia ora $\Omega = \mathbb{R}^N$ e sia \mathcal{L} la σ -algebra degli insiemi misurabili secondo Lebesgue. Allora valgono tutte le considerazioni della proposizione precedente e inoltre la successione $\{s_n\}$ può essere scelta in modo che tutte le s_n siano nulle al di fuori di un compatto*

Dimostrazione. Posso considerare una successione K_n di compatti che invade tutto \mathbb{R}^N (esempio le palle, gli ipercubi, ecc) e operiamo come prima ma con una modifica (caso $f \geq 0$):

$$s_n(x) = \sum_{i=1}^{n2^n} \frac{i-1}{2^n} \chi_{E_{n,i} \cap K_n}(x) + n \chi_{F_n \cap K_n}(x)$$

\square

1.6 Integrale di Lebesgue

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Cominciamo dalle funzioni semplici misurabili non negative, ossia

$$s(x) = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{E_i}(x) \quad c_i \geq 0 \quad E_i \in \mathcal{M} \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}$$

Allora definiamo un *integrale elementare* su $E \in \mathcal{M}$

$$I_E(s) = \sum_{i=1}^n c_i \mu(E \cap E_i)$$

Dove per convenzione $c_i \mu(E \cap E_i) = 0$ se $c_i = 0$ e $\mu(E \cap E_i) = +\infty$.

Esempio 1.12. In \mathbb{R} con la misura di Lebesgue, se prendo $s = \chi_{[0,+\infty)}$, allora $I_{\mathbb{R}}(s) = \mu([0,+\infty)) = +\infty$

Definizione 1.9: Integrale di Lebesgue

Sia $f : \Omega \rightarrow [0, +\infty]$ misurabile e non negativa. Allora per ogni $E \in \mathcal{M}$ definiamo

$$\int_E f d\mu = \sup\{I_E(s) : s \text{ semplice misurabile}, 0 \leq s \leq f \text{ in } E\}$$

Se ora f è misurabile e di segno qualunque allora scrivendo $f = f^+ - f^-$ che noto sono misurabili e non negative, quindi, se almeno uno tra $\int_E f^+ d\mu$ e $\int_E f^- d\mu$ è finito definiamo

$$\int_E f d\mu = \int_E f^+ d\mu - \int_E f^- d\mu$$

Se entrambi f^+ e f^- hanno integrale finito su E allora dico che f è **integrabile** su E e scrivo $f \in L^1(E)$.

Intanto quell'insieme non è vuoto, poiché la funzione $0 \leq f$ è una funzione semplice. Inoltre il sup può essere sia finito che $+\infty$. Se f è una funzione semplice, allora $\int_E f d\mu = I_E(f)$, infatti $f \leq f$ è semplice e per ogni s misurabile e tale che $0 \leq s \leq f$ in E avrò che $I_E(s) \leq I_E(f)$.

NB: *Sommabile* è un sinonimo di *integrabile* e capiterà di usarlo.

Proprietà dell'integrale

1. Se $f \in L^1(E)$ e $\alpha \in \mathbb{R}$, allora $\alpha f \in L^1(E)$ e $\int_E \alpha f d\mu = \alpha \int_E f d\mu$

Dimostrazione. Sia f misurabile e non negativa, sia $\alpha > 0$. Allora $\forall s$ semplice con $0 \leq s \leq f$ in E si ha che $I_E(\alpha s) = \alpha I_E(s)$ e che $0 \leq \alpha s \leq \alpha f$; procedendo con il sup il lato sinistro diventa $\alpha \int_E f d\mu$ e il lato destro notiamo che ogni αs è una funzione semplice u che rispetta la definizione di integrale per αf , quindi procedendo con il sup otteniamo la proprietà. Similmente otteniamo

Ora possiamo estendere a f misurabile e $\alpha \in \mathbb{R}$ scrivendo $f = f^+ - f^-$ e osservando che $\alpha f = \text{sign}(\alpha)|\alpha|f^+ - \text{sign}(\alpha)|\alpha|f^-$ dove se $\alpha < 0$ allora $-\text{sign}(\alpha)f^-$ e $-\text{sign}(\alpha)f^+$ sono non negative e misurabili. \square

2. Se f, g in $L^1(E)$ e $f(x) \leq g(x)$ per ogni $x \in E$ allora $\int_E f d\mu \leq \int_E g d\mu$

Dimostrazione. Sia $f = f^+ - f^-$ e $g = g^+ - g^-$. Allora naturalmente $f^+ \leq g^+$ perché la funzione $x \mapsto x^+$ è non decrescente e $f^- \geq g^-$ perché la funzione $x \mapsto x^-$ è non crescente. Necessariamente ora $\int_E f^+ d\mu \leq \int_E g^+ d\mu$ per definizione col sup e similmente $\int_E g^- d\mu \leq \int_E f^- d\mu$ e infine dalle due disuguaglianze si ottiene quella richiesta. \square

3. Se $\mu(E) < +\infty$, f è misurabile, e esistono $a, b \in \mathbb{R}$ tali che $a \leq f(x) \leq b$ per ogni $x \in E$ allora $f \in L^1(E)$ e $a\mu(E) \leq \int_E f d\mu \leq b\mu(E)$

Dimostrazione. $f = f^+ - f^-$ e abbiamo che $0 \leq a^+ \leq f^+ \leq b^+$ e $a^- \geq f^- \geq b^- \geq 0$. Le funzioni che valgono a^+, b^+, a^-, b^- su E sono funzioni semplici misurabili con integrale dato da $a^+\mu(E), b^+\mu(E), a^-\mu(E), b^-\mu(E)$ rispettivamente. Ora per definizione con il sup abbiamo che $\int_E f^+ d\mu \geq a^+\mu(E)$ e $\int_E f^- d\mu \geq b^-\mu(E)$. Sempre pensando alla definizione col sup notiamo che se s è una funzione semplice misurabile tale che $0 \leq s \leq f^+$ allora $s \leq b^+$ e quindi necessariamente $\int_E f^+ d\mu \leq \int_E b^+ d\mu = I_E(b^+) = b^+\mu(E)$. Similmente si trova anche $\int_E f^- d\mu \leq a^-\mu(E)$. Il risultato segue. \square

4. Se $f \in L^1(E)$, $A \in \mathcal{M}$ e $A \subseteq E$ allora $f \in L^1(A)$

Dimostrazione. Abbiamo che $\int_E f^+ d\mu$ e $\int_E f^- d\mu$ sono entrambi finiti e

$$\int_A f^+ d\mu = \int_E f^+ \chi_A d\mu \leq \int_E f^+ d\mu$$

Similmente per f^- . □

5. Se $\mu(E) = 0$ e f è misurabile allora $f \in L^1(E)$ e $\int_E f d\mu = 0$

Dimostrazione. Consideriamo la definizione col sup di $\int_E f^+ d\mu$ e allora per ogni s semplice misurabile tale che $0 \leq s \leq f^+$ abbiamo che

$$I_E(s) = \sum_{i=1}^n c_i \mu(E \cap E_i) = 0$$
□

Teorema 1.23: Teorema di generazione di misure

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura e sia $f : \Omega \rightarrow [0, +\infty]$ una funzione misurabile e non negativa. Allora la funzione di insieme

$$\nu(E) = \int_E f d\mu \quad \forall E \in \mathcal{M}$$

è una misura

Dimostrazione. 1. $\nu(\emptyset) = \int_{\emptyset} f d\mu = 0$

2. Siano $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ con $A_n \in \mathcal{M}$ a due a due disgiunti, vogliamo provare che

$$\nu(A) = \int_A f d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} f d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \nu(A_n)$$

Innanzitutto assumeremo che tutti i $\nu(A_n) < +\infty$ per ogni n , altrimenti naturalmente $\nu(A) = +\infty$ poiché $A_n \subseteq A$. Se $f = s = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{E_i}$ semplice misurabile non negativa allora

$$\int_A s d\mu = I_A(s) = \sum_{i=1}^n c_i \mu(A \cap E_i) = \sum_{i=1}^n c_i \sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_k \cap E_i)$$

Dove si è usata la σ -additività di μ . Ora scambiando la somma e la serie, che possiamo fare perché se sono tutte convergenti allora ok, se invece anche solo una di quelle con $c_i > 0$ dovesse divergere allora necessariamente l'integrale originale è $+\infty$, ma anche la serie ottenuta scambiando somma e serie diverge, poiché ha termine generale maggiore di quello della serie divergente.

$$I_A(s) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{i=1}^n c_i \mu(A_k \cap E_i) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{A_k}(s) = \sum_{k=1}^{\infty} \int_{A_k} s d\mu$$

Ora se f è misurabile e non negativa e $0 \leq s \leq f$ in A abbiamo che

$$I_A(s) = \sum_{k=1}^{\infty} I_{A_k}(s) \leq \sum_{k=1}^{\infty} \int_{A_k} f d\mu$$

Ora procedendo con il sup otteniamo la disuguaglianza

$$\int_A f d\mu \leq \sum_{k=1}^{\infty} \int_{A_k} f d\mu$$

Ora vogliamo trovare l'altra disuguaglianza. Per ogni $\varepsilon > 0$ e $k = 1, \dots, m$ esistono s_1, \dots, s_m semplici, misurabili e $0 \leq s_i \leq f$ in A_i tali che

$$\int_{A_i} f d\mu \leq \int_{A_i} s_i d\mu + \frac{\varepsilon}{m}$$

Osservo ora la funzione $s(x) = s_i(x)$ se $x \in A_i$ per $i = 1, \dots, m$. Allora s è semplice, misurabile e $0 \leq s \leq f$ in $\bigcup_{i=1}^m A_i$. A questo punto

$$\sum_{i=1}^m \int_{A_i} f d\mu - m \frac{\varepsilon}{m} \leq \sum_{i=1}^m \int_{A_i} s_i d\mu = \int_{\bigcup_{i=1}^m A_i} f d\mu \leq \int_A f d\mu$$

Da cui troviamo che

$$\varepsilon + \int_A f d\mu \geq \sum_{i=1}^m \int_{A_i} f d\mu \quad \forall \varepsilon > 0, \forall m \in \mathbb{N}$$

e con $\varepsilon \rightarrow 0$ e $m \rightarrow +\infty$ otteniamo l'altra disuguaglianza. □

Corollario 1.23.1 (σ -additività dell'integrale). Se $f \in L^1(A)$ e $\{A_n\}$ è una successione di insiemi disgiunti a due a due, con $A = \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$, allora $f \in L^1(A_n)$ per ogni n e

$$\int_A f d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{A_n} f d\mu$$

Dimostrazione. Sia $f = f^+ - f^-$ e per f^+ e f^- vale il teorema di generazione di misure. □

Corollario 1.23.2. Se $f, g \in L^1(\Omega)$ e $f = g$ quasi ovunque in Ω , allora

$$\forall E \in \mathcal{M} \quad \int_E f d\mu = \int_E g d\mu$$

Dimostrazione. Se $f = g$ quasi ovunque allora esiste un insieme $F \in \mathcal{M}$ con $\mu(F) = 0$ tali che $f(x) = g(x)$ per ogni $x \in \Omega \setminus F$. Allora abbiamo

$$\int_E f d\mu = \int_{E \cap F} f d\mu + \int_{E \setminus F} f d\mu = \int_{E \cap F} g d\mu + \int_{E \setminus F} g d\mu = \int_E g d\mu$$

Dove i due integrali su $E \cap F$ sono uguali in quanto entrambi integrali su un trascurabile quindi uguali a 0 □

Proposizione 1.24. Sia $f \in L^1(E)$. Allora $|f| \in L^1(E)$ e

$$\left| \int_E f d\mu \right| \leq \int_E |f| d\mu$$

Dimostrazione. $|f|$ è misurabile perché f è misurabile. Ora sia $A = \{x \in E : f(x) \geq 0\}$ e $B = \{x \in E : f(x) < 0\}$ sono entrambi misurabili per la misurabilità di f . Allora abbiamo che

$$\int_E |f| d\mu = \int_A |f| d\mu + \int_B |f| d\mu = \int_A f^+ d\mu + \int_B f^- d\mu < +\infty$$

dove gli ultimi due integrali sono finiti per ipotesi.

La disuguaglianza è ovvia, infatti

$$\left| \int_E f d\mu \right| = \left| \int_A f^+ d\mu - \int_B f^- d\mu \right| \leq \int_A f^+ d\mu + \int_B f^- d\mu = \int_E |f| d\mu$$

□

Teorema 1.25: CNES per l'integrabilità

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ misurabile. Allora f è integrabile se e solo se esiste g integrabile tale che $|f| \leq g$ quasi ovunque.

$$f \in L^1(\Omega) \iff \exists g \in L^1(\Omega) \quad |f| \leq g \quad \text{q.o.}$$

Nota. In questi casi si usa dire che f è “dominata” da g . L'enunciato precedente quindi si può anche dire f è integrabile se e solo se è misurabile e dominata da una funzione integrabile.

Dimostrazione. Se f è integrabile, allora è misurabile e dominata da $|f|$. Viceversa, se $|f| \leq g$ in Ω allora $f^+ < g$ e $f^- < g$. Allora $f^+, f^- \in L^1(\Omega)$ e dunque $f \in L^1(\Omega)$ □

Corollario 1.25.1. *In particolare se $|f|$ è integrabile e f è misurabile allora f è integrabile.*

Con questo risultato l'integrale di Lebesgue si distingue molto dall'integrale di Riemann. Ad esempio la funzione definita su $[0, 1]$ come 1 sui razionali e -1 su $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ non è integrabile secondo Riemann ma lo è secondo Lebesgue perché $|f| = 1$ è integrabile.

Integrale di Riemann L'integrale di Lebesgue che abbiamo introdotto è un'estensione dell'integrale di Riemann, cioè *ogni funzione R-integrabile è anche L-integrabile e i due integrali coincidono*. Infatti una funzione f si dice R-integrabile in E se per ogni $\varepsilon > 0$ esistono una somma inferiore S e una somma superiore T tali che $T - S < \varepsilon$. Per ogni somma (superiore e inferiore) io posso considerare la funzione a scala che su ogni elemento di suddivisione (intervallino, quadratino, ecc) prende il valore specifico che appare nella somma.

Osservazione. Le funzioni a scala sono particolari funzioni semplici, anche se la “filosofia” è diversa: per le funzioni a scala si divide il dominio, mentre per le funzioni semplici si guardano i valori assunti dalla funzione e poi si costruiscono gli insiemi su cui la funzione assume quei valori.

ora diciamo

$$I_R = \sup_{\substack{s \text{ a scala} \\ s \leq f}} \int_E s dx = \inf_{\substack{t \text{ a scala} \\ t \geq f}} \int_E t dx$$

Invece f è L-integrabile se $f^+, f^- \in L^1(E)$. Se f è R-integrabile allora anche f^+ e f^- lo sono. Basta quindi mostrare che se g è non-negativa e R-integrabile allora è anche L-integrabile e i due integrali coincidono. Esiste quindi $I_R(g) = \int_E g dx$ integrale di Riemann. Per g tale esiste anche

$$I_L(g) = \sup \left\{ \int_E s d\mu : s \text{ semplice, misurabile, e } 0 \leq s \leq g \text{ in } E \right\}$$

Dobbiamo quindi provare che $I_R(g) = I_L(g)$. A tale scopo possiamo controllare che sia $I_R(g) < I_L(g)$ che $I_R(g) > I_L(g)$ portano a contraddizioni. Nel primo caso abbiamo $I_R(g) < I_L(g)$ quindi esiste una funzione a scala t tale che $t \geq g$ in E e $I_R(g) \leq \int_E t dx < I_L(g)$. Per tale funzione a scala, essendo t anche semplice abbiamo che $\int_E t dx = \int_E t d\mu$ ma allora ogni s nell'insieme il cui sup è $I_L(g)$ verifica $0 \leq s \leq t$ e quindi

$$\int_E s d\mu \leq \int_E t d\mu < I_L(g)$$

e quindi $\int_E t d\mu$ è un maggiorante dell'insieme, per cui $I_L(g)$ non ne può essere il sup.

Supponiamo ora invece che $I_R(g) > I_L(g)$, allora esiste una funzione a scala s tale che $s \leq g$ in E e $I_L(g) < \int_E s d\mu \leq I_R(g)$. Ma allora s appartiene all'insieme il cui sup è $I_L(g)$ e ha un integrale più grande del sup stesso.

Ne consegue necessariamente che $I_L(g) = I_R(g)$

1.7 Teoremi di passaggio al limite sotto il segno di integrale

Teorema 1.26: Beppo Levi - versione base

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia f_n una successione non decrescente di funzioni misurabili e non negative su Ω . Posto $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ per ogni $x \in \Omega$, allora $\forall E \in \mathcal{M}$ si ha

$$\int_E f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Dimostrazione. Sia $\alpha := \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$, dove $\alpha \in [0, +\infty]$. Abbiamo necessariamente che

$$\int_E f d\mu \geq \alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Vogliamo dimostrare l'altra disuguaglianza. Prendo s semplice, misurabile e tale che $0 \leq s \leq f$ in E . Sia poi $\delta \in (0, 1)$. Siano

$$E_n := \{x \in E : f_n(x) \geq \delta s(x)\}$$

Se x è tale che $f(x) < +\infty$ allora sicuramente esiste $\bar{n} \in \mathbb{N}$ tale che $f_n(x) \geq \delta s(x)$ per ogni $n \geq \bar{n}$. Se invece $f(x) = +\infty$ allora poiché s assume solo valori finiti vale lo stesso senza bisogno di ricorrere all'uso del δ .

Osservo quindi che $E_n \subseteq E_{n+1}$ e che $\bigcup_{n=1}^{\infty} E_n = E$. Quindi abbiamo che

$$\int_E f_n d\mu \geq \int_{E_n} f_n d\mu \geq \delta \int_{E_n} s d\mu$$

Per $n \rightarrow +\infty$ otteniamo quindi

$$\alpha \geq \delta \int_E s d\mu \quad \forall \delta \in (0, 1)$$

Per definizione di α e per continuità della misura data da s . Ora poiché vale per ogni $\delta \in (0, 1)$ deve valere anche per $\delta = 1$. Otteniamo quindi

$$\alpha \geq \int_E s d\mu \quad \forall s \text{ semplice, misurabile e } 0 \leq s \leq f \text{ in } E$$

Ora procedendo con il sup otteniamo la disuguaglianza desiderata. □

Lemma 1.27: Lemma di Fatou - versione base

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia f_n una successione di funzioni misurabili e non negative su Ω . Allora, per ogni $E \in \mathcal{M}$,

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Dimostrazione. Sia $g_n = \inf_{k \geq n} f_k$. Allora ogni g_n è non negativa e di funzioni misurabili, inoltre $0 \leq g_n \leq f_n$ e $g_n \leq g_{n+1}$. Quindi g_n è una successione non decrescente e per il teorema di Beppo Levi abbiamo che

$$\int_E \lim_{n \rightarrow \infty} g_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E g_n d\mu$$

Ora poiché $g_n \leq f_n$ per ogni n , e poiché $\lim_{n \rightarrow \infty} g_n(x) = \sup_{n \in \mathbb{N}} g_n(x) = \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu = \int_E \lim_{n \rightarrow \infty} g_n d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E g_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Dove l'ultima disuguaglianza è data dal fatto che $\lim = \liminf$ se il limite esiste e il \liminf conserva le disuguaglianze di successioni. \square

Proposizione 1.28 (Linearità dell'integrale di Lebesgue). *Se $f_1, f_2 \in L^1(E)$ allora $f = f_1 + f_2 \in L^1(E)$ e inoltre*

$$\int_E f d\mu = \int_E f_1 d\mu + \int_E f_2 d\mu$$

Dimostrazione. Siano u, v misurabili e non negative. Posto $w = u + v$ si ha

$$\int_E w d\mu = \int_E u d\mu + \int_E v d\mu \quad (1.2)$$

Infatti esistono due successioni s_n e t_n di funzioni semplici tali che $s_n \rightarrow u$ e $t_n \rightarrow v$ puntualmente e sia $\{s_n\}$ che $\{t_n\}$ sono crescenti. Definiamo $h_n := s_n + t_n$ ottenendo ancora una successione crescente di funzioni semplici misurabili non negative. Notiamo che

$$\int_E h_n d\mu = \int_E s_n d\mu + \int_E t_n d\mu$$

perché sono funzioni semplici. Ora portiamo al limite e applichiamo Beppo Levi, ossia 1.26 ottenendo (1.2).

Ora se siano f_1, f_2 integrabili, quindi misurabili. Inoltre $|f_1|, |f_2| \in L^1(E)$. Poiché $|f| = |f_1 + f_2| \leq |f_1| + |f_2|$ che è integrabile perché ricade nel caso precedente, anche $|f|$ è integrabile e quindi f , per la CNES 1.25. Sappiamo che

$$f^+ - f^- = f_1^+ - f_1^- + f_2^+ - f_2^- \iff f^+ + f_1^- + f_2^- = f_1^+ + f_2^+ + f^-$$

che è un'uguaglianza tra due funzioni somme di funzioni misurabili non negative, per cui posso applicare la prima parte, ottenendo

$$\int_E f^+ d\mu + \int_E f_1^- d\mu + \int_E f_2^- d\mu = \int_E f_1^+ d\mu + \int_E f_2^+ d\mu + \int_E f^- d\mu$$

da cui, riordinando i termini otteniamo la tesi. \square

Ricordando il lemma di Fatou 1.27, avevamo che la disuguaglianza è spesso un'uguaglianza. In particolare ovviamente ogni volta che la successione f_n è crescente abbiamo un uguale (Beppo Levi 1.26) e i \liminf sono dei \lim . Ci sono però anche casi in cui vale la disuguaglianza stretta.

Esempio 1.13. Sia $\Omega = \mathbb{R}$ con la misura di Lebesgue. Sia $f_n(x) = x\chi_{[-n,n]}$. Allora $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = 1$ e $\int_{\mathbb{R}} f_n d\mu = 2n$ otteniamo quindi

$$\int_{\mathbb{R}} \lim_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu = +\infty = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} f_n d\mu$$

Confermando Beppo Levi

Esempio 1.14. Sia $\Omega = \mathbb{R}$ con la misura di Lebesgue. Sia $f_n = \chi_{[n,n+1]}$. Allora $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = 0$ e $\int_{\mathbb{R}} f_n d\mu = 1$ otteniamo quindi

$$\int_{\mathbb{R}} \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu = 0 \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} f_n d\mu = 1$$

Una variante è $f_n = \chi_{[n,n+1]}$ per cui

$$\int_{\mathbb{R}} \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu = 0 \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} f_n d\mu = 1$$

Se ho una funzione integrabile su E , questa può prendere i valori $+\infty$ e $-\infty$? Sì, ma solo in un sottoinsieme trascurabile. In caso contrario la funzione non sarebbe integrabile perché f^+ oppure f^- sarebbero non limitate

Lemma 1.29 (Lemma di Fatou - versione estesa). *Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia $\{f_n\}$ una successione di funzioni misurabili su Ω . Allora*

1. *Se esiste g integrabile su E tale che $g \leq f_n$ su E allora*

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

2. *Se esiste h integrabile in E tale che $f_n \leq h$ su E allora*

$$\int_E \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Dimostrazione parte 1. Poniamo $f(x) = \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \geq g(x)$ per $x \in E$. Possiamo considerare la successione $u_n(x) = f_n(x) - g(x)$ che verifica le ipotesi di Fatou base 1.27 in E e allora

$$\liminf_{n \rightarrow \infty} u_n(x) = f(x) - g(x) \implies \int_E (f - g) d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E (f_n - g) d\mu$$

usando la linearità dell'integrale abbiamo

$$\int_E f d\mu - \underbrace{\int_E g d\mu}_{\text{finito}} \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \left(\int_E f_n d\mu - \underbrace{\int_E g d\mu}_{\text{finito}} \right) = \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu - \int_E g d\mu$$

da cui otteniamo la tesi. □

Dimostrazione parte 2. La successione $v_n = -f_n$ verifica $v_n \geq -h$ in E dove $-h$ è una funzione integrabile. Allora possiamo applicare la parte 1 a v_n ottenendo

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} v_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E v_n d\mu$$

poiché $\liminf_{n \rightarrow \infty} (-f_n) = -\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ segue che

$$\int_E -\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq -\limsup_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu \iff \int_E \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

□

Lemma 1.30: Lemma di Fatou - definitivo

Sia $\{f_n\}$ una successione di funzioni integrabili in E tali che $\{\int_E f_n d\mu\}$ sia limitata. Allora

1. Se esiste $g \in L^1(E)$ tale che $g \leq f_n$ in Ω per ogni n , allora $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n$ è integrabile in E e

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

2. Se esiste $h \in L^1(E)$ tale che $f_n \leq h$ in Ω per ogni $n \in \mathbb{N}$ allora $\limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ è integrabile in E e

$$\int_E \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \geq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Dimostrazione. Segue semplicemente da Fatou esteso 1.29, e il \liminf è integrabile perché

$$-\infty < \int_E g d\mu \leq \int_E \left(\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n \right) d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu < +\infty$$

dove le prime disuguaglianze sono per integrabilità di g e $g \leq f_n$ e l'ultima perché la successione degli integrali è limitata.

Similmente per il caso 2.

□

Teorema 1.31: Beppo Levi - seconda versione

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia $\{f_n\}$ una successione monotona di funzioni integrabili in $E \in \mathcal{M}$ tali che la successione degli integrali $\{\int_E f_n d\mu\}$ sia limitata. Allora posto

$$f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \quad \forall x \in \Omega$$

si ha che $f \in L^1(E)$ e inoltre

$$\int_E f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Osservazione. Si potrebbe estendere l'enunciato al caso di una successione che sia monotona solo quasi ovunque, cioè che esista $N \subseteq \Omega$ trascurabile tale che $f_n(x) \leq f_{n+1}(x)$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ e per ogni $x \in \Omega \setminus N$

Dimostrazione. Assumiamo f_n una successione decrescente. Quindi $f_1 \geq f_2 \geq \dots \geq f_n \geq \dots$. Tutte le f_n sono integrabili e inoltre $f \leq f_n \leq f_1$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ e f_1 è integrabile. Allora $f = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ e dunque è integrabile per la parte 2 del lemma di Fatou 1.30. Ora possiamo applicare la parte 1 del lemma di Fatou 1.30 ottenendo

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu \leq \int_E \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu$$

poiché $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n = f$ segue la tesi. \square

Corollario 1.31.1 (Beppo Levi per le serie). *Sia f_n una successione di funzioni misurabili e non negative. Allora la serie $\sum_{n=1}^{\infty} f_n(x)$ converge a una funzione $s : \Omega \rightarrow [0, +\infty]$ tale che*

$$\int_E s d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_E f_n d\mu \quad \forall E \in \mathcal{M}$$

In particolare se la serie degli integrali converge allora $s \in L^1(E)$

Dimostrazione. Si consideri la successione s_n delle ridotte, questa costituisce una successione crescente di funzioni misurabili e non negative e si può quindi applicare Beppo Levi base 1.26 ottenendo la tesi. Se poi la serie degli integrali converge allora la successione degli integrali delle ridotte è limitata e si può applicare Beppo Levi 1.31 \square

Teorema 1.32: Convergenza Dominata di Lebesgue

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia f_n una successione di funzioni misurabili tale che $f_n \rightarrow f$ puntualmente. Inoltre sia g una funzione integrabile in $E \in \mathcal{M}$ tale che

$$|f_n(x)| \leq g(x) \quad \forall x \in E, \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

allora $f \in L^1(E)$ e inoltre

$$\int_E f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

Dimostrazione. Per poter applicare il lemma di Fatou abbiamo bisogno che f_n siano integrabili questo è vero perché sappiamo che $|f_n| \leq g$ e dunque $f_n \in L^1(E)$ per la CNES 1.25.

Ora per sappiamo che

$$-g(x) \leq f(x) \leq g(x) \quad \forall x \in E$$

possiamo allora applicare Fatou 1.30 che ci dice che $f = \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n$ è integrabile in E e inoltre

$$\int_E \liminf_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu \leq \limsup_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu \leq \int_E \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n d\mu$$

ma poiché $\liminf_{n \rightarrow \infty} f_n = \limsup_{n \rightarrow \infty} f_n = f$ otteniamo la tesi. \square

Notare come non abbiamo mai richiesto la convergenza uniforme, cosa che invece era essenziale per lo stesso risultato nell'integrale di Riemann

Nota. La convergenza puntuale, l'integrabilità di f_n e la limitatezza della successioni $\{f_n\}$ non bastano per passare al limite sotto il segno di integrale. Basti pensare all'esempio 1.14

Osservazione. Come nel teorema di Beppo Levi 1.31 possiamo estendere il teorema della convergenza dominata rilassando le ipotesi $f_n \rightarrow f$ puntualmente a $f_n \rightarrow f$ q.o. e $|f_n| \leq g$ q.o.

Funzioni $\frac{1}{x^\alpha}$ Consideriamo le funzioni $f(x) = \frac{1}{x^\alpha}$, con $\alpha > 0$ sia su $(0, 1)$ che in $(1, +\infty)$. Queste funzioni sono non limitate oppure hanno dominio non limitato, e possiamo estendere Riemann per integrarle in senso improprio in alcuni casi. In particolare

- $\frac{1}{x^\alpha}$ è integrabile in senso improprio su $(0, 1)$ se e solo se $\alpha < 1$
- $\frac{1}{x^\alpha}$ è integrabile in senso improprio in $(1, +\infty)$ se e solo se $\alpha > 1$

dove l'integrale in senso improprio è definito come

$$\int_0^1 \frac{1}{x^\alpha} dx = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0^+} \int_\varepsilon^1 \frac{1}{x^\alpha} dx = \begin{cases} \frac{1}{1-\alpha} & \text{se } \alpha < 1 \\ +\infty & \text{se } \alpha \geq 1 \end{cases}$$

Se io ora vado a considerare le funzioni

$$f_\varepsilon(x) = \begin{cases} \frac{1}{x^\alpha} & \text{se } \varepsilon \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{se } 0 \leq x < \varepsilon \end{cases}$$

allora la famiglia di funzioni $\{f_\varepsilon\}$ risulta monotona rispetto a $\varepsilon \rightarrow 0^+$ ossia $\forall(\varepsilon_1, \varepsilon_2)$ con $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ si ha che

$$f_{\varepsilon_1}(x) \geq f_{\varepsilon_2}(x) \quad \forall x \in (0, 1)$$

se ora passo al limite per $\varepsilon \rightarrow 0^+$ per il teorema di Beppo Levi concludo che la funzione limite $f(x) = \frac{1}{x^\alpha}$ è L-integrabile se e solo se $\alpha < 1$.

Queste informazioni sono molto utili quando dobbiamo valutare l'integrabilità di una funzione. Ad esempio data una qualunque funzione misurabile $f(x)$ definita in $(1, +\infty)$ tale per cui esistano $C > 0$ e $\alpha > 1$ tali che $|f(x)| \leq \frac{C}{x^\alpha}$ per ogni $x \in (1, +\infty)$ allora questa è integrabile. D'altro canto se $g(x)$ è una funzione su $(1, +\infty)$ tale che $g(x) \geq \frac{1}{\sqrt{x}}$ per ogni $x > \bar{x}$ allora necessariamente g non è integrabile.

Esempio 1.15. Consideriamo la funzione $g(x) = \frac{1}{\ln x}$ in $2, +\infty$. Sappiamo che $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\ln x}{\sqrt{x}} = 0$ ossia $\forall \varepsilon > 0 \exists \bar{x}$ tale che $\forall x \geq \bar{x}$ si ha che $\frac{\ln x}{\sqrt{x}} \leq \varepsilon$ ossia $\frac{1}{\ln x} \geq \frac{1}{\varepsilon \sqrt{x}}$. Quindi g non è L-integrabile in $(1, +\infty)$.

Ora consideriamo la funzione g su $(1, 2)$. Sappiamo che $\ln x \sim x - 1$ per $x \rightarrow 1^+$. Ma sappiamo che $\frac{1}{\sqrt{x}}$ non è integrabile perché $\frac{1}{x-1}$ non è L-integrabile in $(1, 2)$

Esercizio 1.1

Studiare l'integrabilità della funzione

$$f_\alpha(x) = |\log x|^\alpha \quad x \in (0, 1)$$

quindi quand'è che $f_\alpha \in L^1(0, 1)$ al variare di $\alpha \in \mathbb{R}$?

- se $\alpha = 0$ è chiaramente $f_0 = 1$ integrabile
- se $\alpha > 0$ dobbiamo studiare il comportamento vicino a 0. Vogliamo confrontare la funzione con $\frac{1}{x^\beta}$ che sappiamo essere integrabile per $\beta \in (0, 1)$.

Abbiamo quindi ad esempio, per $\beta = \frac{1}{2}$

$$\lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{|\ln x|^\alpha}{\frac{1}{\sqrt{x}}} = \frac{(-\ln x)^\alpha}{x^{-\frac{1}{2}}} \stackrel{\text{L'H}}{=} \frac{-\alpha(-\ln x)^{\alpha-1} \cdot \frac{1}{x}}{-\frac{1}{2}x^{-\frac{3}{2}}} = 2\alpha \frac{(-\ln x)^{\alpha-1}}{x^{\frac{1}{2}}}$$

procedendo con l'Hôpital finché l'esponente non diventa negativo otteniamo che il limite non è più una forma indeterminata. Quindi otteniamo che il limite è 0. Abbiamo dunque che $\sqrt{x}|\ln x|^\alpha$ è limitata in $(0, 1)$ e quindi $\exists C > 0$ tale che

$$|\ln x|^\alpha \leq \frac{C}{\sqrt{x}} \text{ che è integrabile } \quad \forall x \in (0, 1)$$

Quindi $f_\alpha \in L^1(0, 1)$ per ogni $\alpha > 0$.

– se $\alpha < 0$ Sia $\alpha = -\gamma$, con $\gamma > 0$. Abbiamo dunque

$$f_\alpha(x) = \frac{1}{|\ln x|^\gamma} \xrightarrow{x \rightarrow 0^+} 0$$

ora poiché $\ln x \sim x - 1$ per $x \rightarrow 1$ abbiamo che

$$f_\alpha(x) \sim \frac{1}{|x - 1|^\gamma}$$

che è integrabile per $\gamma < 1$. Quindi $f_\alpha \in L^1(0, 1) \iff \alpha > -1$.

Osservazione. Ci sono funzioni integrabili in senso improprio che non L-integrabili. Il prossimo esempio ne è un esempio (scusate il gioco di parole)

Esempio 1.16. Sia $f(x) = \frac{\cos x}{x}$ in $[\frac{\pi}{2}, +\infty]$. Allora

1. f è integrabile in senso improprio:

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^R \frac{\cos(x)}{x} dx = \frac{\sin x}{x} \Big|_{\frac{\pi}{2}}^R + \int_{\frac{\pi}{2}}^R \frac{\sin x}{x^2} dx = \frac{\sin R}{R} - \frac{2}{\pi} + \int_{\frac{\pi}{2}}^R \frac{\sin x}{x^2} dx$$

Per $R \rightarrow \infty$ otteniamo che l'integrale converge in quanto anche il secondo integrale converge perché il suo valore assoluto è maggiorato da $\frac{1}{x^2}$.

2. f non è integrabile in senso di Lebesgue. Infatti se così fosse allora anche $|f| = |\cos x|/x$ sarebbe integrabile

$$\begin{aligned} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+n\pi} \frac{|\cos x|}{x} dx &= \sum_{k=1}^n \int_{\frac{\pi}{2}+(k-1)\pi}^{\frac{\pi}{2}+k\pi} \frac{|\cos x|}{x} dx \geq \\ &\geq \sum_{k=1}^n \frac{1}{\frac{\pi}{2}+k\pi} \int_{\frac{\pi}{2}+(k-1)\pi}^{\frac{\pi}{2}+k\pi} |\cos x| dx \end{aligned}$$

dove l'eguaglianza è data dalla minorazione per il minimo. Ora evidentemente tutti gli integrali sono uguali e valgono

$$\int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}+\pi} |\cos x| dx = \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} -\cos x dx = 2$$

quindi la ridotta della serie ora vale

$$\sum_{k=1}^n \frac{2}{\frac{\pi}{2}+k\pi} \rightarrow +\infty$$

e quindi $|f|$ e f non sono integrabili.

Esempio 1.17. Quali sono le funzione integrabili per la misura di Dirac? Consideriamo lo spazio di misura $(\mathbb{R}^N, 2^{\mathbb{R}^N}, \delta_O)$. Allora ogni funzione $f : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ è misurabile perché ogni insieme è misurabile. Se f è non negativa allora

$$\int_{\mathbb{R}^N} f d\delta_O = \sup\{I(s) : s \text{ semplice tale che } 0 \leq s \leq f\}$$

Ora quindi $s(x) = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{E_i}(x)$ e $I(s) = \sum_{i=1}^n c_i \delta_O(E_i)$ che diventa quindi

$$I(s) = \sum_{i: O \in E_i} c_i \leq f(O)$$

dove l'ultima uguaglianza è data da $0 \leq s \leq f$. Ne concludiamo dunque che

$$\int_{\mathbb{R}^N} f d\delta_O = f(O)$$

Se ora f è di segno qualunque allora

$$\int_{\mathbb{R}^N} f d\delta_O = f^+(O) - f^-(O) = f(O)$$

Dunque f è integrabile se e solo se $f(O) \in \mathbb{R}$.

Esempio 1.18. Consideriamo ora la misura del contare e lo spazio $(\mathbb{N}, 2^{\mathbb{N}}, \#)$. Ora le funzioni sono le successioni $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$. Di nuovo tutte sono misurabili perché tutti gli insiemi sono misurabili. Procediamo a capire quali sono le f integrabili. Sia ora $f \geq 0$. Allora

$$\int_{\mathbb{N}} f d\# = \sup\{I(s) : s \text{ semplice tale che } 0 \leq s \leq f\}$$

dove $s(x) = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{E_i}(x)$ dove chiediamo che gli E_i siano a due a due disgiunti. Osservo che $\sum_{i=1}^k c_i \chi_{\{i\}}(x)$ sono particolari funzioni semplici. Deve essere $c_i \leq f(i)$ per $i = 1, \dots, k$. Ne concludiamo che ha senso che sia

$$\int_{\mathbb{N}} f d\# = \sum_{i=1}^{+\infty} f(i) \#(\{i\}) = \sum_{i=1}^{+\infty} f(i)$$

Se $f(i) = +\infty$ per qualche i oppure la serie diverge allora l'integrale è $+\infty$. Concludiamo f non negativa, allora $f \in L^1(\mathbb{N})$ se $\sum_{n=1}^{\infty} f(n)$ converge. Se ora f è di segno qualunque allora $f \in L^1(\mathbb{N})$ se

$$\sum_{n=1}^{+\infty} f^+(n) < +\infty \quad \text{e} \quad \sum_{n=1}^{+\infty} f^-(n) < +\infty$$

Notare che è verificata la proprietà $f \in L^1 \iff |f| \in L^1$.

Esercizio 1.2

per ogni $n \in \mathbb{N}$ definiamo

$$f_n(x) = \begin{cases} \frac{|\ln(n^7 x^2)|}{3 + n^4 x^2} & \text{se } x \neq 0 \\ 1 & \text{se } x = 0 \end{cases}$$

a) Per quali n f_n è integrabile su \mathbb{R} ? Succede che esiste C_n tale che

$$|\ln(n^7 x^2)| \leq \frac{C_n}{\sqrt{|x|}} \quad \forall x \in (-1, 1) \setminus \{0\}$$

Quindi f_n è integrabile in tutto $(-1, 1)$. Ora poiché

$$\frac{f_n}{x^{-\frac{3}{2}}} \rightarrow 0 \quad \text{per } x \rightarrow +\infty$$

da cui

$$\exists \bar{x} > 0 \text{ tale che } \forall x \geq \bar{x} \quad 0 \leq f_n(x) \leq \frac{1}{x^{\frac{3}{2}}}$$

dunque f_n è integrabile su tutto \mathbb{R}

b) Consideriamo ora la serie

$$\sum_{i=1}^{\infty} f_n(x) \quad x \in \mathbb{R}$$

e sia C l'insieme di convergenza della serie, allora $s : C \rightarrow \mathbb{R}$ sia la somma della serie. Discutiamo ora la misurabilità di C e di s . Se $x = 0$ chiaramente diverge, mentre se $x \neq 0$ allora

$$s(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{|7 \ln n + 2 \ln |x||}{3 + n^4 x^2}$$

Quindi $C = \mathbb{R} \setminus \{0\}$ è misurabile, inoltre s è misurabile in quanto limite di una successione di ridotte tutte misurabili.

c) Vale l'uguaglianza

$$\int_C s dx = \sum_{n=1}^{\infty} \int_C f_n dx ?$$

Sì alla grande per Beppo Levi, infatti $f_n \geq 0$ e nel nostro caso i termini della serie sono tutti finiti.

Vogliamo ora vedere se $s \in L^1(C)$ sfruttando l'uguaglianza.

$$\int_{\mathbb{R}} \frac{|\ln(n^7 x^2)|}{3 + n^4 x^2} dx = \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{n^2} \frac{|\ln(n^3 t^2)|}{3 + t^2} dt \leq \frac{1}{n^2} \int_{\mathbb{R}} \frac{|3 \ln n + 2 \ln |t||}{3 + t^2} dt$$

operando la sostituzione $n^2 x = t$, $n^2 dx = dt$. Ora nuovamente maggioriamo dividendo la frazione con la disuguaglianza triangolare

$$\leq \frac{3|\ln n|}{n^2} \int_{\mathbb{R}} \frac{1}{3 + t^2} dt + \frac{2}{n^2} \int_{\mathbb{R}} \frac{|\ln |t||}{3 + t^2} dt$$

che sono entrambi termini generali di serie convergente. Quindi $s \in L^1(C)$

1.8 Convergenze di funzioni misurabili

Definizione 1.10: Convergenza quasi ovunque

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Una successione di funzioni misurabili $f_n : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ converge quasi ovunque a $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ se esiste un insieme $F \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(F) = 0$ e $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) \quad \forall x \in \Omega \setminus F$

Definizione 1.11: Convergenza quasi uniforme

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Una successione di funzioni misurabili $f_n : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ converge quasi uniformemente a $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste un insieme $F \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(F) < \varepsilon$ e $f_n \rightarrow f$ uniformemente in $\Omega \setminus F$.

Definizione 1.12: Convergenza in misura

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Una successione di funzioni misurabili $f_n : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ converge in misura a $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$ se per ogni $\varepsilon > 0$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(\{x \in \Omega : |f_n(x) - f(x)| \geq \varepsilon\}) = 0$$

Esempio 1.19. Consideriamo la successione $f_n(x) = x^n$ in $[0, 1]$. Allora $f_n \rightarrow 0$ q.o. in $[0, 1]$, perché per ogni $x \in (0, 1)$ $f_n(x) \rightarrow 0$ e chiaramente $\mu[0, 1] \setminus (0, 1) = \mu(\{0, 1\}) = 0$. Ma anche $f_n \rightarrow f$ quasi uniformemente, infatti per ogni $\varepsilon > 0$ scegliamo $[1 - \frac{\varepsilon}{2}, 1]$ e in questo intervallo c'è convergenza uniforme. Infine

$$\{x \in [0, 1] : |x^n| > \varepsilon\} = \{x \in [0, 1] : |x| > \varepsilon^{\frac{1}{n}}\} = (\varepsilon^{\frac{1}{n}}, 1]$$

e poiché $\mu(\varepsilon^{\frac{1}{n}}, 1] = 1 - \varepsilon^{\frac{1}{n}} \rightarrow 0$ allora $f_n \xrightarrow{\mu} 0$.

Esempio 1.20. Consideriamo la successione $f_n(x) = \frac{x}{n}$ in \mathbb{R} . Allora $f_n \rightarrow 0$ q.o. in \mathbb{R} . Anche qui non abbiamo convergenza uniforme, e neanche quasi uniforme, in quanto ogni insieme su cui c'è convergenza uniforme è limitato e ha complementare di misura non finita. Infine $\{x \in \mathbb{R} : |\frac{x}{n}| > \varepsilon\} = (-\infty, -\varepsilon n) \cup (\varepsilon n, +\infty)$ che ha sempre misura infinita, quindi $f_n \not\rightarrow f$ in misura.

Dal precedente esempio possiamo dedurre che q.o. $\not\Rightarrow$ q.u. e che q.o. $\not\Rightarrow$ in misura. Ora invece mostriamo le implicazioni che valgono.

Teorema 1.33: $f_n \xrightarrow{q.u.} f \implies f_n \xrightarrow{q.o.} f$

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia f_n una successione di funzioni misurabili tale che $f_n \xrightarrow{q.u.} f$ funzione misurabile. Allora $f_n \xrightarrow{q.o.} f$

Dimostrazione. Per ogni $k \in \mathbb{N}$ esiste un insieme $E_k \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(\Omega \setminus E_k) < \frac{1}{k}$ e $f_n \rightarrow f$ uniformemente, quindi anche puntualmente, in E_k . Ora prendiamo

$$E = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} E_k$$

allora dico che $f_n \rightarrow f$ puntualmente in E . Infatti per ogni punto $x \in E$ esiste k tale che $x \in E_k$ e quindi $f_n(x) \rightarrow f(x)$. Infine

$$\mu(E^C) = \mu\left(\bigcap_{k \in \mathbb{N}} E_k^C\right) \leq \mu(E_k^C) < \frac{1}{k} \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

e quindi necessariamente $\mu(E^C) = 0$ e quindi $f_n \rightarrow f$ q.o. □

Teorema 1.34: Severini-Egorov

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura finito, ossia $\mu(\Omega) < +\infty$. Se allora $f_n \rightarrow f$ q.o. in Ω , $f_n \rightarrow f$ q.u. in Ω .

Dimostrazione. Iniziamo fissando $\varepsilon > 0$. $f_n \xrightarrow{q.o.} f$ in Ω , quindi esiste N trascurabile tale che $f_n \rightarrow f$ puntualmente in $\Omega \setminus N$. Per ogni $k \in \mathbb{N}$ introduciamo gli insiemi

$$A_m = \bigcap_{n \geq m} \left\{ x \in \Omega \setminus N : |f_n(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k} \right\}$$

Gli insiemi A_m formano una successione crescente e inoltre $\bigcup_{m \in \mathbb{N}} A_m = \Omega \setminus N$ infatti se $x \in A_m$ per m fissato, allora succede che $|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k}$ per ogni $n \geq m$, quindi $f_n(x) \rightarrow f(x)$. Ora per continuità della misura

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_m) = \mu(\Omega \setminus N) = \mu(\Omega)$$

dunque esisterà certamente un m_k tale che A_{m_k} ha complementare di misura minore di $\frac{\varepsilon}{2^k}$ (*). In A_{m_k} succede che $|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k}$ per ogni $n \geq m_k$ e per ogni $x \in A_{m_k}$. Poniamo allora

$$E = \bigcap_{k \in \mathbb{N}} A_{m_k}$$

Allora su E c'è convergenza uniforme di f_n a f perché se $x \in E$ allora per ogni $k \in \mathbb{N}$ esiste $m_k \in \mathbb{N}$ tale che per ogni $n \geq m_k$ si ha che $|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k}$.

Vogliamo ora mostrare che $\mu(E^C) < \varepsilon$. Abbiamo

$$\mu(E^C) = \mu\left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} \{A_{m_k}^C\}\right) \leq \sum_{k=1}^{\infty} \mu(A_{m_k}^C) < \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\varepsilon}{2^k} = \varepsilon$$

□

Nota. L'ipotesi di $\mu(\Omega) < +\infty$ è stata usata in (*), perché noi sappiamo che

$$\mu(A_{m_k}) + \mu(A_{m_k}^C) = \mu(\Omega)$$

e per dire che $\mu(A_{m_k}^C) \rightarrow 0$ dobbiamo poter sottrarre $\mu(A_{m_k})$ da entrambi i lati dell'uguaglianza.

Teorema 1.35: $f_n \xrightarrow{q.u.} f \implies f_n \xrightarrow{\mu} f$

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Se $f_n \rightarrow f$ quasi uniformemente allora $f_n \rightarrow f$ in misura.

Dimostrazione. $\forall \sigma > 0$ esiste $E \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(E^C) < \sigma$ e $f_n \rightarrow f$ uniformemente in E , quindi $\forall \varepsilon > 0$ esiste un n_ε tale che $\forall n \geq n_\varepsilon$ e $\forall x \in E$, $|f_n(x) - f(x)| \leq \varepsilon$. Proseguendo

$$\begin{aligned} \{x \in \Omega : |f_n(x) - f(x)| > \varepsilon\} &= \underbrace{\{x \in E : |f_n(x) - f(x)| > \varepsilon\}}_{\text{vuoto per } n \geq n_\varepsilon} \cup \\ &\cup \underbrace{\{x \in E^C : |f_n(x) - f(x)| > \varepsilon\}}_{\text{sottoinsieme di } E^C, \text{ quindi di misura } < \sigma} \end{aligned}$$

ma allora abbiamo provato che

$$\forall \sigma > 0 \quad \exists n_\varepsilon : \forall n \geq n_\varepsilon \quad \mu(\{x \in \Omega : |f_n(x) - f(x)| > \varepsilon\}) < \sigma$$

e quindi $f_n \rightarrow f$ in misura. \square

Teorema 1.36: $f_n \xrightarrow{\mu} f \implies f_{n_k} \xrightarrow{q.o.} f$

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia f_n una successione di funzioni misurabili e f una funzione misurabile. Allora se $f_n \rightarrow f$ in misura, allora esiste una sottosuccessione f_{n_k} che converge quasi ovunque a f .

Dimostrazione. Sappiamo che

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \exists n_k : \forall n \geq n_k \quad \mu\left(\left\{x \in \Omega : |f_n(x) - f(x)| > \frac{1}{k}\right\}\right) < \frac{1}{k^2}$$

Definisco $E_k := \left\{x \in \Omega : |f_{n_k}(x) - f(x)| < \frac{1}{k}\right\}$ e l'insieme $E = \bigcap_{m \in \mathbb{N}} \bigcup_{k \geq m} E_k$. Noto

ora che $\mu(E) \leq \sum_{k=m}^{\infty} \frac{1}{k^2}$ che tende a 0 per $m \rightarrow \infty$ in quanto coda di serie convergente e per $x \in E^C$ ho che $f_{n_k}(x) \rightarrow f(x)$ in quanto

$$E^C = \bigcup_{m \in \mathbb{N}} \bigcap_{k \geq m} \left\{x \in \Omega : |f_{n_k}(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k}\right\}$$

ossia esiste un m tale che per ogni $k \geq m$ si ha che $|f_{n_k}(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k}$ e quindi $f_{n_k} \rightarrow f$ in E^C . In questo modo abbiamo trovato una sottosuccessione f_{n_k} che converge quasi ovunque a f . \square

Esempio 1.21. È importante evidenziare che la convergenza in misura non implica la convergenza quasi ovunque, ma solo la convergenza di una sottosuccessione, ad esempio se $\Omega = [0, 1]$ e prendiamo

$$\begin{aligned} f_1 &= \chi_{[0,1]} \\ f_2 &= \chi_{[0, \frac{1}{2}]}, \quad f_3 = \chi_{[\frac{1}{2}, 1]} \\ f_4 &= \chi_{[0, \frac{1}{3}]}, \quad f_5 = \chi_{[\frac{1}{3}, \frac{2}{3}]}, \quad f_6 = \chi_{[\frac{2}{3}, 1]} \\ f_7 &= \chi_{[0, \frac{1}{4}]}, \quad f_8 = \chi_{[\frac{1}{4}, \frac{2}{4}]}, \quad f_9 = \chi_{[\frac{2}{4}, \frac{3}{4}]}, \quad f_{10} = \chi_{[\frac{3}{4}, 1]} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Allora $f_n \rightarrow 0$ in misura, infatti

$$\mu\{x \in [0, 1] : |f_n(x)| > \varepsilon\} \rightarrow 0 \quad \text{per } n \rightarrow \infty$$

ma non c'è convergenza quasi ovunque, infatti fissato $x \in [0, 1]$, la successione numerica $f_n(x)$ non ha limite, perché purché assuma principalmente il valore 0, ogni tanto assume il valore 1, e per ogni n esiste un $\bar{n} \geq n$ tale che $f_{\bar{n}}(x) = 1$, per cui non può esistere il limite. Poiché questo è vero per ogni $x \in [0, 1]$, non c'è convergenza puntuale in nessun sottoinsieme.

Esercizio 1.3

Sia

$$f_n(x) = \frac{2n\sqrt[3]{x} + 3}{1 + (nx)^2} \quad x \in \mathbb{R}$$

studiare:

- a) per n fissato la misurabilità e l'integrabilità di f_n

$$f_n \sim c_n \frac{\sqrt[3]{x}}{x^2} \sim c_n \frac{1}{x^{\frac{5}{3}}} \quad \text{per } x \rightarrow \pm\infty$$

Quindi f_n è integrabile su tutto \mathbb{R} in quanto $\frac{5}{3} > 1$

- b) Dimostrare che $|f_n(x)| \leq \frac{5}{n}$ per ogni x con $|x| \geq 1$

$$|f_n(x)| \leq \frac{2n|x|^{\frac{1}{3}+3}}{1+n^2x^2} \leq \frac{\frac{2}{n}|x|^{\frac{1}{3}} + \frac{3}{n^2}}{\frac{1}{n^2} + x^2} \leq \frac{2}{n} \frac{|x|^{\frac{1}{3}}}{x^2} + \frac{\frac{3}{n^2}}{1} \leq \frac{2}{n} \cdot 1 + \frac{3}{n} = \frac{5}{n}$$

- c) f_n converge quasi ovunque in \mathbb{R} ? E quasi uniformemente? E in misura?

$f_n \xrightarrow{\text{q.o.}} 0$. Infatti per $x = 0$ $f_n(0) \rightarrow 3$ mentre per $x \neq 0$ abbiamo che $f_n(x) \rightarrow 0$.

Il punto b) ci dice che f_n converge quasi uniformemente a 0 in $\mathbb{R} \setminus (-1, 1)$. Ora possiamo considerare che in $(-1, 1)$ $f_n \rightarrow 0$ q.o., per cui per Severini-Egorov $f_n \rightarrow 0$ quasi uniformemente. Infine avendo convergenza q.u. in $(-1, 1)$ e convergenza q.u. in $\mathbb{R} \setminus (-1, 1)$ allora abbiamo convergenza q.u. in \mathbb{R} . Infine $f_n \xrightarrow{\mu} 0$ in quanto la convergenza uniforme implica la convergenza in misura.

- d) C'è convergenza in L^1 ? Ossia è vero che

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathbb{R}} |f_n - 0| d\mu = 0 \quad ?$$

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}} |f_n| d\mu &\leq \int_{\mathbb{R}} \frac{2n|x|^{\frac{1}{3}}}{1+n^2x^2} dx + \underbrace{\int_{\mathbb{R}} \frac{3}{1+n^2x^2} dx}_{\leq \frac{3}{1+x^2} \in L^1(\mathbb{R}) \text{ per Lebesgue} \rightarrow 0} \\ &\rightarrow 0 \end{aligned}$$

Invece per il primo integrale operiamo la sostituzione $nx = t$, $ndx = dt$

$$\frac{1}{n} \int_{\mathbb{R}} \frac{2n\sqrt[3]{\frac{t}{n}}}{1+t^2} dt = \frac{2}{\sqrt[3]{n}} \int_{\mathbb{R}} \frac{\sqrt[3]{t}}{1+t^2} dt \rightarrow 0 \quad \text{per } n \rightarrow \infty$$

poiché l'integrale è finito.

1.9 Teoremi di Fubini e Tonelli

Vogliamo analizzare gli integrali multipli, considerando gli spazi prodotto. Siano (X, \mathcal{M}, μ) e (Y, \mathcal{N}, ν) spazi di misura σ -finiti. Vogliamo costruire uno spazio di probabilità prodotto Allora l'insieme ambiente è $X \times Y$ e definiamo $\mathcal{M} \times \mathcal{N}$ come la σ -algebra generata da tutti gli insiemi del tipo $A \times B$, con $A \in \mathcal{M}$ e $B \in \mathcal{N}$. Adesso quindi $(X \times Y, \mathcal{M} \times \mathcal{N})$ è uno spazio misurabile con una misura indotta da μ e ν . A tale scopo introduciamo nuovi insiemi e costruzioni. Sia $E \in \mathcal{M} \times \mathcal{N}$. Allora per ogni $(x, y) \in X \times Y$ abbiamo i due insiemi $E_x := \{y \in Y : (x, y) \in E\}$ e

$E_y := \{x \in X : (x, y) \in E\}$. Per definire la misura prodotto quindi ricorriamo alla seguente proposizione

Proposizione 1.37. *Per ogni $x \in X$ si ha che $E_x \in \mathcal{N}$ e per ogni $y \in Y$ si ha che $E_y \in \mathcal{M}$. Inoltre le funzioni $x \mapsto \nu(E_x)$ e $y \mapsto \mu(E_y)$ risultano misurabili in (X, \mathcal{M}) e (Y, \mathcal{N}) rispettivamente. In aggiunta*

$$\int_X \nu(E_x) d\mu = \int_Y \mu(E_y) d\nu =: (\mu \times \nu)(E)$$

Per la dimostrazione di questa proposizione si usano le *famiglie monotone* di misure.

Definizione 1.13: Famiglia monotona

Una collezione \mathcal{A} di sottoinsiemi di un insieme ambiente Ω si dice *famiglia monotona* se per ogni successione $\{A_n\}$ crescente di insiemi in \mathcal{A} e per ogni successione $\{B_n\}$ decrescente di insiemi in \mathcal{A} si ha che

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{A} \quad \text{e} \quad \bigcap_{n=1}^{\infty} B_n \in \mathcal{A}$$

Data una collezione \mathcal{F} di sottoinsiemi di Ω , si definisce $\nu(\mathcal{F})$ famiglia monotona generata da \mathcal{F} come la più piccola famiglia monotona di insiemi contenente \mathcal{F} .

Osservazione. Dato \mathcal{F} , si possono definire $\sigma(\mathcal{F})$ e $\nu(\mathcal{F})$, con $\sigma(\mathcal{F})$

Lemma 1.38. *Se \mathcal{F} è un'algebra, allora $\nu(\mathcal{F})$ è anche una σ -algebra e coincide con $\sigma(\mathcal{F})$.*

Possiamo ora utilizzare questo lemma perché $\mathcal{M} \times \mathcal{N}$ è anche la σ -algebra generata dalle unioni finite di insiemi “rettangolari”, ossia del tipo $A \times B$, con $A \in \mathcal{M}$ e $B \in \mathcal{N}$, che formano un'algebra di insiemi.

Notiamo che

$$\begin{aligned} (\mu \times \nu)(E) &= \int_X \nu(E_x) d\mu = \int_Y \mu(E_y) d\nu = \int_{X \times Y} \chi_E(x, y) d(\mu \times \nu) \\ &= \int_X \left(\int_Y \chi_E(x, y) d\nu \right) d\mu = \int_X \left(\int_Y \chi_E(x, y) d\nu \right) d\mu \end{aligned}$$

Teorema 1.39: Tonelli

Sia F una funzione misurabile in $(X \times Y, \mathcal{M} \times \mathcal{N})$ e non negativa. Allora

- $F(x, y)$ è misurabile sia rispetto a x per q.o. y che rispetto a y per q.o. x
- La funzione $x \mapsto \int_Y F(x, y) d\nu$ è misurabile in (X, \mathcal{M}) .
- La funzione $y \mapsto \int_X F(x, y) d\mu$ è misurabile in (Y, \mathcal{N}) .
- Valgono le seguenti uguaglianze

$$\int_{X \times Y} F d(\mu \times \nu) = \int_X \left(\int_Y F(x, y) d\nu \right) d\mu = \int_Y \left(\int_X F(x, y) d\mu \right) d\nu$$

dove il secondo e il terzo integrale vengono chiamati *integrali iterati*. In particolare se esiste finito uno degli integrali iterati, allora $F \in L^1(X \times Y)$ e esiste finito anche l'altro integrale iterato.

Dimostrazione. Dimostriamo il teorema di Tonelli per funzioni semplici. Sia $F = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{A_i \times B_i}$. Allora

$$\int_{X \times Y} F d(\mu \times \nu) = \sum_{i=1}^n c_i \mu(A_i) \nu(B_i) = \int_X \left(\int_Y F(x, y) d\nu \right) d\mu$$

Ora per passare da funzioni semplici a funzioni non negative, consideriamo una successione crescente di funzioni semplici $F_n \nearrow F$. Allora per il teorema di Beppo Levi abbiamo che

$$\int_{X \times Y} F d(\mu \times \nu) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{X \times Y} F_n d(\mu \times \nu) = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_X \left(\int_Y F_n(x, y) d\nu \right) d\mu$$

Ora per il teorema di Beppo Levi abbiamo che

$$\int_X \left(\int_Y F_n(x, y) d\nu \right) d\mu = \int_X \left(\int_Y F(x, y) d\nu \right) d\mu$$

e quindi abbiamo dimostrato il teorema di Tonelli per funzioni non negative. Ora per il caso generale, consideriamo $F = F^+ - F^-$ e applichiamo il teorema di Tonelli per funzioni non negative. \square

Osservazione. La non-negatività di F è essenziale per il teorema di Tonelli. Si consideri come esempio $f(x, y) = \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2}$ su $\mathbb{R}^2 - (0, 0)$, $f(0, 0) = 0$. Allora f è L-integrabile su \mathbb{R} rispetto a x e a y , e l'integrale vale 0. Otteniamo quindi che

$$\int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}} f(x, y) dx \right) dy = \int_{\mathbb{R}} \left(\int_{\mathbb{R}} f(x, y) dy \right) dx = 0$$

eppure f non è L-integrabile su \mathbb{R}^2 , infatti

$$\int_{\mathbb{R}^2} |f(x, y)| d(x, y) = \int_{\mathbb{R}^2} \left| \frac{xy}{(x^2 + y^2)^2} \right| d(x, y) = \int_0^{2\pi} \int_0^{+\infty} \frac{r^2 |\cos \theta \sin \theta|}{r^4} r dr d\theta$$

e rispetto a r viene l'integrale di $\frac{1}{r}$ né in un intorno di 0 né in un intorno di $+\infty$.

Teorema 1.40: Fubini

Sia $F \in L^1(X \times Y)$. Allora

- per q.o. $x \in X$, $F(x, \cdot) \in L^1(Y)$ e per q.o. $y \in Y$, $F(\cdot, y) \in L^1(X)$
- La funzione $x \mapsto \int_Y F(x, y) d\nu$ è integrabile su X e la funzione $y \mapsto \int_X F(x, y) d\mu$ è integrabile su Y
- Valgono le seguenti uguaglianze

$$\int_{X \times Y} F d(\mu \times \nu) = \int_X \left(\int_Y F(x, y) d\nu \right) d\mu = \int_Y \left(\int_X F(x, y) d\mu \right) d\nu$$

Dimostrazione. Sia $F = F^+ - F^-$, e in particolare $F^+, F^- \in L^1(X \times Y)$. Allora per il teorema di Tonelli abbiamo che

$$\int_{X \times Y} F^+ d(\mu \times \nu) = \int_X \left(\int_Y F^+(x, y) d\nu \right) d\mu$$

e

$$\int_{X \times Y} F^- d(\mu \times \nu) = \int_X \left(\int_Y F^-(x, y) d\nu \right) d\mu$$

e infine per sottrazione e linearità dell'integrale deduciamo l'uguaglianza finale. \square

Esercizio 1.4

Si considerino in \mathbb{R}^2 le funzioni del tipo $(x_1, x_2) \mapsto |x|^{-\alpha}$, dove $|x| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2}$. Per quali α queste funzioni sono integrabili in $B_1(0)$? E in $\mathbb{R}^2 \setminus B_1(0)$?

Definizione 1.14: Convoluzione

Siano due funzioni $f, g : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}$. Allora la funzione

$$(f \star g)(x) = \int_{\mathbb{R}^N} f(x - y)g(y)dy$$

viene detto **prodotto di convoluzione** di f e g .

Proposizione 1.41. Se $f, g \in L^1(\mathbb{R}^N)$ allora $f \star g \in L^1(\mathbb{R}^N)$ (ed è ben definita).

Dimostrazione. Consideriamo la funzione $F(x, y) = f(x - y)g(y)$. Allora chiaramente $|F(x - y)| = |f(x - y)||g(y)|$. Allora abbiamo che

$$\int_{\mathbb{R}^N} |f(x - y)||g(y)|dx = |g(y)| \int_{\mathbb{R}^N} |f(x - y)|dx = |g(y)| \int_{\mathbb{R}^N} |f|d\mu$$

E abbiamo che

$$\int_{\mathbb{R}^N} \left(\int_{\mathbb{R}^N} |f(x - y)||g(y)|dx \right) dy = \int_{\mathbb{R}^N} |g(y)| \int_{\mathbb{R}^N} |f|d\mu dy = \int_{\mathbb{R}^N} |g|d\mu \int_{\mathbb{R}^N} |f|d\mu$$

che è finito, quindi per il teorema di Tonelli abbiamo che

$$\int_{\mathbb{R}^N} |F(x, y)|d\mu = \int_{\mathbb{R}^N} \int_{\mathbb{R}^N} |f(x - y)||g(y)|dydx = \int_{\mathbb{R}^N} \int_{\mathbb{R}^N} |f|d\mu \int_{\mathbb{R}^N} |g|d\mu < +\infty$$

Quindi ora sapendo che $F \in L^1$, possiamo applicare il teorema di Fubini e ottenere che $f \star g \in L^1$. \square

Esercizio 1.5

La precedente proprietà non è vera per il prodotto normale di funzioni, trovare un controesempio dove $f, g \in L^1(\mathbb{R})$ ma $f \cdot g \notin L^1(\mathbb{R})$.

1.10 Misure Relative

Definizione 1.15: Misura Relativa

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile. Sia $\phi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ si dice **misura relativa** se valgono le seguenti proprietà:

1. $\phi(\emptyset) = 0$
2. Se $\{A_n\} \subseteq \mathcal{M}$ è una successione di insiemi a due a due disgiunti, allora

$$\phi\left(\bigcup_{i \in \mathbb{N}} A_i\right) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi(A_i)$$

Ora procediamo con alcune osservazioni sulle misure relative

1. Le misure relative possono assumere valori negativi, ma sono sempre finite
2. La serie $\sum_{i=1}^{\infty} \phi(A_i)$ è una serie convergente come conseguenza della σ -additività
3. Le misure finite sono anche misure relative
4. (\neg monotonia) Infatti se $B \in \mathcal{M}$ tale che $\phi(B) < 0$ abbiamo che $\emptyset \subseteq B$ ma $0 > \phi(B)$
5. (sottrattività) Per la stessa dimostrazione di prima vale ancora, quindi se $A \subseteq B$ sono misurabili, allora abbiamo che $\phi(B \setminus A) = \phi(B) - \phi(A)$
6. (\neg subadditività) Consideriamo lo spazio di misura relativa $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \delta_1 + \delta_{-1} - \delta_0)$, che mostreremo più avanti che è una misura. Sia $A = [-1, 0]$, $B = [0, 1]$. Allora $A \cap B = \{0\}$ e $A \cup B = [-1, 1]$.

$$1 = 1 + 1 - 1 = \phi(A \cup B) > \phi(A) + \phi(B) = (1 - 1) + (-1 + 1) = 0$$

7. (continuità) La dimostrazione del teorema 1.3, parte 1, non usava la positività né la monotonia, né la subadditività, ma solo σ -additività, ossia abbiamo che se A_n è una successione crescente di insiemi misurabili,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \phi(A_n) = \phi\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right)$$

Per quanto riguarda le successioni decrescenti la dimostrazione del teorema 1.3 usava solo σ -additività e sottrattività, quindi abbiamo anche che se A_n è una successione decrescente di insiemi misurabili,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \phi(A_n) = \phi\left(\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n\right)$$

notare che non necessitiamo di aggiungere l'ipotesi $\phi(A_1) < +\infty$

Esempio 1.22. La misura δ_O di Dirac è una misura finita quindi è una misura relativa, mentre la misura del contare e la misura di Lebesgue non sono misure relative, perché $\#\mathbb{N} = +\infty$ e $\mu(\mathbb{R}) = +\infty$.

Proposizione 1.42. Se $\varphi_1, \varphi_2 : \mathcal{M} \rightarrow [0, +\infty]$ sono misure finite su (Ω, \mathcal{M}) , allora

$$\begin{aligned}\varphi_+ &:= \varphi_1 + \varphi_2 : \mathcal{M} \longrightarrow \mathbb{R} \\ E &\longmapsto (\varphi_1 + \varphi_2)(E) = \varphi_1(E) + \varphi_2(E)\end{aligned}$$

è una misura finita (e quindi relativa).

$$\begin{aligned}\varphi_- &:= \varphi_1 - \varphi_2 : \mathcal{M} \longrightarrow \mathbb{R} \\ E &\longmapsto (\varphi_1 - \varphi_2)(E) = \varphi_1(E) - \varphi_2(E)\end{aligned}$$

è una misura relativa

Dimostrazione. La prima parte, φ_+ misura finita, è ovvio. Procediamo con la seconda.

1. $(\varphi_1 - \varphi_2)(E) = \varphi_1(E) - \varphi_2(E) \in \mathbb{R}$ per ogni $E \in \mathcal{M}$
2. $(\varphi_1 - \varphi_2)(\emptyset) = \varphi_1(\emptyset) - \varphi_2(\emptyset) = 0$
3. Sia $\{A_n\}$ una successione di insiemi disgiunti. Allora

$$\begin{aligned}(\varphi_1 - \varphi_2)\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) &= \varphi_1\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) - \varphi_2\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) = \\ &= \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_1(A_i) - \varphi_2(A_i)\end{aligned}$$

□

Proposizione 1.43 (Generazione misura relativa). Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura e sia $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione, con $f \in L^1$. Allora

$$\begin{aligned}\varphi : \mathcal{M} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ E &\longmapsto \varphi(E) = \int_E f d\mu\end{aligned}$$

è una misura relativa

Dimostrazione.

1. $\varphi(E) \in \mathbb{R}$ poiché $f \in L^1$
2. $\varphi(\emptyset) = \int_{\emptyset} f d\mu = 0$
3. Sia $\{E_n\}$ una successione disgiunta di insiemi misurabili. Allora

$$\varphi\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n\right) = \int_{\bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n} f d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{E_n} f d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \varphi(E_n)$$

□

Definizione 1.16: Insiemi positivi e negativi

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile e sia $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ una misura relativa. Allora

- diciamo che $P \in \mathcal{M}$ è positivo per φ se

$$\forall E \in \mathcal{M}, \quad E \subseteq P, \quad \varphi(E) \geq 0$$

– diciamo che $N \subseteq \mathcal{M}$ è negativo per φ se

$$\forall E \in \mathcal{M}, \quad E \subseteq N, \quad \varphi(E) \leq 0$$

Osservazione. \emptyset è sia positivo che negativo per ogni misura relativa.

Teorema 1.44: Teorema di decomposizione di Hahn

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile e $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ una misura relativa. Allora esistono due insiemi $A, B \in \mathcal{M}$ tali che $A \cup B = \Omega$, $A \cap B = \emptyset$, A è positivo e B è negativo.

Osservazione. La decomposizione di Hahn **non** è unica. Consideriamo $(\mathbb{R}, \mathcal{B}(\mathbb{R}), \delta_0 - \delta_1)$. Allora $(A, B) = (\{0\}, \mathbb{R} \setminus \{0\})$ è una buona decomposizione di Hahn, ma anche $(A, B) = (\mathbb{R} \setminus \{1\}, \{1\})$ lo è. In generale basta prendere $1 \notin A \ni 0$ e $B = A^C$.

Lemma 1.45. Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile e $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ una misura relativa. Allora se esiste $A \in \mathcal{M}$ tale che $\varphi(A) > 0$ allora esiste $P \subseteq A$, con $P \in \mathcal{M}$ tale che P è positivo per φ e $\varphi(P) > 0$.

Dimostrazione. Se A è positivo ho concluso, supponiamo quindi che A non sia positivo. Allora esiste un sottoinsieme di A con misura negativa.

$$n_1 := \min\{n \in \mathbb{N} : \exists A' \in \mathcal{M}, \quad A' \subseteq A, \quad \varphi(A') < -\frac{1}{n}\}$$

trovo quindi $A_1 \subseteq A$, con $A_1 \in \mathcal{M}$ e tale che $\varphi(A_1) < -\frac{1}{n_1}$.

Se $A \setminus A_1$ è positivo ho concluso, infatti $\varphi(A \setminus A_1) = \varphi(A) - \varphi(A_1) > \varphi(A) > 0$, supponiamo quindi che $A \setminus A_1$ non sia positivo e ripetiamo il procedimento.

$$n_2 := \min\{n \in \mathbb{N} : \exists A' \in \mathcal{M}, \quad A' \subseteq A \setminus A_1, \quad \varphi(A') < -\frac{1}{n}\}$$

trovo quindi $A_2 \in \mathcal{M}$ con $A_2 \subseteq A \setminus A_1$ e $\varphi(A_2) < -\frac{1}{n_2}$.

Ora se $A \setminus (A_1 \cup A_2)$ è positivo concludiamo, altrimenti ripetiamo. Se esiste un $N \in \mathbb{N}$ tale che $A \setminus (\bigcup_{i=1}^N A_i)$ è positivo abbiamo concluso, infatti

$$\varphi(A \setminus \bigcup_{i=1}^N A_i) = \varphi(A) - \sum_{i=1}^N \varphi(A_i) > \varphi(A) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{n_i} > 0$$

Supponiamo quindi che non esista un tale N . Otteniamo una successione $\{A_k\}$ di insiemi $A_k \in \mathcal{M}$ e con

$$A_i \cap A_j = \emptyset \quad \forall i \neq j, \quad \varphi(A_k) < -\frac{1}{n_k} \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

$$n_k := \min\{n \in \mathbb{N} : \exists A' \in \mathcal{M}, \quad A' \subseteq A - \left(\bigcup_{i=1}^{k-1} A_i\right), \quad \varphi(A') < -\frac{1}{n}\}$$

Allora il claim è che $P = A \setminus (\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k) \in \mathcal{M}$ sia positivo e abbia misura positiva.

$$\varphi(P) = \varphi(A) - \sum_{k=1}^{\infty} \varphi(A_k) > \varphi(A) > 0$$

Ci rimane da verificare che P sia positivo. Suppongo per assurdo che esista un $E \in \mathcal{M}$ tale che $E \subseteq P$ e $\varphi(E) < -\varepsilon$. Abbiamo che

$$\mathbb{R} \ni \varphi(P) = \varphi(A) + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{n_i}$$

quindi la serie è convergente, per cui $\lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1}{n_k} = 0$ e quindi esiste un $\bar{k} \in \mathbb{N}$ tale che

$$\frac{1}{n_{\bar{k}-1}} < \varepsilon \implies \varphi(E) < -\varepsilon < -\frac{1}{n_{\bar{k}-1}}$$

ma ora sappiamo che

$$E \subseteq A \setminus \left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} A_k \right) \subseteq A \setminus \left(\bigcup_{k=1}^{\bar{k}-1} A_k \right)$$

□

Lemma 1.46. Sia (Ω, \mathcal{M}) con misura relativa $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ e sia $\{P_k\}$ una successione di insiemi positivi. Allora

$$\bigcup_{k \in \mathbb{N}} P_k \text{ è positivo}$$

Dimostrazione. Consideriamo la successione \tilde{P}_k , dove $\tilde{P}_1 = P_1$, $\tilde{P}_2 = P_2 \setminus P_1$ e in genere

$$\tilde{P}_{k+1} = P_{k+1} \setminus \left(\bigcup_{i=1}^k P_i \right)$$

Abbiamo che $\tilde{P}_k \subseteq P_k$ e quindi \tilde{P}_k è positivo. Inoltre per ogni $i \neq j$ abbiamo che $\tilde{P}_i \cap \tilde{P}_j = \emptyset$. Infine l'unione dei \tilde{P}_k è uguale all'unione dei P_k , ossia

$$\bigcup_{k \in \mathbb{N}} P_k = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \tilde{P}_k$$

Sia $E \in \mathcal{M}$ con $E \in \bigcup_{k \in \mathbb{N}} P_k$. Allora

$$\varphi(E) = \varphi \left(E \cap \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \tilde{P}_k \right) = \varphi \left(\bigcup_{k \in \mathbb{N}} (E \cap \tilde{P}_k) \right) = \sum_{k=1}^{\infty} \varphi(\underbrace{E \cap \tilde{P}_k}_{\subseteq \tilde{P}_k}) > 0$$

□

Dimostrazione del teorema di decomposizione di Hahn. Sia

$$p := \sup\{\varphi(P) : P \in \mathcal{M}, \quad P \text{ positivo}\}$$

dove il sup è finito in quanto $\varphi(\emptyset) = 0$. Sia ora una successione $\{A_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ con A_n positivo tale che $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(A_n) = p$. Allora $A := \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ allora $A \in \mathcal{M}$ e A è positivo, per il lemma 2. Per definizione di p abbiamo che $\varphi(A) \leq p$. Inoltre

$$\varphi(A) = \varphi((A \setminus A_n) \cup A_n) = \varphi(A \setminus A_n) + \varphi(A_n) \geq \varphi(A_n), \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

e quindi $\varphi(A) \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(A_n) = p$. Abbiamo quindi che $\varphi(A) = p$.

Ora prendiamo $B = \Omega \setminus A \implies A \cap B = \emptyset$ e $A \cup B = \Omega$. Vogliamo mostrare che B è negativa. Assumiamo per assurdo che esista un insieme a misura positiva, e quindi per il lemma possiamo assumere che esista un insieme positivo $P \subseteq B$ con $P \in \mathcal{M}$. Allora $A \cup P$ è positivo e

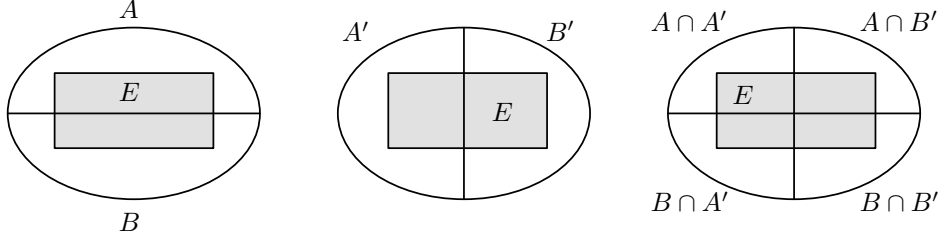
$$\varphi(A \cup P) = \varphi(A) + \varphi(P) = p + \varphi(P) > p$$

che è assurdo per la massimalità di p . Dunque B non ha sottoinsiemi di misura positiva ed è quindi negativo. □

Teorema 1.47: Invarianza della decomposizione di Hahn

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio di misura con $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ una misura relativa. Siano (A, B) e (A', B') due decomposizioni di Hahn di Ω rispetto a φ . Allora $\forall E \in \mathcal{M}$ si ha che

$$\varphi(A \cap E) = \varphi(A' \cap E) \quad \text{e} \quad \varphi(B \cap E) = \varphi(B' \cap E)$$



Dimostrazione. Partiamo dalla prima:

$$\varphi(A \cap E) = \varphi(A \cap A' \cap E) + \varphi((A \setminus A') \cap E)$$

ma allora poiché $(A \setminus A') \cap E \subseteq A \cap B'$ abbiamo che ha misura necessariamente 0 da cui $\varphi(A \cap E) = \varphi(A \cap A' \cap E)$. Analogamente si dimostra che $\varphi(A' \cap E) = \varphi(A \cap A' \cap E)$ da cui la tesi. Similmente si dimostra l'altra eguaglianza. \square

Definizione 1.17: Variazione superiore, inferiore, totale

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio di misura e $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ una misura relativa. Sia (A, B) una decomposizione di Hahn. Allora

- φ^+ , definita con $\varphi^+(E) = \varphi(A \cap E)$ è detta **variazione superiore**
- φ^- , definita con $\varphi^-(E) = -\varphi(B \cap E)$ è detta **variazione inferiore**
- $|\varphi| = \varphi^+ + \varphi^-$ è detta **variazione totale**

Osservazione. La precedente è una buona definizione, per il teorema di invarianza della decomposizione di Hahn.

Esempio 1.23. Consideriamo $(\mathbb{R}, \mathcal{M}, \mu)$ con la misura di Lebesgue, e sia $f \in L^1$. Allora $\varphi(E) = \int_E f d\mu$ è una misura relativa. Consideriamo la decomposizione di Hahn $(A, B) = (\{f \geq 0\}, \{f \leq 0\})$. Allora

$$\varphi^+(E) = \int_E f^+ d\mu, \quad \varphi^-(E) = -\int_E f^- d\mu, \quad |\varphi|(E) = \int_E |f| d\mu$$

Esercizio 1.6

Come sono fatte le variazioni inferiori e totali della misura relativa data da somme di misure di Dirac?

Teorema 1.48

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio di misura con $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathbb{R}$ una misura relativa. Allora

- 1) $\varphi^+, \varphi^-, |\varphi|$ sono misure finite (positive)
- 2) $\forall E \in \mathcal{M}$ abbiamo che $\varphi(E) = \varphi^+(E) - \varphi^-(E)$ e $|\varphi(E)| \leq |\varphi|(E)$

Dimostrazione. 1. $\forall E \in \mathcal{M}$, tutte le $\varphi^+(E), \varphi^-(E), |\varphi|(E) \in [0, +\infty)$. Inoltre $\varphi^+(\emptyset) = \varphi^-(\emptyset) = |\varphi|(\emptyset) = 0$.

2. $\varphi(E) = \varphi((E \cap A) \cup (E \cap B)) = \varphi(E \cap A) + \varphi(E \cap B) = \varphi^+(E) - \varphi^-(E)$ e $|\varphi(E)| = |\varphi^+(E) - \varphi^-(E)| \leq \varphi^+(E) + \varphi^-(E) = |\varphi|(E)$

□

Definizione 1.18: μ -Assoluta continuità

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia φ una misura (o misura relativa) su (Ω, \mathcal{M}) . Allora φ si dice **μ -assolutamente continua** (denotato μ -a.c.) se per

$$\mu(E) = 0 \implies \varphi(E) = 0, \forall E \in \mathcal{M}$$

Esempio 1.24. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia $f \in L^1(\Omega)$, con $\varphi(E) = \int_E f d\mu$ misura relativa. Allora φ è assolutamente continua. Infatti preso un insieme $E \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(E) = 0$ abbiamo che $\varphi(E) = 0$ perché integra su un insieme trascurabile.

Esempio 1.25. Sia $(\mathbb{R}, \mathcal{L}(\mathbb{R}))$ lo spazio misurabile di Lebesgue. Allora consideriamo su tale spazio due misure: δ_0 delta di Dirac in $x = 0$ e $\mathcal{L}^1(\mathbb{R})$ la misura di Lebesgue 1-dimensionale.

Allora δ_0 non è assolutamente continua, infatti $E = \{0\}$ allora $\mathcal{L}^1(E) = 0$ ma $\delta_0(E) = 1$. Similmente \mathcal{L}^1 non è δ_0 -assolutamente continua, infatti preso $E = (1, 2)$ abbiamo che $\mathcal{L}^1(E) = 1$ ma $\delta_0(E) = 0$.

Esempio 1.26. Ora sempre su $(\mathbb{R}, \mathcal{L}(\mathbb{R}))$ consideriamo la misura $\mathcal{L}_*^1(\mathbb{R}) : \mathcal{L}(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$ definita come $E \mapsto \mathcal{L}^1(E \cap [0, 1])$.

Allora \mathcal{L}_*^1 è \mathcal{L}^1 -assolutamente continua, infatti preso E trascurabile per \mathcal{L}^1 abbiamo che $E \cap [0, 1] \subseteq E$ quindi anche $\mathcal{L}_*^1(E) = \mathcal{L}^1(E \cap [0, 1]) \leq \mathcal{L}^1(E) = 0$. \mathcal{L}^1 non è tuttavia \mathcal{L}_*^1 -assolutamente continua, infatti preso $E = (1, 2)$ abbiamo che $\mathcal{L}^1(E) = 1$ ma $\mathcal{L}_*^1(E) = \mathcal{L}^1(\emptyset) = 0$.

Proposizione 1.49. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Sia φ una misura relativa su (Ω, \mathcal{M}) . Allora sono equivalenti:

- i) φ è μ -assolutamente continua
- ii) φ^+, φ^- sono μ -assolutamente continue
- iii) $|\varphi|$ è μ -assolutamente continua

Dimostrazione. i) \implies ii). Sia (A, B) una decomposizione di Hahn di Ω per φ . Supponiamo che φ sia μ -assolutamente continua. Sia $E \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(E) = 0$ e quindi anche $\mu(E \cap A) = 0$ e $\mu(E \cap B) = 0$. Quindi per μ -a.c. $\varphi^+(E) = \varphi(E \cap A) = 0$ e similmente $\varphi^-(E) = -\varphi(E \cap B) = 0$.

ii) \implies iii). Supponiamo che φ^+ e φ^- siano μ -assolutamente continue. Sia $E \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(E) = 0$. Allora $\varphi^+(E) = 0$ e $\varphi^-(E) = 0$, ma allora $|\varphi|(E) = \varphi^+(E) + \varphi^-(E) = 0$.

iii) \implies i). Supponiamo che $|\varphi|$ sia μ -assolutamente continua. Sia $E \in \mathcal{M}$ tale che $\mu(E) = 0$. Allora $|\varphi(E)| \leq |\varphi|(E) = 0$, quindi $\varphi(E) = 0$ □

Proposizione 1.50. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura e sia φ una misura relativa su (Ω, \mathcal{M}) . Se φ è μ -a.c. allora

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \text{ t.c. } \forall E \in \mathcal{M} \quad \mu(E) < \delta \implies |\varphi|(E) < \varepsilon$$

Dimostrazione. Procediamo per assurdo. Supponiamo quindi che valendo le ipotesi si abbia

$$\exists \varepsilon > 0 \quad \forall n \in \mathbb{N} \quad \exists E_n \in \mathcal{M} \quad \mu(E_n) < \frac{1}{2^n} \text{ e } |\varphi|(E_n) \geq \varepsilon$$

Sia

$$E := \bigcap_{n=1}^{\infty} \bigcup_{k=n}^{\infty} E_k \in \mathcal{M}$$

Dove la successione interna all'intersezione è una successione decrescente. Inoltre abbiamo che $\mu(\bigcup_{k=1}^{\infty} E_k) \leq \sum_{k=1}^{\infty} \mu(E_k) < \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2^k} = 1$ che è finito. Possiamo quindi calcolarne la misura:

$$\mu(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu\left(\bigcup_{k=n}^{\infty} E_k\right) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=n}^{\infty} \mu(E_k) < \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=n}^{\infty} \frac{1}{2^k} = 0$$

sicché l'ultimo passaggio è il resto di una successione convergente.

Ora per concludere vogliamo mostrare che $\varphi(E) \neq 0$ mostrando quindi che φ non è μ -a.c. Sappiamo che $|\varphi|$ è una misura finita. Allora per continuità abbiamo

$$|\varphi|(E) = \lim_{n \rightarrow \infty} |\varphi|\left(\bigcup_{k=n}^{\infty} E_k\right) \stackrel{\text{monotonia}}{\geq} \lim_{n \rightarrow \infty} |\varphi|(E_n) \geq \varepsilon > 0$$

ora per la proposizione precedente anche φ non è μ -a.c., arriviamo dunque a una contraddizione. \square

Corollario 1.50.1. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura e sia $f \in L^1(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$. Allora

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \text{ t.c. } \forall E \in \mathcal{M} \quad \mu(E) < \delta \implies \left| \int_E f d\mu \right| < \varepsilon$$

Dimostrazione. Data $f \in L^1$ possiamo associarle la misura relativa $\varphi(E) = \int f d\mu$ che è μ -a.c. Per la proposizione precedente sappiamo che

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \text{ t.c. } \forall E \in \mathcal{M} \quad \mu(E) < \delta \implies |\varphi|(E) < \varepsilon$$

Il corollario segue semplicemente da $\left| \int_E f d\mu \right| = |\varphi(E)| \leq |\varphi|(E)$ \square

Definizione 1.19: Misura singolare

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura e sia φ una misura o misura relativa su (Ω, \mathcal{M}) . Allora φ è μ -singolare se esistono $A, B \in \mathcal{M}$ tali che

- $A \cup B = \Omega$ e $A \cap B = \emptyset$
- $\mu(A) = 0$ e $|\varphi|(B) = 0$

Osservazione. Se abbiamo μ, φ misure su (Ω, \mathcal{M}) allora φ è μ -singolare se e solo se μ è φ -singolare (si dice che μ e φ sono mutuamente singolari).

Infatti se φ è μ -singolare allora esistono $A, B \in \mathcal{M}$, con $A \cup B = \Omega$ e $A \cap B = \emptyset$ tali che $\mu(A) = 0$ e $\varphi(B) = 0$. Allora chiaramente “scambiando” A e B si ottiene che μ è φ -singolare.

Proposizione 1.51. Sia φ una misura o misura relativa su (Ω, \mathcal{M}) e sia μ una misura su (Ω, \mathcal{M}) . Se φ è μ -assolutamente continua e μ -singolare allora $\varphi = 0$.

Dimostrazione. Sia φ μ -assolutamente continua e μ -singolare. Allora esistono $A, B \in \mathcal{M}$ decomposizione di Ω tali che $\mu(A) = 0$ e $|\varphi|(B) = 0$. Preso ora $E \in \mathcal{M}$ abbiamo che $\varphi(E) = \varphi(E \cap A) + \varphi(E \cap B)$. Poiché $\mu(E \cap B) \leq \mu(A) = 0$ allora anche $\varphi(E \cap B) = 0$. Inoltre $|\varphi(E \cap B)| \leq |\varphi|(E \cap B) \leq |\varphi|(B) = 0$. Concludiamo che $\varphi(E) = 0$ \square

Esempio 1.27. Sia $(\mathbb{R}, \mathcal{L}(\mathbb{R}), \mu)$ lo spazio di misura di Lebesgue e sia δ_0 la misura di Dirac in $x = 0$. Allora δ_0 è μ -singolare. Infatti preso $A = \{0\}$ e $B = \mathbb{R} - \{0\}$ si ha che $A \cap B = \emptyset$, $A \cup B = \mathbb{R}$, $\mu(A) = 0$ e $\delta_0(B) = 0$. Inoltre μ è δ_0 -singolare, per l'osservazione precedente ossia con $(A, B) = (B, A)$

Proposizione 1.52. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura e sia φ una misura relativa su (Ω, \mathcal{M}) . Allora sono equivalenti:

- i) φ è μ -singolare
- ii) φ^+, φ^- sono μ -singolari
- iii) $|\varphi|$ è μ -singolare

Dimostrazione. i) \implies ii) Sia A, B partizione per la μ -singolarità di φ . Allora $\mu(A) = 0$ e $|\varphi|(B) = 0$. Allora $|\varphi^+|(B) = \varphi^+(B) \leq |\varphi|(B) = 0$ e similmente per φ^- . Ne consegue che φ^+ e φ^- sono μ -singolari.

ii) \implies iii) Sia (A, B) partizione di Ω tale che $\mu(A) = 0$ e $\varphi^+(B) = 0$. Siano (A', B') partizione di Ω con $\mu(A') = 0$ e $\varphi^-(B') = 0$. Prendiamo $(A \cup A', B \cap B')$ e mostriamo che è una decomposizione che rende φ μ -singolare. Infatti $(A \cup A') \cup (B \cap B') = (A \cup A' \cup B) \cap (A \cup A' \cup B') = \Omega \cap \Omega = \Omega$ e $(A \cup A') \cap (B \cap B') = ((A \cap B) \cup (A' \cap B)) \cap B' = A' \cap B \cap B' = \emptyset$. Ora si ha che $\mu(A \cup A') = \mu(A) + \mu(A') = 0 + 0 = 0$ e $|\varphi|(B \cap B') = \varphi^+(B \cap B') + \varphi^-(B \cap B') \leq \varphi^+(B) + \varphi^-(B') = 0 + 0 = 0$

iii) \implies i) Ovvio. □

1.11 Derivata di Radon-Nikodym

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile. L'obiettivo di questa sottosezione è definire la derivata $\frac{\partial \varphi}{\partial \mu}$ di una misura relativa φ rispetto a una misura σ -finita μ su (Ω, \mathcal{M}) . Il significato di tale derivata è ancora sconosciuto a ogni essere mortale. Arriveremo a una definizione tramite 2 generalizzazioni: prima la definiamo per misure finite, poi per μ misura σ -finita e infine anche per φ relativa.

Teorema 1.53: Decomposizione di Lebesgue-Radon-Nikodym

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile. Siano μ e φ due misure finite su (Ω, \mathcal{M}) . Sia ora

$$\mathcal{F} := \{g : \Omega \rightarrow \mathbb{R} : g \geq 0 \text{ } \mu\text{-q.o.}, g \in L^1, \forall E \in \mathcal{M} \int_E g d\mu \leq \varphi(E)\}$$

Allora esiste unica (a meno di uguaglianza μ -q.o.) una funzione $f \in \mathcal{F}$ tale che

$$\int_{\Omega} f d\mu = \sup_{g \in \mathcal{F}} \int_{\Omega} g d\mu$$

Definizione 1.20: Derivata di Radon-Nikodym per misure finite

Siano μ e φ misure finite su (Ω, \mathcal{M}) . Chiamiamo **derivata di Radon-Nikodym** di φ rispetto a μ la funzione $f \in \mathcal{F}$ del teorema precedente e viene denotata con

$$f = \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \quad ; \quad \int_{\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu = \sup_{g \in \mathcal{F}} \int_{\Omega} g d\mu$$

Dimostrazione del Teorema 1.53, ossia che 1.20 è ben definita.
Iniziamo dimostrando l'unicità. Sia

$$I = \sup_{g \in \mathcal{F}} \int_{\Omega} g d\mu = \int_{\Omega} f_1 d\mu = \int_{\Omega} f_2 d\mu$$

per due funzioni $f_1, f_2 \in \mathcal{F}$. Ora costruiamo la seguente partizione di Ω :

$$\begin{aligned} E_1 &= \{x \in \Omega : f_1(x) > f_2(x)\} \\ E_2 &= \{x \in \Omega : f_1(x) < f_2(x)\} \\ E_3 &= \{x \in \Omega : f_1(x) = f_2(x)\} \end{aligned}$$

supponiamo ora per assurdo che $\mu(E_1) > 0$. Sia $h = \max\{f_1, f_2\}$, allora $h \in \mathcal{F}$, infatti $h \geq f_1 \geq 0$, $h \in L^1(\Omega)$, perché $f_1, f_2 \in L^1$ e per ogni $E \in \mathcal{M}$,

$$\begin{aligned} \int_E h d\mu &= \int_{E \cap E_1} h d\mu + \int_{E \cap E_2} h d\mu + \int_{E \cap E_3} h d\mu = \\ &= \int_{E \cap E_1} f_1 d\mu + \int_{E \cap E_2} f_2 d\mu + \int_{E \cap E_3} f_1 d\mu \leq \\ &\leq \varphi(E \cap E_1) + \varphi(E \cap E_2) + \varphi(E \cap E_3) = \varphi(E) \end{aligned}$$

tuttavia

$$\int_{\Omega} h d\mu = \int_{E_1} f_1 d\mu + \int_{E_2 \cup E_3} f_2 d\mu > \int_{E_1} f_2 d\mu + \int_{E_2 \cup E_3} f_2 d\mu = \int_{\Omega} f_2 d\mu = I$$

ma la f_2 avrebbe dovuto realizzare il sup, assurdo. Ne consegue che $f_1 = f_2$ μ -q.o..
Ora mostriamo l'esistenza. Chiamiamo

$$I = \sup_{g \in \mathcal{F}} \int_{\Omega} g d\mu$$

1. I esiste in quanto $\mathcal{F} \neq \emptyset$ perché $0 \in \mathcal{F}$.
2. $I \geq 0$ poiché $\int_{\Omega} g d\mu \geq 0$ per ogni $g \in \mathcal{F}$.
3. $I < +\infty$ poiché $\int_{\Omega} g d\mu \leq \varphi(\Omega)$ per ogni $g \in \mathcal{F}$.

quindi esiste una successione $\{g_n\} \subseteq \mathcal{F}$ tale che

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} g_n d\mu = I$$

allora ne estraiamo una sottosuccessione (poi rinominata g_n per comodità) tale che

$$\forall n \in \mathbb{N} : I - \frac{1}{n} \leq \int_{\Omega} g_n d\mu \leq I$$

e costruiamo per ogni $n \in \mathbb{N}$ la successione $f_n = \max\{g_1, \dots, g_n\}$. Dimostriamo ora che $\{f_n\} \subseteq \mathcal{F}$: $f_n \geq g_1 \geq 0$, $f_n \in L^1(\Omega)$ in quanto assume valori di funzioni integrabili e per ogni $E \in \mathcal{M}$

$$\int_E f_n d\mu = \sum_{i=1}^n \int_{E \cap E_i} f_n d\mu$$

dove gli E_i , per $i = 1, \dots, n$ sono così definiti:

$$\begin{aligned} E_1 &= \{x \in \Omega : g_1(x) \geq g_j(x) \forall j = 1, \dots, n\} \\ E_2 &= \{x \in \Omega : g_2(x) \geq g_j(x) \forall j = 1, \dots, n\} \setminus E_1 \\ E_3 &= \{x \in \Omega : g_3(x) \geq g_j(x) \forall j = 1, \dots, n\} \setminus (E_1 \cup E_2) \\ &\vdots \\ E_n &= \{x \in \Omega : g_n(x) \geq g_j(x) \forall j = 1, \dots, n\} \setminus \left(\bigcup_{i=1}^{n-1} E_i \right) \end{aligned}$$

e quindi formano una partizione di Ω , ne consegue che

$$\int_E f_n d\mu = \sum_{i=1}^n \int_{E \cap E_i} f_n d\mu = \sum_{i=1}^n \int_{E \cap E_i} g_i d\mu \stackrel{g_i \in \mathcal{F}}{\leq} \sum_{i=1}^n \varphi(E \cap E_i) = \varphi(E)$$

quindi $f_n \in \mathcal{F}$ e inoltre

$$I - \frac{1}{n} \leq g_n \leq f_n \implies \int_{\Omega} g_n d\mu \leq \int_{\Omega} f_n d\mu \leq I \quad (1.3)$$

inoltre le f_n formano una successione monotona non decrescente, e quindi per il teorema di Beppo Levi 1.31 abbiamo che $f_n \rightarrow f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ q.o. e tale che

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\Omega} f_n d\mu = \int_{\Omega} f d\mu$$

Per poter finire la dimostrazione, vogliamo che $f \in \mathcal{F}$, che è vero perché $f_n \geq 0 \rightarrow f \leq 0$; $f \in L^1$ per Beppo Levi e $f_n \in L^1$; infine per ogni $E \in \mathcal{M}$ abbiamo che

$$\int_E f_n d\mu \leq \varphi(E) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \int_E f d\mu \leq \varphi(E)$$

e quindi possiamo concludere $f \in \mathcal{F}$ e inoltre da (1.3) otteniamo che

$$I - \frac{1}{n} \leq \int_{\Omega} f_n d\mu \leq I \xrightarrow{n \rightarrow \infty} I \leq \int_{\Omega} f d\mu \leq I$$

□

Ora vogliamo generalizzare la definizione di derivata di Radon-Nikodym ad avere μ che sia σ -finita, ossia $\Omega = \bigcup_{n=1}^{\infty} E_n$ e $\mu(E_n) < +\infty$ per ogni $n \in \mathbb{N}$. Per farlo dobbiamo prima mostrare tre lemmi.

Lemma 1.54. *Sia Ω, \mathcal{M} uno spazio misurabile e siano μ e φ due misure finite. Allora $\forall g \in \mathcal{F}$ si ha che*

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \geq g \quad \mu - q.o.$$

Dimostrazione. Fissiamo $g \in \mathcal{F}$. Chiamiamo $E_{\geq} = \{x \in \Omega : \frac{\partial f}{\partial \mu}(x) \geq g(x)\}$ e $E_{<} = \Omega \setminus E_{\geq}$ similmente caratterizzato. Chiamiamo $h := \max\{f, g\}$. Allora $h \in \mathcal{F}$ perché $h \geq f \geq 0$, $h \in L^1$ perché $f, g \in L^1$ e $\forall E \in \mathcal{M}$ abbiamo

$$\int_E h d\mu = \int_{E \cap E_{\geq}} h d\mu + \int_{E \cap E_{<}} h d\mu = \int_{E \cap E_{\geq}} f d\mu + \int_{E \cap E_{<}} g d\mu \leq \varphi(E)$$

ma adesso assumiamo $\mu(E_{<}) > 0$ e abbiamo

$$\int_{\Omega} h d\mu = \int_{E_{\geq}} f d\mu + \int_{E_{<}} g d\mu > \int_{E_{\geq}} g d\mu + \int_{E_{<}} f d\mu = \int_{\Omega} f d\mu$$

che è assurdo per la definizione di f . Quindi $\mu(E_{<}) = 0$

□

Lemma 1.55. Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile e sia μ una misura σ -finita. Allora esiste una famiglia $\{\Omega_n\}$ tale che

$$\Omega_n \in \mathcal{M}, \quad \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \Omega_n = \Omega, \quad \mu(\Omega_n) < +\infty \quad \forall n \in \mathbb{N}, \quad \text{gli } \Omega_n \text{ sono } \textbf{disgiunti}$$

Dimostrazione. Se abbiamo una misura σ -finita μ allora sicuramente esiste una famiglia $\{E_n\}$ che soddisfa le prime tre richieste. Se ora costruiamo

$$\Omega_n = E_n \setminus \bigcup_{i=1}^{n-1} E_i \quad \forall n \in \mathbb{N}$$

otteniamo una famiglia disgiunta che soddisfa tutte le richieste. \square

Lemma 1.56. Sia Ω, \mathcal{M} uno spazio misurabile, sia μ una misura σ -finita su di esso e sia φ una misura. Esisterà una collezione Ω_n che soddisfa la tesi del lemma 1.55. Allora chiamiamo $\mu_n = \mu|_{\mathcal{M}_n}$ con $\mathcal{M}_n = 2^{\Omega_n} \cap \mathcal{M}$ e similmente $\varphi_n = \varphi|_{\mathcal{M}_n}$. Sia ora $\{\Theta_n\}$ una collezione di insiemi che ha le stesse proprietà del lemma 1.55 e definiamo come prima $\hat{\mu}_n = \mu|_{\hat{\mathcal{M}}_n}$ e $\hat{\varphi}_n = \varphi|_{\hat{\mathcal{M}}_n}$.

Se definiamo ora

$$f = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{\Omega_n} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \mu_n} \quad e \quad \hat{f} = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{\Theta_n} \frac{\partial \hat{\varphi}_n}{\partial \hat{\mu}_n}$$

allora $f = \hat{f}$ μ -q.o.

Dimostrazione. Vogliamo dimostrare che $f = \hat{f}$ in $\Omega_i \cap \hat{\Omega}_j$. Questo è vero perché essendo in Ω_i , per il lemma 1.54 abbiamo che $f \geq \hat{f}$ μ_i -q.o. e essendo in $\hat{\Omega}_j$ abbiamo che $\hat{f} \geq f$ $\hat{\mu}_j$ -q.o. ma poiché entrambe le misure sono proiezioni di μ , allora $f = \hat{f}$ μ -q.o. in $\Omega_i \cap \hat{\Omega}_j$. Poiché l'unione di tutti questi insiemi è Ω , segue la tesi. \square

Definizione 1.21: Derivata di Radon-Nikodym con μ σ -finita

Sia Ω, \mathcal{M} lo spazio misurabile del lemma 1.56. Allora f come definita sopra è la **derivata di Radon-Nikodym** di φ misura finita rispetto a μ misura σ -finita, ossia

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{\Omega_n} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \mu_n}$$

e poiché le μ_n sono misure finite, ogni termine della sommatoria segue la definizione 1.20

Procedendo con la generalizzazione, vogliamo ora definire la derivata di una generica misura relativa φ rispetto a una misura σ -finita

Definizione 1.22: Derivata di Radon-Nikodym

Sia Ω, \mathcal{M} uno spazio misurabile, sia μ una misura σ -finita e sia φ una misura relativa. Allora $\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$ e definiamo la **derivata di Radon-Nikodym**

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} = \frac{\partial \varphi^+}{\partial \mu} - \frac{\partial \varphi^-}{\partial \mu}$$

e poiché φ^+, φ^- sono misure finite, seguono la definizione 1.21

Teorema 1.57: Teorema di Radon-Nykym meno bello

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile. Siano μ e φ rispettivamente una misura σ -finita e una misura relativa su esso. Sia φ μ -singolare. Allora

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} = 0 \quad \mu - q.o.$$

Dimostrazione. Supponiamo μ, φ misure finite e sia φ μ -singolare, ossia esiste una partizione (A, B) di Ω dove $\mu(A) = 0$ e $\varphi(B) = 0$. Consideriamo ora $\mathcal{M} \ni E \subseteq B$, allora

$$0 \leq \int_E \underbrace{\frac{\partial \varphi}{\partial \mu}}_{\in \mathcal{F} \Rightarrow \geq 0} d\mu \stackrel{\in \mathcal{F}}{\leq} \varphi(E) \leq \varphi(B) = 0$$

e quindi, essendo $\frac{\partial \varphi}{\partial \mu}$ positiva, vale 0 μ -q.o. su B , ed essendo A μ -trascurabile segue la tesi.

Supponiamo ora che μ sia σ -finita, φ misura finita e μ -singolare. Sia (A, B) la partizione di Ω tale che $\mu(A) = 0$ e $\varphi(B) = 0$. Sia $\{\Omega_n\}$ la partizione di Ω tale che $\mu(\Omega_n) < \infty$ per ogni $n \in \mathbb{N}$. Ora per ogni $n \in \mathbb{N}$ consideriamo $(A_n, B_n) = (\Omega_n \cap A, \Omega_n \cap B)$. Allora ogni (A_n, B_n) è una partizione di Ω_n e $\mu_n(A_n) \leq \mu(A) = 0$ e $\varphi_n(B_n) \leq \varphi(B) = 0$ per cui ogni φ_n e μ_n -singolare e per il punto precedente

$$\frac{\partial \varphi_n}{\partial \mu_n} = 0 \quad \mu_n\text{-q.o. } \forall n \in \mathbb{N} \implies \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} = \sum_{n=1}^{\infty} \chi_{\Omega_n} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \mu_n} = 0 \quad \mu\text{-q.o.}$$

Infine andiamo al caso generale, con μ misura σ -finita e φ misura relativa μ -singolare. Allora per la proposizione 1.52 abbiamo che φ^+ e φ^- sono μ -singolari e quindi per il caso precedente

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} = \frac{\partial \varphi^+}{\partial \mu} - \frac{\partial \varphi^-}{\partial \mu} = 0 - 0 = 0 \quad \mu\text{-q.o.}$$

□

Teorema 1.58: Teorema di Radon-Nikodym più bello

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile. Siano μ e φ rispettivamente una misura σ -finita e una misura relativa. Sia φ μ -assolutamente continua. Allora

$$\forall E \in \mathcal{M} \quad \int_E \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu = \varphi(E)$$

Dimostrazione per φ, μ misure finite. Supponiamo per assurdo che esista un insieme $E_0 \in \mathcal{M}$ tale che $\int_{E_0} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu \neq \varphi(E_0)$, segue dalla definizione 1.20 che necessariamente $\int_{E_0} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu < \varphi(E_0)$. Ne segue che $\varphi(E_0) > 0$ e per μ -a.c. anche $\mu(E_0) > 0$.

Siccome μ è finita

$$\exists \varepsilon > 0 \quad \text{t.c.} \quad \int_{E_0} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu + \varepsilon \mu(E_0) = \int_{E_0} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} + \varepsilon \right) d\mu < \varphi(E_0) \quad (1.4)$$

Definiamo ora la misura $\tilde{\varphi}$ come

$$\tilde{\varphi}(E) = \varphi(E) - \int_E \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} + \varepsilon \right) d\mu \quad \forall E \in \mathcal{M}$$

che essendo la differenza di due misure finite è una misura relativa. Sia quindi (A, B) una decomposizione di Hahn rispetto a $\tilde{\varphi}$. Abbiamo ora che $\tilde{\varphi}(E_0) > 0$ per (1) e $\tilde{\varphi}(A) \geq \tilde{\varphi}(A \cap E_0) \geq \tilde{\varphi}(A \cap E_0) + \tilde{\varphi}(B \cap E_0) = \tilde{\varphi}(E_0) > 0$, quindi

$$\varphi(A) > \int_A \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} + \varepsilon \right) d\mu \geq 0 \stackrel{\mu\text{-a.c.}}{\implies} \mu(A) > 0$$

Ora sia $f := \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} + \varepsilon \chi_A$. Allora $f \geq 0$, in quanto somma di funzioni non negative; $f \in L^1$ in quanto somma di funzioni L^1 e, $\forall E \in \mathcal{M}$

$$\int_E f d\mu = \int_{E \cap A} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} + \varepsilon \right) d\mu + \int_{E \cap B} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu \leq \varphi(E \cap A) + \varphi(E \cap B) = \varphi(E)$$

quindi abbiamo che $f \in \mathcal{F}$, ma

$$\int_{\Omega} f d\mu = \int_A \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \right) d\mu + \int_B \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu \stackrel{\varepsilon > 0, \mu(A) > 0}{>} \int_A \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu + \int_B \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu = \int_{\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu$$

che è assurdo perché sappiamo per definizione di $\frac{\partial \varphi}{\partial \mu}$ che $\int_{\Omega} \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu$ è il sup di tutti gli integrali di funzioni in \mathcal{F} . \square

Dimostrazione per μ σ -finita e φ misura finita. Sia $\{\Omega_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ una partizione di Ω tale che $\mu(\Omega_n) < +\infty$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ e quindi le restrizioni $\mu_n, \varphi_n := \mu|_{\Omega_n}, \varphi|_{\Omega_n}$ sono misure finite e φ_n è μ_n -a.c. per ogni $n \in \mathbb{N}$. Allora $\forall e \in \mathcal{M}$,

$$\begin{aligned} \int_E \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu &= \int_E \left(\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \mu_n} \chi_{\Omega_n} \right) d\mu = \sum_{n=1}^{\infty} \int_{E \cap \Omega_n} \frac{\partial \varphi_n}{\partial \mu_n} d\mu \stackrel{\text{misure finite}}{=} \sum_{n=1}^{\infty} \varphi_n(E \cap \Omega_n) = \\ &= \varphi(E) \end{aligned}$$

\square

Dimostrazione generale: μ σ -finita e φ misura relativa. Scomponendo $\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$ otteniamo che $\forall E \in \mathcal{M}$

$$\begin{aligned} \int_E \frac{\partial \varphi}{\partial \mu} d\mu &\stackrel{\text{def}}{=} \int_E \frac{\partial \varphi^+}{\partial \mu} - \frac{\partial \varphi^-}{\partial \mu} d\mu = \int_E \frac{\partial \varphi^+}{\partial \mu} d\mu - \int_E \frac{\partial \varphi^-}{\partial \mu} d\mu \stackrel{\varphi^{\pm}}{=} \varphi^+(E) - \varphi^-(E) = \\ &= \varphi(E) \end{aligned}$$

infatti φ è μ -a.c. e quindi φ^+ e φ^- sono μ -a.c. \square

Teorema 1.59: Teorema di Lebesgue

Sia (Ω, \mathcal{M}) uno spazio misurabile, con μ misura e φ misura relativa. Allora esiste unica una misura φ_a μ -assolutamente continua e esiste unica una misura φ_s μ -singolare tali che

$$\varphi = \varphi_a + \varphi_s$$

Esistenza, φ misura finita. Sia $K = \sup\{\varphi(N) : N \in \mathcal{M}, \mu(N) = 0\}$. Se $K = 0$ allora $\varphi = \varphi_a$ è μ -a.c. e $\varphi_s = 0$. Assumiamo quindi $K > 0$. Esiste quindi una successione E_n di insiemi misurabili tali che $\lim_{n \rightarrow \infty} \varphi(E_n) = K$ e $\mu(E_n) = 0$ per ogni $n \in \mathbb{N}$. Sia ora $E = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n$. Allora $\mu(E) = 0 \implies \varphi(E) \leq K$ e $\varphi(E) \geq \varphi(E_n)$ per ogni n , quindi per l'arbitrarietà di n abbiamo che $\varphi(E) \geq K$. Ne consegue proprio $\varphi(E) = K$.

Sia ora

$$\begin{aligned}\varphi_a(E) &:= \varphi(A \setminus E) & \forall A \in \mathcal{M} \\ \varphi_s(E) &:= \varphi(A \cap E) & \forall A \in \mathcal{M}\end{aligned}$$

Allora per ogni A misurabile abbiamo

- $\varphi(A) = \varphi(A \cap E) + \varphi(A \setminus E) = (\varphi_s + \varphi_a)(A)$ ok.
- φ_a è μ -a.c. infatti se $N \in \mathcal{M}$ è tale che $\mu(N) = 0$ e se fosse vero che $\varphi_a(N) = \varphi(N \setminus E) > 0$ allora avremmo $\varphi(E \cup N) = \varphi(N \setminus E) + \varphi(E) > \varphi(E)$ che è assurdo
- φ_s è μ -singolare infatti presa la decomposizione $(E, \Omega \setminus E)$ abbiamo che $\mu(E) = 0$ e $\varphi_s(\Omega \setminus E) = \varphi((\Omega - E) \cap E) = \varphi(\emptyset) = 0$

□

Esistenza, φ misura relativa. Sia $\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$ differenza di misure finite. Allora abbiamo

$$\begin{cases} \varphi^+ = \varphi_a^+ + \varphi_s^+ \\ \varphi^- = \varphi_a^- + \varphi_s^- \end{cases} \implies \varphi = \varphi^+ - \varphi^- = \underbrace{(\varphi_a^+ - \varphi_a^-)}_{:= \varphi_a} + \underbrace{(\varphi_s^+ - \varphi_s^-)}_{:= \varphi_s}$$

dove φ_a e φ_s sono rispettivamente μ -a.c. e μ -singolare perché differenze di misure μ -a.c. e μ -singolari. □

Unicità. Sia $\varphi = \varphi_s + \varphi_a = \varphi'_s + \varphi'_a$, ne consegue che $\varphi_s - \varphi'_s = \varphi'_a - \varphi_a =: \varphi_0$ e quindi φ_0 è sia μ -a.c. che μ -singolare, quindi $\varphi_0 = 0$ e di conseguenza $\varphi_s = \varphi'_s$ e $\varphi_a = \varphi'_a$. □

1.12 Misure di Lebesgue-Stieltjes

Sia $F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ una funzione monotona non decrescente e continua da sinistra, cioè

$$\forall x_0 \in \mathbb{R} \quad \lim_{x \rightarrow x_0^-} F(x) = F(x_0)$$

Allora F ha al più un'infinità numerabile di punti di discontinuità, poiché è monotona. Infatti una funzione monotona ha solo tipi di discontinuità di tipo salto, e si riescono a “contare”, infatti ogni intervallino corrispondente a un salto contiene almeno un numero razionale e quindi gli si può associare un numero razionale ivi contenuto.

Ora consideriamo la seguente famiglia di sottoinsiemi di \mathbb{R}

$$\mathcal{R} = \{[a, b); a, b \in \mathbb{R}, a < b\} \cup \{\emptyset\}$$

su tale famiglia definiamo una misura elementare

$$m_F([a, b)) = F(b) - F(a) \quad m_F(\emptyset) = 0$$

Notare che \mathcal{R} non è nemmeno un'algebra lol. Tuttavia vale un risultatino

Proposizione 1.60. Se $[a, b) = \bigcup_{n=1}^{\infty} [a_n, b_n)$ dove $[a_i, b_i) \cap [a_j, b_j) = \emptyset$ per ogni $i \neq j$; allora

$$m_F([a, b)) = \sum_{n=1}^{\infty} m_F([a_n, b_n))$$

Dimostrazione.

\leq La ridotta $\sum_{n=1}^k m_F([a_n, b_n])$ della serie dà la somma delle lunghezze $F(b_n) - F(a_n) \geq 0$ per $n = 1, \dots, k$ e danno la variazione di F sugli intervallini. Allora poiché F è monotona,

$$\sum_{n=1}^k m_F([a_n, b_n]) \leq m_F([a, b]) \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

e quindi la serie converge e la sua somma è minore o eguale di $m_F([a, b])$

\geq Sia $\varepsilon > 0$. Allora esiste $\bar{b} < b$ tale che $F(\bar{b}) \geq F(b) - \varepsilon$. Per ogni $n \in \mathbb{N}$ esistono $\bar{a}_n < a_n$ tali che

$$F(\bar{a}_n) \geq F(a_n) - \frac{\varepsilon}{2^n}$$

osserviamo che $[a, \bar{b}] \subseteq [a, b]$ e invece $[a_n, b_n] \subseteq (\bar{a}_n, b_n)$ per ogni $n \in \mathbb{N}$. Allora

$$[a, \bar{b}] \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} (\bar{a}_n, b_n)$$

poiché $[a, \bar{b}]$ è un compatto, ne possiamo estrarre un sottoricoprimento finito, quindi esistono n_1, \dots, n_k tali che

$$[a, \bar{b}] \subseteq \bigcup_{i=1}^k (\bar{a}_{n_i}, b_{n_i})$$

e quindi abbiamo

$$F(\bar{b}) - F(a) \leq \sum_{n=1}^k (F(b_n) - F(\bar{a}_n))$$

e quindi

$$\begin{aligned} F(b) - \varepsilon - F(a) &\leq F(\bar{b}) - F(a) \leq \\ &\leq \sum_{n=1}^k (F(b_n) - F(\bar{a}_n)) \leq \sum_{n=1}^k (F(b_n) - F(a_n)) + \sum_{n=1}^k \frac{\varepsilon}{2^n} \end{aligned}$$

da cui riarrangiando i termini segue la tesi

□

Possiamo ora definire una misura esterna $\mu_F^* : 2^{\mathbb{R}} \rightarrow [0, +\infty]$ definita come

$$\mu_F^*(E) = \inf \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} m_F(I_n) : E \subseteq \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n ; I_n \in \mathcal{R} \forall n \right\}$$

Tale insieme non è mai vuoto, infatti $\mathbb{R} \subseteq \bigcup_{k \in \mathbb{Z}} [k, k+1)$ ricopre ogni insieme $E \subseteq \mathbb{R}$.

Proposizione 1.61. μ_F^* è una misura esterna.

Dimostrazione. – $\mu_F^*(\emptyset) = 0$ in quanto posso ricoprire l'insieme vuoto con un'unione numerabile di insiemi vuoti che hanno misura nulla

– Se $A \subseteq B$ allora ogni ricoprimento di B è anche ricoprimento di A , per cui $\mu_F^*(A) \leq \mu_F^*(B)$

- Sia $E \subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} E_n$ allora $\mu_F^*(E) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu_F^*(E_n)$. Infatti (dimostrandolo sono nel caso in cui la serie converge, perché altrimenti è ovvio), esiste $\bigcup_{k \in \mathbb{N}} I_{n,k}$, con $I_{n,k} \in \mathcal{R}$ e $\sum_{k=1}^{\infty} m_F(I_{n,k}) \leq \mu_F^*(E_n) + \frac{\varepsilon}{2^n}$. Tale unione ricopre tutto E e allora necessariamente

$$\mu_F^*(E) \leq \sum_{k,n \in \mathbb{N}} m_F(I_{n,k}) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} m_F(I_{n,k}) \leq \sum_{n=1}^{\infty} \mu_F^*(E_n) + \varepsilon$$

da cui $\mu_F^*(E) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mu_F^*(E_n)$ per l'arbitrarietà di ε

□

Ora a partire da questa misura esterna passiamo a considerare insiemi misurabili e misura di questi. Chiaramente misurabili e misura associata dipendono da F .

Teorema 1.62: Teorema di Caratheodory

Se μ^* è una misura esterna su un insieme Ω , allora la famiglia

$$\mathcal{M} = \{A \subseteq \Omega : \forall E \subseteq \Omega, \mu^*(E) = \mu^*(E \cap A) + \mu^*(E \setminus A)\}$$

è una σ -algebra e la restrizione di μ^* a \mathcal{M} è una misura. In particolare $(\Omega, \mathcal{M}, \mu^*|_{\mathcal{M}})$ è uno spazio di misura.

Applichiamo quindi il teorema di Caratheodory alla misura esterna μ_F^* e otteniamo che esiste una σ -algebra \mathcal{M}_F . Quindi in particolare la famiglia dei borelliani $\mathcal{B}(\mathbb{R}) \subseteq \mathcal{M}_F$. Inoltre la misura $\mu_F = \mu_F^*|_{\mathcal{M}_F}$ è un'estensione della misura elementare m_F . Perdi più $\mu_F(x_0) = 0$ se e solo se F è continua in $x_0 \in \mathbb{R}$; infatti $\{x_0\} = \bigcap_{n \in \mathbb{N}} [x_0, x_0 + \frac{1}{n})$ che è una successione decrescente di insiemi tutti di misura finita $F(x_0 + \frac{1}{n}) - F(x_0)$ e allora la loro intersezione è

$$\mu_F(x_0) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu_F\left(\left[x_0, x_0 + \frac{1}{n}\right)\right) = F\left(x_0 + \frac{1}{n}\right) - F(x_0) = \lim_{x \rightarrow x_0^+} F(x) - F(x_0)$$

che è nulla se e solo se F è continua anche da destra in x_0 .

Se prendo $F(x)$ costante allora ottengo la misura nulla. Se invece considero $F(x) = x$ ottengo la misura 1-dimensionale di Lebesgue e i misurabili di Lebesgue. Se prendo $F(x) = \chi_{(0, \infty)}$ funzione Heaviside allora μ_F coincide con la misura di Dirac centrata in 0 e $\mathcal{M}_F = 2^{\mathbb{R}}$.

Le misure che così costruiamo, ossia le misure di Lebesgue-Stieltjes, sono misure σ -finite. In particolare μ_F è finita se F è limitata, perché $\mu_F(\mathbb{R}) = \lim_{x \rightarrow \infty} F(x) - \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x)$ e se F è limitata allora i due limiti esistono e sono finiti.

2 Analisi Funzionale

In tutti gli spazi vettoriali considerati in questa sezione, il campo su cui opereremo sarà $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ o \mathbb{C} .

2.1 Spazi normati

Definizione 2.1: Spazio normato

Uno spazio normato è uno spazio vettoriale V su un campo \mathbb{K} dotato di una norma $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$ tale che

1. (definita positività) $\|v\| = 0 \iff v = 0$
2. (omogeneità) $\|\lambda v\| = |\lambda| \|v\|$ per ogni $v \in V$ e $\lambda \in \mathbb{K}$
3. (disuguaglianza triangolare) $\|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$ per ogni $v, w \in V$

Esempio 2.1. $V = \mathbb{R}$, con norma $|\cdot|$

Esempio 2.2. $V = \mathbb{C}$, con norma $|\cdot| : x \mapsto x\bar{x}$

Esempio 2.3. $V = \mathbb{R}^N$ o \mathbb{C}^N con la norma euclidea, ossia $\|x\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N |x_i|^2}$

Esempio 2.4. $V = C^0[-1, 1]$ spazio vettoriale reale delle funzioni $f : [-1, 1] \rightarrow \mathbb{R}$ continue in ogni punto. La norma è data da $\|f\|_\infty = \max f([-1, 1])$. La norma $\|\cdot\|_\infty$ è detta **norma uniforme** o norma infinito, e non è l'unica norma. Ad esempio possiamo definire

$$\|f\|_1 = \int_{-1}^1 |f(x)| dx$$

che è una norma perché è sempre positiva, vale 0 se e solo se $f = 0$, nel caso di $f \in C^0$, per linearità dell'integrale segue l'omogeneità e per la disuguaglianza triangolare del modulo e la linearità dell'integrale abbiamo che vale anche la disuguaglianza triangolare.

Esercizio 2.1

Verificare che le precedenti norme sono effettivamente norme.

Ogni spazio normato è uno spazio metrico, dove la distanza tra due punti è data dalla norma della loro differenza. Un problema interessante è valutare se diverse norme danno su uno spazio metrico la stessa topologia, ossia caratterizzare le norme equivalenti.

Ricordiamo che in uno spazio normato $(V, \|\cdot\|)$ gli aperti sono così caratterizzati: un insieme $A \subseteq V$ è aperto se e solo se per ogni $x \in A$ esiste un $\varepsilon > 0$ tale che $B_\varepsilon(x) \subseteq A$, dove $B_\varepsilon(x) = \{y \in V : \|y - x\| < \varepsilon\}$. Inoltre $C \subseteq V$ è chiuso se $V \setminus C$ è aperto. $\{x_n\} \subseteq V$ è convergente se esiste $x \in V$ tale che $\lim_{n \rightarrow \infty} \|x_n - x\| = 0$. C è chiuso se e solo se \forall successione convergente contenuta in C , questa ha limite in C .

Le funzioni continue tra spazi normati $(V, \|\cdot\|_V)$ e $(W, \|\cdot\|_W)$ sono così caratterizzate: $f : V \rightarrow W$ è continua in $x_0 \in V$ se

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 \quad \text{tale che} \quad \|x - x_0\|_V < \delta \implies \|f(x) - f(x_0)\|_W < \varepsilon$$

Allora $f : V \rightarrow W$ è continua se è continua in ogni punto di V . Questo è equivalente alla definizione topologica, dove f è continua se per ogni aperto $A \subseteq W$ allora la controimmagine $f^{-1}(A) = \{x \in V : f(x) \in A\}$ è un aperto di V . Ancora questa

è equivalente a dire che per ogni successione $\{v_n\}$ convergente in V , allora $f(v_n)$ converge in W a $f(\lim_{n \rightarrow \infty} v_n)$

Proposizione 2.1. *In uno spazio normato $(V, \|\cdot\|)$, la funzione $x \mapsto \|x\|$ è una funzione continua*

Dimostrazione. Sia $x_0 \in V$ e $\varepsilon > 0$. Allora

$$\|x - x_0\| < \delta \implies \left| \|x\| - \|x_0\| \right| \leq \|x - x_0\| < \delta$$

scegliendo $\delta = \varepsilon$ abbiamo la tesi. \square

In uno spazio vettoriale V si possono considerare più norme, vediamo alcuni esempi di norme diverse su \mathbb{R}^N e \mathbb{C}^N :

$$\begin{aligned} \|x\|_1 &= \sum_{i=1}^N |x_i| & \|x\|_\infty &= \max_{1 \leq i \leq N} |x_i| \\ \|x\|_p &= \left(\sum_{i=1}^N |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} & p &\in [1, +\infty) \end{aligned}$$

Come sono fatte le palle? Vedasi figura 4 Data una coppia (p, q) e fissata la palla

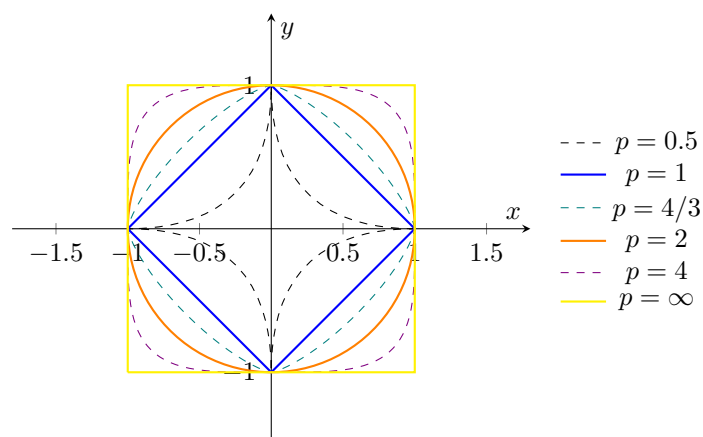


Figura 4: Palle $\|x\|_p < 1$ in \mathbb{R}^2

$\|x\|_p < 1$ esistono due palle $\|x\|_q < r$ e $\|x\|_q < R$ con R e r positivi, tali che la prima è contenuta in $\|x\|_p < 1$ e l'altra contiene $\|x\|_p < 1$.

Notare che si potrebbe in teoria prendere anche $p < 1$ ma non è più una norma perché non c'è la disuguaglianza triangolare.

Struttura topologica di uno spazio normato Uno spazio normato $(V, \|\cdot\|)$ è in particolare uno spazio metrico in cui la distanza d è quella indotta dalla norma, ossia $d(x, y) = \|x - y\|$. Questa è effettivamente una distanza, ad esempio per la disuguaglianza triangolare abbiamo che $d(x, y) = \|x - y\| = \|x - z + z - y\| \leq \|x - z\| + \|z - y\| = d(x, z) + d(z, y)$ per ogni $x, y, z \in V$. Possiamo quindi usare la struttura metrica per definire la topologia di V , ossia la topologia che ha come base le palle aperte rispetto alla distanza, ossia

$$\mathcal{B} = \{B_\varepsilon(x) : x \in V, \varepsilon > 0\}$$

Poiché gli aperti di una topologia che ha base \mathcal{B} sono così caratterizzati:

$$A \text{ aperto} \iff \forall x \in A \quad \exists B \in \mathcal{B} : x \in B \subseteq A$$

Infatti. Sia A aperto, allora $A = \bigcup_{i \in I} B_i$ con $B_i \in \mathcal{B}$, e allora per ogni $x \in A$, deve essere che $x \in B_i$ per qualche i . Viceversa per ogni $x \in A$, sia B_x un aperto della base tale che $x \in B_x \subseteq A$, allora evidentemente $A = \bigcup_{x \in A} B_x$ è aperto \square

ne consegue che gli aperti di uno spazio normato sono

$$A \subseteq V \text{ aperto} \iff \forall x \in A \quad \exists \delta > 0 : B_\delta(x) = \{y \in V : \|x - y\| < \delta\} \subseteq A$$

Una successione convergente in $(V, \|\cdot\|)$ è una successione di punti $\{x_n\} \subseteq V$ tale che esiste $x \in V$ tale che $\|x_n - x\| \rightarrow 0$ per $n \rightarrow \infty$.

Un chiuso $C \subseteq V$ è tale se $V \setminus C$ è aperto. Nel caso degli spazi normati, i chiusi sono così caratterizzati:

$$C \subseteq V \text{ chiuso} \iff \forall \{x_n\} \subseteq C \text{ convergente in } V \text{ si ha che } \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \in C$$

Un **sottospazio** W di un \mathbb{K} -spazio vettoriale V è un sottoinsieme di V che è un \mathbb{K} -spazio vettoriale rispetto alle operazioni di V . Ossia è tale che $\forall x, y \in W$ e $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{K}$ allora $\alpha x + \beta y \in W$. Inoltre un sottospazio vettoriale di uno spazio normato è a sua volta uno spazio normato, con la stessa norma ristretta al sottospazio.

Esempio 2.5. Sia $V = \mathbb{R}^2$ con la norma euclidea e sia $W = \{(x, 0) : x \in \mathbb{R}\}$ il sottospazio delle ascisse. Allora W è uno spazio normato con la norma euclidea ristretta a W , ossia $\|x\| = |x|$. Anche il sottospazio $\{0\}$ costituito dal solo vettore nullo è un sottospazio di V .

Altri sottospazi di V sono ad esempio tutte le rette del tipo $\{\alpha x + \beta y = 0\}$ con α e β fissati

Possiamo chiederci quali di questi sottospazi siano chiusi. Allora chiaramente $\{0\}$ è chiuso (in qualsiasi spazio normato), in quanto controimmagine attraverso la funzione distanza da 0 del chiuso $\{0\} \subseteq \mathbb{R}$ (oppure perché normato \implies metrico $\implies T_1$). I sottospazi di dimensione 1 sono anche chiusi, in quanto controimmagine di $\{0\}$ attraverso la funzione continua $(x, y) \mapsto \alpha x + \beta y$.

Esempio 2.6. Sia $V = C^0[0, 1]$ con la norma $\|f\|_\infty = \max f([0, 1])$. Prendiamo come sottospazio $X = \{\text{polinomi di qualunque grado su } [0, 1]\}$. Allora X è un sottospazio vettoriale in quanto $X \subseteq V$ e se $f, g \in X$ allora $f + g \in X$ e $\alpha f \in X$.

È chiuso X in V ? No. Infatti possiamo costruire successioni di polinomi che convergano in $(V, \|\cdot\|_\infty)$ (convergenza uniforme) ma il cui limite non è in X . Ad esempio consideriamo

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

che nell'intervallo $[0, 1]$ le ridotte tendono alla funzione e^x uniformemente in $[0, 1]$, ma il limite e^x non è un polinomio.

Definizione 2.2: Norme equivalenti

Date $\|\cdot\|_a$ e $\|\cdot\|_b$ norme in V , queste si dicono **equivalenti** se esistono due costanti $C_1, C_2 > 0$ tali che

$$C_1 \|v\|_a \leq \|v\|_b \leq C_2 \|v\|_a \quad \forall v \in V$$

Osservazione. La precedente è una relazione di equivalenza, infatti

- *riflessiva* $\|v\|_a = \|v\|_a$

- *simmetrica* se $C_1\|v\|_a \leq \|v\|_b \leq C_2\|v\|_a$ allora $\frac{1}{C_2}\|v\|_b \leq \|v\|_a \leq \frac{1}{C_1}\|v\|_b$
- *transitiva* se $C_1\|v\|_a \leq \|v\|_b \leq C_2\|v\|_a$ e $C_3\|v\|_b \leq \|v\|_c \leq C_4\|v\|_b$ allora $C_1C_3\|v\|_a \leq \|v\|_c \leq C_2C_4\|v\|_a$

Proposizione 2.2. *Due norme equivalenti inducono la stessa topologia sullo spazio V : gli aperti rispetto a una norma sono aperti anche rispetto all'altra, e viceversa.*

Proposizione 2.3. *In uno spazio vettoriale V di dimensione finita tutte le norme sono tra loro equivalenti*

Dimostrazione. Sia V di dimensione N . Fissiamo una base $\{e_1, \dots, e_N\}$. Ogni elemento $v \in V$ si può scrivere come $v = \sum_{i=1}^N \alpha_i e_i$ per opportuni scalari α_i . Sia $\|\cdot\|_1$ la norma 1, ossia $\|v\|_1 = \sum_{i=1}^N |\alpha_i|$. Allora questa è una norma perché è sempre positiva, vale 0 solo se tutti gli $\alpha_i = 0$, ossia $v = 0$, vale l'omogeneità perché il modulo è omogeneo e vale la disuguaglianza triangolare perché vale per il modulo.

Sia ora $\|\cdot\|$ una norma qualunque in V .

$$\|v\| = \left\| \sum_{i=1}^N \alpha_i e_i \right\| \leq \sum_{i=1}^N |\alpha_i| \|e_i\| \leq M \sum_{i=1}^N |\alpha_i| = M \|v\|_1$$

per $M = \max_{1 \leq i \leq N} \|e_i\|$. Ora dobbiamo provare che

$$\exists m > 0 \quad \forall x \in V \text{ tale che } \|x\| \geq m \|x\|_1$$

e la dimostriamo per assurdo, ossia diciamo che

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \exists x_k \in V \text{ tale che } \|x_k\|_1 > k \|x_k\|$$

Notiamo che $\|x_k\|_1 > 0$ per ogni k , quindi possiamo definire per ogni k

$$u_k = \frac{x_k}{\|x_k\|_1} \implies \|u_k\|_1 = 1 > k \|u_k\|$$

Rappresentiamo ora u_k come

$$u_k = \sum_{i=1}^N \alpha_{i,k} e_i$$

e quindi abbiamo N successioni $\{\alpha_{i,k}\}_{k \in \mathbb{N}}$ reali o complesse tali che $\sum_{i=1}^N |\alpha_{i,k}| = 1$ e quindi tutte le successioni sono limitate. Allora per compattezza ne esiste un'estratta $\{k_n\}$ tale che $\alpha_{i,k_n} \rightarrow \alpha_i$ in \mathbb{R} o \mathbb{C} . Abbiamo ora la successione u_{k_n} che quindi converge a $u = \sum_{i=1}^N \alpha_i e_i$ rispetto a entrambe le norme, abbiamo che

$$\|u\| \leq \|u - u_{k_n}\| + \|u_{k_n}\| < \|u - u_{k_n}\| + \frac{1}{k_n} \rightarrow 0$$

per cui $\|u\| = 0$ e quindi $u = 0$, ma d'altra parte

$$|\|u\|_1 - 1| = |\|u\|_1 - \|u_{k_n}\|_1| \leq \|u - u_{k_n}\|_1 = \sum_{i=1}^N |\alpha_i - \alpha_{i,k_n}| \rightarrow 0$$

ma allora $\|u\|_1 = 1$ che è una contraddizione. \square

Esempio 2.7 (Norme non equivalenti). Sia $V = C^0[-1, 1]$ con le norme $\|f\|_1 = \int_{-1}^1 |f(x)| dx$ e $\|f\|_\infty = \max_{x \in [-1, 1]} |f(x)|$. Queste due norme non sono equivalenti,

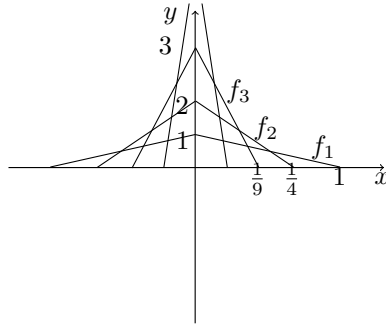


Figura 5: triangoli

infatti non è vero che esiste $C > 0$ tale che $\|f\|_\infty \leq C\|f\|_1$ per ogni $f \in V$. In particolare vogliamo mostrare che

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \exists f_k \in V : \|f_k\|_\infty > k\|f_k\|_1$$

Se prendiamo funzioni f_k come in figura 5 abbiamo che il massimo di f_k è k e l'integrale è $\frac{1}{2} \cdot \frac{2}{k^2} \cdot k = \frac{1}{k}$. Allora abbiamo che

$$\frac{\|f_k\|_\infty}{\|f_k\|_1} = \frac{k}{\frac{1}{k}} = k^2 > k \text{ per ogni } k > 1$$

Definizione 2.3: Spazio di Banach

Uno spazio normato $(V, \|\cdot\|)$ si dice **di Banach** se è completo rispetto alla metrica indotta dalla norma

Esempio 2.8. Gli spazi \mathbb{R}^N e \mathbb{C}^N sono spazi di Banach.

Esercizio 2.2

Mostrare che $C^0[-1, 1]$ con la norma $\|\cdot\|_\infty$ è uno spazio di Banach

Esempio 2.9. Su $V = C^0[-1, 1]$, la norma $\|\cdot\|_1$ non induce uno spazio di Banach. Dobbiamo trovare una successione di Cauchy che non converge in V , quindi ad esempio trovare una funzione che converga a una funzione non continua. Prendiamo

$$f_n(x) = \frac{2}{\pi} \arctan(nx) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \text{sign} x \text{ q.o.}$$

allora f_n è una successione di Cauchy, ossia

$$I_{n,m} := \int_{-1}^1 |f_n - f_m| = \int_{-1}^1 \left| \frac{2}{\pi} \arctan(nx) - \frac{2}{\pi} \arctan(mx) \right| dx \rightarrow 0 \text{ per } n, m \rightarrow \infty$$

infatti

$$\begin{aligned} I_{n,m} &= \int_{-1}^1 \left| \frac{2}{\pi} \arctan(nx) - \text{sign} x + \text{sign} x - \frac{2}{\pi} \arctan(mx) \right| \leq \\ &\leq \int_{-1}^1 \left| \frac{2}{\pi} \arctan(nx) - \text{sign} x \right| dx + \int_{-1}^1 \left| \text{sign} x - \frac{2}{\pi} \arctan(mx) \right| dx \end{aligned}$$

e vogliamo mostrare che entrambi gli integrali tendono a 0. Prendendo ad esempio il primo

$$\int_{-1}^1 \left| \frac{2}{\pi} \arctan(nx) - \operatorname{sign} x \right| dx = 2 \int_0^1 \left| \frac{2}{\pi} \arctan(nx) - 1 \right| dx \rightarrow 0 \text{ per } n \rightarrow \infty$$

dove per l'ultimo limite possiamo usare sia il teorema della convergenza dominata (1.32) che il teorema della convergenza monotona (1.31). Dunque la successione è di Cauchy, ma non converge ad una funzione in $C^0[-1, 1]$

Esercizio 2.3

Sia V uno spazio vettoriale con due norme $\|\cdot\|$ e $\|\cdot\|'$ e rispetto a $\|\cdot\|$ V è uno spazio di Banach. Mostrare che, se le due norme sono equivalenti, allora V è uno spazio di Banach anche con la norma $\|\cdot\|'$.

Osservazione. Se le norme non sono equivalenti, allora non si può dire nulla

Proposizione 2.4. *Se V è uno spazio normato e $W \subseteq V$ è un sottospazio vettoriale allora W è uno spazio normato con la norma di V ristretta a W . Inoltre*

- Se W ha dimensione finita allora W è necessariamente chiuso.*
- Se V è uno spazio di Banach, allora ogni sottospazio $W \subseteq V$ chiuso risulta esso stesso un Banach rispetto alla norma*

Dimostrazione. È chiaro che se $(V, \|\cdot\|)$ è normato, la stessa norma su W è una norma, infatti chiaramente valgono ancora le tre proprietà della norma, dove semplicemente invece di $\forall x \in V$ avremo $\forall x \in W$ ma questo non cambia nulla. Inoltre

- Sia $\{f_n\} \subseteq W$, con $f_n \rightarrow f$ in $(V, \|\cdot\|)$. Allora $f_n \rightarrow f$ in $(W \cup \{f\}, \|\cdot\|)$. Ma poiché $W \cup \{f\}$ ha dimensione finita, tutte le norme su di esso sono equivalenti, allora allora $f_n \rightarrow f$ anche rispetto ad altre norme. Supponiamo che $\{e_i\}_{i=1, \dots, N}$ sia una base di W e supponiamo per assurdo che $f \notin W$. Allora ogni $f_n = 0 \cdot f + \sum_{i=1}^N \alpha_i^n e_i$ e poiché $f_n \rightarrow f$ in norma 1, allora

$$\|f_n - f\|_1 \rightarrow 0 \iff 0 = \lim_{n \rightarrow \infty} |0 - 1| + \sum_{i=1}^N |\alpha_i^n - 0| \geq 1$$

che è assurdo, quindi $f \in W$, ossia W è chiuso.

- Sia $\{f_n\}$ una successione di Cauchy in W con la norma $\|\cdot\|$. Quindi $f_n \in W$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ e $\|f_n - f_m\| \rightarrow 0$ per $n, m \rightarrow \infty$. Segue quindi che f_n è di Cauchy in $(V, \|\cdot\|)$ e quindi, essendo V completo, esiste $f \in V$ tale che $\|f_n - f\| \rightarrow 0$ per $n \rightarrow \infty$. Dobbiamo mostrare che $f \in W$ ma poiché W è chiuso questo è ovvio.

□

Esempio 2.10 ($W \subseteq V$, W Banach, V no). È possibile che W sia uno spazio di Banach mentre V no. Ad esempio sia $V = C^0[-1, 1]$ con la norma $\|\cdot\|_1$. Sappiamo che non è uno spazio di Banach per l'esempio 2.9. Sia $W = \{f \in V : f(x) = \alpha \in \mathbb{R}\}$ il sottospazio delle funzioni costanti. È un sottospazio perché se $a, b \in W$ allora anche $\alpha a + \beta b$ è una funzione costante. Inoltre W è completo in quanto omeomorfo a \mathbb{R} con la norma euclidea, che è completo.

Esempio 2.11. Prendiamo $V = C^0[-1, 1]$ con la norma $\|\cdot\|_\infty$ che rende V uno spazio di Banach. Consideriamo lo spazio W dei polinomi che non è chiuso in V perché contiene tutti i polinomi di Taylor di e^x ma non la funzione limite e^x . In realtà, W è **denso** in V , ossia

$$\forall f \in V \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists g \in W : \|f - g\|_\infty < \varepsilon$$

oppure

$$\forall f \in V, \quad \exists \{g_n\} \subseteq W \text{ tale che } \lim_{n \rightarrow \infty} \|f - g_n\|_\infty = 0$$

(poiché $W \neq V$ chiaramente se è denso non è chiuso)

Alcuni sottospazi chiusi di V invece sono ad esempio

- i sottospazi di dimensione finita (e.g. polinomi di grado 10)
- $Z = \{f \in C^0[-1, 1] : f(0) = 0\}$ infatti se $f_n \rightarrow f$ in $(V, \|\cdot\|_\infty)$ allora $f_n \rightarrow$ uniformemente e quindi puntualmente e quindi $f(0) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(0) = 0$
- $T = \{f \in C^0[-1, 1] : \int_{-1}^1 f(t) dt = 0\}$ è chiuso infatti se $f_n \rightarrow f$ uniformemente e $\int_{-1}^1 f_n(t) dt = 0 \rightarrow \int_{-1}^1 f(t) dt = 0$ perché c'è convergenza uniforme

2.2 Spazi L^p

Definizione 2.4: Spazio L^p

Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Per $p \in [1, +\infty)$ definiamo lo spazio $L^p(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ come lo spazio delle funzioni misurabili $f : \Omega \rightarrow \mathbb{K}$ tali che

$$\int_{\Omega} |f|^p d\mu < +\infty$$

Se $p = +\infty$ allora $L^{+\infty}(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ è lo spazio delle funzioni misurabili $f : \Omega \rightarrow \mathbb{K}$ e **essenzialmente limitate**, ossia tali che

$$\exists M > 0 \quad \text{tale che} \quad |f(x)| \leq M \quad \forall x \in \Omega \setminus N, \quad \mu(N) = 0$$

ossia che f è limitata μ -q.o.

Nota. Se $p = 1$ allora $|f|$ è integrabile se e solo se f è integrabile, in altre parole $f \in L^1 \iff |f| \in L^1$. Questo è un caso particolare

Nota. Vedremo che, per $1 \leq p \leq p' < +\infty$ si ha che $f \in L^{p'} \implies f \in L^p$. Questo non vale evidentemente per $p' = \infty$. Infatti ad esempio per $f = 1$ su $\Omega = \mathbb{R}^N$ abbiamo che evidentemente f è limitata quindi $f \in L^{+\infty}$, ma $f \notin L^p$ per ogni $p \in [1, +\infty)$

Gli elementi degli spazi L^p non sono funzioni, ma classi di funzioni, equivalenti μ -q.o.

Osservazione. Ogni spazio L^p è uno spazio vettoriale. L'unica condizione che non è ovvia è verificare che se $f, g \in L^p$ allora $f + g \in L^p$. Infatti se $p = +\infty$ allora è ovvio che $f + g$ è limitata μ -q.o. Se $p < +\infty$ allora

$$|f + g|^p \leq (|f| + |g|)^p \leq 2^p \max\{|f|^p, |g|^p\} \leq 2^p(|f|^p + |g|^p)$$

Ne consegue che $f + g \in L^p$, infatti

$$\int_{\Omega} |f + g|^p d\mu \leq 2^p \int_{\Omega} (|f|^p + |g|^p) d\mu < 2^p \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu + \int_{\Omega} |g|^p d\mu \right) < +\infty$$

Proposizione 2.5. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura. Allora per ogni $p \in [1, +\infty]$ lo spazio $L^p(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ è uno spazio normato con norma

$$\|f\|_p = \begin{cases} \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} & \text{se } p \in [1, +\infty) \\ \inf\{M > 0 : |f| \leq M \quad \mu\text{-q.o.}\} & \text{se } p = +\infty \end{cases}$$

Dimostrazione. Dividiamo la dimostrazione nel caso $p < +\infty$ e $p = +\infty$

Caso $p < +\infty$:

- La norma è ben definita perché se $f = g$ q.o. allora $|f|^p = |g|^p$ q.o. e quindi $\int_{\Omega} |f|^p d\mu = \int_{\Omega} |g|^p d\mu$ e di conseguenza $\|f\|_p = \|g\|_p$
- *Definita positività* $\|f\|_p = 0 \iff \int_{\Omega} |f|^p d\mu = 0 \iff |f|^p = 0 \quad \mu\text{-q.o.} \iff |f| = 0 \quad \mu\text{-q.o.} \iff f = 0 \quad \mu\text{-q.o.}$
- *Omogeneità* $\|\lambda f\|_p = \left(\int_{\Omega} |\lambda f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\int_{\Omega} |\lambda|^p |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = |\lambda| \left(\int_{\Omega} |f|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = |\lambda| \|f\|_p$
- *Disuguaglianza triangolare* Difficile da dimostrare, è chiamata disuguaglianza di Minkowski e la dimostreremo più avanti.

Caso $p = +\infty$:

- La norma è ben definita perché se $f = g$ q.o. allora ogniqualvolta M è maggiorante quasi ovunque di f lo è anche di g , e quindi $\|f\|_\infty = \|g\|_\infty$ perché sono l'inf dello stesso insieme. Inoltre in realtà è evidentemente un min.
- *Definita positività* $\|f\|_\infty = 0 \iff \inf\{M > 0 : |f| \leq M \text{ } \mu\text{-q.o.}\} = 0 \iff |f| \leq 0 \text{ } \mu\text{-q.o.} \iff f = 0 \text{ } \mu\text{-q.o.}$
- *Omogeneità* $\|\lambda f\|_\infty = \inf\{M > 0 : |\lambda f| \leq M \text{ } \mu\text{-q.o.}\} = \inf\{|\lambda|M > 0 : |f| \leq M \text{ } \mu\text{-q.o.}\} = |\lambda| \inf\{M > 0 : |f| \leq M \text{ } \mu\text{-q.o.}\} = |\lambda| \|f\|_\infty$
- *Disuguaglianza triangolare* Evidente, infatti ogni costante che maggiori $|f| + |g|$ necessariamente maggiore $|f + g|$ ed è almeno $\|f\|_\infty + \|g\|_\infty$.

□

Proposizione 2.6 (Disuguaglianza di Young). *Sia $1 \leq p \leq \infty$ e p' tale che $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$, con la convenzione che $\frac{1}{\infty} = 0$. Allora per ogni $a, b \in \mathbb{R}_{\geq 0}$ vale che $ab \leq \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{p'}b^{p'}$.*

Dimostrazione. Se $a = 0$ o $b = 0$ allora la disuguaglianza è ovvia. Supponiamo quindi che $a, b > 0$. Osserviamo che il logaritmo è una funzione concava su $\mathbb{R}_{>0}$ e quindi $\ln(tx + (1-t)y) \geq t \ln x + (1-t) \ln y$ per ogni $x, y > 0$ e $t \in [0, 1]$. Appliciamo questa disuguaglianza con $x = a^p$, $y = b^{p'}$, $t = \frac{1}{p}$, $(1-t) = 1 - \frac{1}{p} = \frac{1}{p'}$. Otteniamo

$$\ln\left(\frac{1}{p}a^p + \frac{1}{p'}b^{p'}\right) \geq \ln a + \ln b \implies \frac{1}{p}a^p + \frac{1}{p'}b^{p'} \geq ab$$

dove l'ultima uguaglianza è per la monotonia del logaritmo.

□

Definizione 2.5: Esponenti coniugati

Se $1 \leq p, p' \leq \infty$ verificano $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1$ anche in senso generalizzato, ossia se $p = 1$ e $p' = +\infty$ o $p = \infty$ e $p' = 1$, allora si dicono **esponenti coniugati**.

Teorema 2.7: Disuguaglianza di Hölder

Siano $p, p' \in [1, \infty]$ esponenti coniugati. Allora se $f \in L^p(\Omega)$, $g \in L^{p'}(\Omega)$ allora $f \cdot g \in L^1(\Omega)$ e vale

$$\|fg\|_1 \leq \|f\|_p \cdot \|g\|_{p'}$$

Dimostrazione. Se $p = 1$ o $p = +\infty$ allora è semplice. Supponiamo ad esempio $p = 1$,

$$|fg|(x) \leq |f|(x)|g|(x) \leq |f|(g)\|g\|_\infty \quad \text{q.o.}$$

quindi fg è dominata da una funzione integrabile ed è dunque integrabile, inoltre

$$\|fg\|_1 = \int_\Omega |fg| d\mu \leq \|g\|_\infty \int_\Omega |f| d\mu = \|f\|_1 \cdot \|g\|_\infty$$

Sia ora $p \in (1, \infty)$. Se f o g è la funzione nulla allora la disuguaglianza è ovvia, quindi supponiamo $\|f\|_p \neq 0 \neq \|g\|_{p'}$. Ora dividiamo in due passi

1. u, v nelle stesse ipotesi di f e g ma con $\|u\|_p = 1 = \|v\|_{p'}$. Allora

$$|uv(x)| \leq \frac{1}{p}|u(x)|^p + \frac{1}{p'}|v(x)|^{p'} \quad (\text{Young } 2.6)$$

quindi $uv \in L^1(\Omega)$ in quanto dominata da funzione somma di funzioni integrabili. Allora abbiamo

$$\|uv\|_1 = \int_{\Omega} |uv| d\mu \leq \frac{1}{p} \int_{\Omega} |u|^p d\mu + \frac{1}{p'} \int_{\Omega} |v|^{p'} d\mu = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1 = \|u\|_p \|v\|_{p'}$$

2. f, g generiche. Sia $M = \|f\|_p$ e $N = \|g\|_{p'}$. Allora $\frac{f}{M}, \frac{g}{N} \in L^p$ e $L^{p'}$ rispettivamente e $\left\| \frac{f}{M} \right\|_p = 1 = \left\| \frac{g}{N} \right\|_{p'}$. Applichiamo il punto precedente a $\frac{f}{M}$ e $\frac{g}{N}$ e otteniamo che $fg \in L^1$ e inoltre

$$\left\| \frac{f}{M} \cdot \frac{g}{N} \right\|_1 \leq 1 \implies \frac{1}{MN} \|fg\|_1 \leq 1 \implies \|fg\|_1 \leq MN = \|f\|_p \cdot \|g\|_{p'}$$

□

Proposizione 2.8 (Minkovsky o disuguaglianza triangolare). Se $f, g \in L^p(\Omega)$ allora $f + g \in L^p(\Omega)$ e

$$\|f + g\|_p \leq \|f\|_p + \|g\|_p$$

Dimostrazione. Già sappiamo che $f + g \in L^p(\Omega)$. Allora

$$\int_{\Omega} |f + g|^p d\mu = \int_{\Omega} |f + g|^{p-1} |f + g| d\mu \leq \int_{\Omega} \underbrace{|f + g|^{p-1}}_{:=w} |f| d\mu + \int_{\Omega} |f + g|^{p-1} |g| d\mu$$

$w \in L^{p'}(\Omega)$?

$$\int_{\Omega} |w|^{p'} d\mu = \int_{\Omega} |f + g|^{(p-1)p'} d\mu = \int_{\Omega} |f + g|^p d\mu$$

dove si è usato che $\frac{1}{p} + \frac{1}{p'} = 1 \implies p' + p = pp'$. Troviamo quindi

$$\|w\|_{p'} = \left(\int_{\Omega} |f + g|^p d\mu \right)^{\frac{1}{p'} = \frac{p-1}{p}} = \|f + g\|_p^{p-1}$$

Ora possiamo applicare Hölder e ottenere

$$\|f + g\|_p^p \leq \|w\|_{p'} \|f\|_p + \|w\|_{p'} \|g\|_p = \|f + g\|_p^{p-1} (\|f\|_p + \|g\|_p)$$

e infine dividendo per $\|f + g\|_p^{p-1}$ otteniamo la disuguaglianza triangolare □

Con la precedente proposizione abbiamo effettivamente finito di dimostrare la proposizione 2.5 che diceva che L^p è uno spazio normato.

Teorema 2.9: L^p è Banach

Per ogni $p \in [1, \infty]$, lo spazio $L^p(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ è uno spazio di Banach

dimostrazione per $p = +\infty$. Sia $\{f_n\} \subseteq L^\infty(\Omega)$ una successione di Cauchy. Quindi

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \exists n_k \in \mathbb{N} \quad \text{tale che} \quad \forall n, m \geq n_k \implies \|f_n - f_m\|_\infty \leq \frac{1}{k} \quad (2.1)$$

cioè $|f_n(x) - f_m(x)| \leq \frac{1}{k}$ per ogni $x \in \Omega \setminus N_{k,n,m}$, con $N_{k,n,m}$ trascurabile. Consideriamo ora l'insieme

$$N = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} \bigcup_{n, m \geq n_k} N_{k,n,m}$$

perciò N è unione numerabile di trascurabili e quindi è trascurabile. Allora sappiamo che in (2.1) l'ultima disuguaglianza può significare $|f_n(x) - f_m(x)| \leq \frac{1}{k}$ per ogni $x \in \Omega \setminus N$. Questo significa che $\{f_n(x)\} \in \mathbb{R}$ è di Cauchy e quindi convergente per ogni $x \in \Omega \setminus N$ e introduciamo la funzione

$$f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) \quad \forall x \in \Omega \setminus N$$

che è misurabile perché limite di funzioni misurabili. Ora portando $m \rightarrow \infty$ nella disuguaglianza precedente otteniamo

$$|f_n(x) - f(x)| \leq \frac{1}{k} \quad \forall x \in \Omega \setminus N \quad (2.2)$$

ci resta da dimostrare che $f \in L^\infty(\Omega)$ e che $f_n \rightarrow f$ in $L^\infty(\Omega)$. La prima è vera, perché ad esempio

$$|f(x)| \leq |f_{n_k}(x)| + |f(x) - f_{n_k}(x)| \leq \|f_{n_k}\|_\infty + \frac{1}{k} \quad \forall x \in \Omega \setminus N$$

e la seconda pure, infatti ora riprendendo la (2.2) e la (2.1) otteniamo

$$\forall k \in \mathbb{N} \quad \exists n_k \in \mathbb{N} : \forall n \geq n_k \quad \|f - f_n\|_\infty \leq \frac{1}{k} \quad \forall x \in \Omega \setminus N$$

□

dimostrazione con $1 \leq p < +\infty$. Sia f_n una successione di Cauchy in L^p , ossia

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists n_\varepsilon \in \mathbb{N} \quad \text{tale che} \quad m, n \geq n_\varepsilon \implies \|f_m - f_n\|_p < \varepsilon \quad (2.3)$$

Vogliamo dimostrare che esiste un'estratta convergente. Consideriamo l' n_1 dato dalla (2.3) per $\varepsilon = \frac{1}{2}$, e consideriamo f_{n_1} . Prendiamo ora $n_2 = \max\{n_{\varepsilon=\frac{1}{2^2}}, n_1 + 1\}$ e consideriamo f_{n_2} , dove il primo argomento è dato dal valore restituito dall'equazione 2.3. Procediamo in questo modo, ogni volta prendendo

$$f_{n_k} = f_{\max\{n_{\varepsilon=\frac{1}{2^k}}, n_{k-1}+1\}}$$

e abbiamo quindi che si verifica

$$\|f_{n_{k+1}} - f_{n_k}\|_p \leq \frac{1}{2^k} \quad \forall k \in \mathbb{N}$$

definiamo ora $u_k := f_{n_k}$ e vogliamo mostrare che u_k converge in L^p a qualche elemento f . A tale scopo sia

$$g_k(x) := \sum_{i=1}^k |u_{i+1}(x) - u_i(x)|$$

che è la ridotta di una serie a termini non negativi e inoltre ogni $g_k \in L^p(\Omega)$. Inoltre

$$\|g_k\|_p = \sum_{i=1}^k \|u_{i+1} - u_i\|_p \leq \sum_{i=1}^k \frac{1}{2^i} \leq 1 \implies \int_{\Omega} \underbrace{|g_k|^p}_{=: h_k} d\mu \leq 1$$

Allora $h_k := |g_k|^p$ è una successione monotona crescente e sono tutte non negative. Quindi per Beppo Levi (Teorema 1.31) possiamo concludere che esiste h misurabile e non negativa tale che

$$h(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} h_k(x) \text{ e } \int_{\Omega} h d\mu = \lim_{k \rightarrow \infty} \int_{\Omega} h_k d\mu \leq 1$$

succede quindi che $g_k(x) \rightarrow g(x)$ per ogni $x \in \Omega$, con $g \in L^p$ perché $\int_{\Omega} |g(x)|^p d\mu \leq 1$. Abbiamo ora che, se $n > m$

$$|u_n(x) - u_m(x)| \leq \sum_{i=m}^{n-1} |u_{i+1} - u_i(x)| \leq g_{n-1}(x) - g_{m-1}(x) \leq g(x) - g_{m-1}(x) \quad (2.4)$$

per $x \in \Omega$ fissato $\{u_k(x)\}$ è una successione di Cauchy e dunque possiamo definire una funzione

$$f(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} u_k(x) \quad \forall x \in \Omega$$

Infine vogliamo controllare che $f \in L^p(\Omega)$ e che $u_k \rightarrow f$ in $L^p(\Omega)$. Passando al limite per $n \rightarrow \infty$ in (2.4) otteniamo

$$|f(x) - u_m(x)| \leq g(x) - g_{m-1}(x) \leq g(x) \implies |f(x)| \leq |u_m(x)| + g(x)$$

e quindi $f \in L^p$ perché è dominata da una funzione L^p , in quanto somma di due tali funzioni. D'altra parte, sempre da (2.4), portando anche $m \rightarrow \infty$ otteniamo che il secondo membro tende a 0, e quindi $u_m \rightarrow f$ q.o. in Ω . Inoltre

$$|f(x) - u_m(x)|^p \leq |g(x)|^p \in L^1(\Omega)$$

e possiamo applicare il teorema 1.32 di convergenza dominata di Lebesgue per cui

$$\lim_{m \rightarrow \infty} \int_{\Omega} |f(x) - u_m(x)|^p d\mu = 0 \iff u_m := f_{n_m} \rightarrow f \text{ in } L^p(\Omega)$$

□

Corollario 2.9.1. *Sia $\{f_n\}$ una successione convergente a $f \in L^p(\Omega)$. Allora esistono una sottosuccessione $\{f_{n_k}\}$ e una funzione $w \in L^p(\Omega)$ tali che*

1. $f_{n_k} \rightarrow f$ q.o. in Ω
2. $|f_{n_k}(x)| \leq w(x)$ q.o. per $x \in \Omega$

Dimostrazione. Se $f_n \rightarrow f$ in $L^p(\Omega)$ allora è di Cauchy in L^p e quindi esiste sicuramente un'estratta $u_k := f_{n_k}$ tale che u_k converge q.o. a una funzione \tilde{f} e inoltre

$$|\tilde{f}(x) - u_k(x)| \leq g(x) \quad \forall k \in \mathbb{N} \implies |u_k(x)| \leq |\tilde{f}(x)| + g(x)$$

per cui possiamo prendere $w(x) = |\tilde{f}(x)| + g(x) \in L^p(\Omega)$. Ci rimane da controllare che $f \equiv \tilde{f}$ q.o. in Ω : questo è vero in quanto u_k converge in L^p sia a f (per ipotesi) che a \tilde{f} (per quanto appena detto) dunque per l'unicità del limite f e \tilde{f} devono appartenere alla stessa classe di funzioni in L^p .

Per $p = +\infty$ la tesi vale più banalmente. □

Osservazione. Convergenza in L^∞ implica convergenza quasi uniforme

Il corollario 2.9.1 si può espandere a dire che tutta la funzione converge quasi ovunque? **No**. Consideriamo ad esempio la successione

$$\begin{aligned} f_1 &= \chi_{[0,1]}, & f_2 &= \chi_{[0,\frac{1}{2}]}, & f_3 &= \chi_{[\frac{1}{2},1]} \\ f_4 &= \chi_{[0,\frac{1}{3}]}, & f_5 &= \chi_{[\frac{1}{3},\frac{2}{3}]}, & f_6 &= \chi_{[\frac{2}{3},1]} \\ &\vdots \end{aligned}$$

Questa successione converge a 0 in $L^p(0,1)$ per ogni $1 \leq p < \infty$, infatti

$$\int_0^1 |f_n - 0|^p dx = \int_0^1 |f_n|^p dx = \frac{1}{k_n} \rightarrow 0$$

tuttavia non converge quasi ovunque a 0, infatti per ogni $x \in (0,1)$ la successione $f_n(x)$ non ha limite perché non smette mai di assumere anche il valore 1.

Proposizione 2.10 (Convergenze).

1.

$$\text{Conv. in } L^\infty \implies \text{conv. q.u.} \implies \begin{cases} \text{conv. q.o.} \\ \text{conv. in misura} \end{cases}$$

2. *Conv. in $L^p(\Omega)$ per $1 \leq p < \infty \implies$ conv. q.o. per un estratta (come la convergenza in misura)*

3. *Conv. in $L^p(\Omega)$ per $1 \leq p < \infty \implies$ Conv. in misura*

4. *Se $\mu(\Omega) < +\infty$ e $1 \leq p < q \leq \infty$ allora $L^q(\Omega) \subseteq L^p(\Omega)$ e si ha che esiste una costante $C > 0$ per cui*

$$\|f\|_p \leq C \|f\|_q \quad \forall f \in L^q(\Omega)$$

Dimostrazione. La terza è vera perché se $f_n \rightarrow f$ in $L^p(\Omega)$ e definiamo $A_n = \{x \in \Omega : |f_n(x) - f(x)| > \varepsilon\}$

$$\varepsilon^p \mu(A_n) \leq \int_{A_n} |f_n(x) - f(x)|^p d\mu \leq \int_{\Omega} |f_n(x) - f(x)|^p d\mu \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$$

Per la quarta, sia $f \in L^q(\Omega)$. Allora, usiamo la disuguaglianza di Hölder con esponenti $\frac{q}{p}$ e $\frac{q}{q-p}$

$$\int_{\Omega} |f|^p d\mu = \int_{\Omega} 1 \cdot |f|^p d\mu \leq \left(\int_{\Omega} 1^{\frac{q}{q-p}} d\mu \right)^{\frac{q-p}{q}} \left(\int_{\Omega} (|f|^p)^{\frac{q}{p}} d\mu \right)^{\frac{p}{q}}$$

Da cui troviamo

$$\|f\|_p^p \leq \mu(\Omega)^{1-\frac{p}{q}} \|f\|_q^p \implies \|f\|_p \leq \mu(\Omega)^{\frac{1}{p}-\frac{1}{q}} \|f\|_q$$

Se $q = \infty$ invece abbiamo

$$\int_{\Omega} |f|^p d\mu \leq \int_{\Omega} \|f\|_{\infty}^p d\mu = \mu(\Omega) \|f\|_{\infty}^p \implies \|f\|_p \leq \mu(\Omega)^{\frac{1}{p}} \|f\|_{\infty}$$

□

Esempio 2.12. Nella 4. è importante richiedere $\mu(\Omega) < +\infty$. Ad esempio se $\Omega = \mathbb{R}$ e $f(x) = 1$ abbiamo che $f \in L^\infty$ ma $f \notin L^p(\mathbb{R})$ per ogni $1 \leq p < \infty$

Esempio 2.13. L'altra implicazione è normalmente falsa. Ad esempio se $f(x) = \frac{1}{|x|^\alpha} \chi_{[-1,1]}(x)$ per $\alpha < 1$ è integrabile ma non è limitata, quindi $f \in L^1$ ma $f \notin L^\infty$

Proposizione 2.11. Se $\mu(\Omega) = +\infty$ e $f \in L^1(\Omega) \cap L^\infty(\Omega)$ allora $f \in L^p(\Omega)$ per ogni $1 \leq p \leq +\infty$ e

$$\|f\|_p \leq \|f\|_1^\theta \|f\|_\infty^{1-\theta}$$

per un certo $\theta \in (0, 1)$.

Dimostrazione. Notiamo che $|f|^p = |f| |f|^{p-1} \leq |f| \|f\|_\infty^{p-1}$. Ne consegue che $|f|^p$ è integrabile e inoltre

$$\int_\Omega |f|^p d\mu \leq \|f\|_\infty^{p-1} \int_\Omega |f| d\mu = \|f\|_\infty^{p-1} \|f\|_1$$

ora elevando il tutto alla $1/p$ otteniamo

$$\|f\|_p \leq \|f\|_\infty^{1-1/p} \|f\|_1^{1/p}$$

ossia $\theta = \frac{1}{p}$ e $1 - \theta = \frac{1}{p'}$ □

Corollario 2.11.1. Se $\mu(\Omega) = +\infty$ e $f_n \rightarrow f$ in $L^1(\Omega)$ e in $L^\infty(\Omega)$ allora $f_n \rightarrow f$ in $L^p(\Omega)$ per ogni $p \in (1, \infty)$.

Dimostrazione. Per la proposizione precedente

$$\|f_n - f\|_p \leq \|f_n - f\|_1^{1/p} \|f_n - f\|_\infty^{1-1/p}$$

da qui la tesi. Notare che in realtà le ipotesi potrebbero essere alleggerite a chiedere solo una delle due convergenze, purché l'altra sia finita. □

Nota. Le convergenze q.o., q.u. e in misura non richiedono che le funzioni della successione o la funzione limite appartengano a un qualche spazio L^p .

2.3 Spazi di Hilbert

Per questo capitolo userò la notazione $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ o \mathbb{C} quando non è importante specificare il campo su cui lavoriamo.

Definizione 2.6: Spazio prehilbertiano

Uno spazio vettoriale H su \mathbb{K} dotato di un prodotto scalare $\langle \cdot, \cdot \rangle$ si chiama **spazio prehilbertiano**. In particolare l'applicazione

$$\langle \cdot, \cdot \rangle : H \times H \rightarrow \mathbb{K}$$

verifica le seguenti proprietà:

- i) (positività) $\langle x, x \rangle \geq 0 \quad \forall x \in H$
- ii) (definita positività) $\langle x, x \rangle = 0 \iff x = 0$
- iii) (linearità rispetto alla prima componente) $\langle \alpha x + \beta y, z \rangle = \alpha \langle x, z \rangle + \beta \langle y, z \rangle$,
 $\forall x, y, z \in H$ e $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{K}$
- iv) (simmetria / coniugio) $\langle x, y \rangle = \overline{\langle y, x \rangle}, \forall x, y \in H$

Ovviamente è giusto osservare che le proprietà i) ii) implicano che la funzione $x \mapsto \langle x, x \rangle$ è una norma.

Osservazione. Da *iii)* e *iv)* otteniamo che, per ogni $x, y, z \in H$ e $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$

$$\langle x, \alpha y + \beta z \rangle \stackrel{iii)}{=} \overline{\langle \alpha y + \beta z, x \rangle} \stackrel{iv)}{=} \overline{\alpha \langle y, x \rangle + \beta \langle z, x \rangle} = \overline{\alpha} \langle x, y \rangle + \overline{\beta} \langle x, z \rangle$$

Teorema 2.12: Diseguaglianza di Schwarz

Se H è uno spazio prehilbertiano allora per ogni $x, y \in H$ vale la diseguaglianza

$$|\langle x, y \rangle|^2 \leq \langle x, x \rangle \langle y, y \rangle$$

Dimostrazione. Considero l'elemento $x + \lambda \langle x, y \rangle y$, con $\lambda \in \mathbb{R}$ e calcolo il prodotto scalare con se stesso:

$$\begin{aligned} 0 &\leq \langle x + \lambda \langle x, y \rangle y, x + \lambda \langle x, y \rangle y \rangle = \\ &= \langle x, x \rangle + \lambda \langle x, y \rangle \langle y, x \rangle + \overline{\lambda} \langle y, x \rangle \langle x, y \rangle + |\lambda|^2 |\langle x, y \rangle|^2 \langle y, y \rangle = \\ &= \lambda^2 |\langle x, y \rangle|^2 \langle y, y \rangle + 2\lambda |\langle x, y \rangle|^2 + \langle x, x \rangle \end{aligned}$$

dove, se il coefficiente di λ^2 è diverso da 0, l'ultimo è un polinomio di secondo grado in λ , con tutti i coefficienti reali e non negativi, quindi il discriminante è non positivo, ossia

$$\frac{\Delta}{4} \leq 0 \iff |\langle x, y \rangle|^4 \langle y, y \rangle - |\langle x, y \rangle|^2 \langle x, x \rangle \leq 0$$

da cui $|\langle x, y \rangle| = 0$ oppure $|\langle x, y \rangle|^2 \leq \langle x, x \rangle \langle y, y \rangle$. In entrambi i casi la tesi è vera.

Se invece il coefficiente di λ^2 è 0, allora $\langle x, y \rangle = 0$ e la tesi è vera, oppure $\langle y, y \rangle = 0$, allora $y = 0$ e la tesi è vera perché $\langle x, y \rangle = 0$. \square

Proposizione 2.13. Sia H uno spazio prehilbertiano con prodotto scalare $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Allora la funzione

$$\begin{aligned} \|\cdot\| : H &\longrightarrow \mathbb{R}_{\geq 0} \\ v &\longmapsto \|v\| = \sqrt{\langle v, v \rangle} \end{aligned}$$

è una norma.

In particolare uno spazio prehilbertiano è uno spazio normato, con tale norma.

Dimostrazione. La definita positività corrisponde alle proprietà *i)* e *ii)* del prodotto scalare. L'omogenità segue dalla linearità:

$$\|\alpha v\| = \sqrt{\langle \alpha v, \alpha v \rangle} = \sqrt{\alpha \overline{\alpha} \langle v, v \rangle} = |\alpha| \sqrt{\langle v, v \rangle} = |\alpha| \|v\|$$

La diseguaglianza triangolare segue dalla diseguaglianza di Schwarz:

$$\begin{aligned} \|v + w\|^2 &= \langle v + w, v + w \rangle = \|v\|^2 + \|w\|^2 + 2\Re \langle v, w \rangle \leq \\ &\leq \|v\|^2 + \|w\|^2 + 2\|v\|\|w\| = (\|v\| + \|w\|)^2 \end{aligned}$$

per cui $\|v + w\| \leq \|v\| + \|w\|$. \square

Definizione 2.7: Spazio di Hilbert

Uno spazio prehilbertiano che sia completo rispetto alla norma indotta dal prodotto scalare si chiama **spazio di Hilbert**.

Esempio 2.14. \mathbb{R}^N e \mathbb{C}^N sono spazi di Hilbert. Ad esempio in \mathbb{C}^N il prodotto scalare standard è $\langle x, y \rangle = \sum_{i=1}^N x_i \overline{y_i}$ e induce la norma euclidea su \mathbb{C}^N . I dettagli sono facili e lasciati come esercizio.

Su \mathbb{R}^N si può mettere come prodotto scalare anche ad esempio

$$(x, y) = \begin{pmatrix} x & y \end{pmatrix} A \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

con A una matrice simmetrica definita positiva.

Esempio 2.15. $L^2(\Omega)$ è uno spazio di Hilbert se prendiamo come prodotto scalare

$$\langle f, g \rangle = \int_{\Omega} f(x) \overline{g(x)} d\mu$$

dove il coniugio è rilevante solo nel caso complesso. La norma associata a questo prodotto scalare è proprio la norma 2.

Proposizione 2.14 (Regola del Parallelogramma). *Se H è uno spazio prehilbertiano allora vale l'identità*

$$\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2\|x\|^2 + 2\|y\|^2 \quad \forall x, y \in H$$

che vista graficamente (figura 6) significa che la somma dei quadrati costruiti sulle diagonali è uguale alla somma dei quadrati costruiti sui lati.

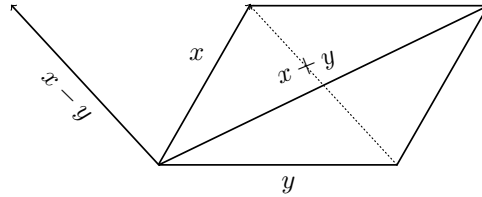


Figura 6: Regola del Parallelogramma

Dimostrazione.

$$\begin{aligned} \|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 &= \langle x + y, x + y \rangle + \langle x - y, x - y \rangle = \\ &= \langle x, x \rangle + \langle y, y \rangle + \langle x, y \rangle + \langle y, x \rangle + \\ &\quad + \langle x, x \rangle + \langle y, y \rangle - \langle x, y \rangle - \langle y, x \rangle = 2\|x\|^2 + 2\|y\|^2 \end{aligned}$$

□

Data una norma, se essa verifica l'identità del parallelogramma allora essa è una norma hilbertiana, cioè associata a un prodotto scalare

Proposizione 2.15. *Una norma $\|\cdot\|$ definita su uno spazio vettoriale V è hilbertiana se e solo se verifica l'identità del parallelogramma, ossia*

$$\|x + y\|^2 + \|x - y\|^2 = 2\|x\|^2 + 2\|y\|^2 \quad \forall x, y \in V$$

in questo caso il prodotto scalare è definito da

$$\langle x, y \rangle = \left\| \frac{x + y}{2} \right\|^2 - \left\| \frac{x - y}{2} \right\|^2 + i \left\| \frac{x + iy}{2} \right\|^2 - i \left\| \frac{x - iy}{2} \right\|^2 \quad \forall x, y \in V$$

dove gli ultimi due termini non sono presenti nel caso $\mathbb{K} = \mathbb{R}$

Esempio 2.16. Gli spazi $L^1(\Omega)$ e $L^\infty(\Omega)$ non sono Hilbertiani. Basta trovare una coppia di funzioni f, g tali che

$$\|f + g\|_1^2 + \|f - g\|_1^2 \neq 2\|f\|_1^2 + 2\|g\|_1^2$$

Ad esempio prendiamo $\Omega = [-1, 1]$ e prendiamo $f = \chi_{(-1,0)}$ e $g = \chi_{(0,1)}$ allora $f + g = 1$ q.o. e quindi

$$\|f + g\|_1^2 + \|f - g\|_1^2 = 4 + 4 \neq 2 + 2 = 2\|f\|_1^2 + 2\|g\|_1^2$$

Ora con le stesse funzioni mostriamo che neanche $L^\infty[-1, 1]$ ha una norma hilbertiana, infatti

$$\|f + g\|_\infty^2 + \|f - g\|_\infty^2 = 1 + 1 \neq 2 + 2 = 2\|f\|_\infty^2 + 2\|g\|_\infty^2$$

Definizione 2.8: Ortogonalità

Sia $(H, \langle \cdot, \cdot \rangle)$ uno spazio prehilbertiano. Due vettori $x, y \in H$ si dicono **ortogonali** se $\langle x, y \rangle = 0$.

Esercizio 2.4

Mostrare che negli spazi prehilbertiani vale il teorema di Pitagora: per ogni coppia di vettori ortogonali $x, y \in H$ si ha

$$\|x + y\|^2 = \|x\|^2 + \|y\|^2$$

2.4 Risultati di densità su $L^p(\Omega)$

In questa parte Ω sarà un aperto di \mathbb{R}^N con la misura μ di Lebesgue. Inizieremo con il caso $\Omega = \mathbb{R}^N$

Proposizione 2.16. *Le funzioni semplici, misurabili e nulle al di fuori di un compatto sono dense in $L^1(\mathbb{R}^N)$*

Dimostrazione. Data $f \in L^1(\mathbb{R}^N)$ osservo che $f^+, f^- \in L^1(\mathbb{R}^N)$ e sono non negative. Allora esistono 2 successioni s_n e t_n di funzioni semplici, misurabili, non negative e nulle fuori da un compatto che convergono q.o. rispettivamente a f^+ e f^- e queste successioni sono monotone crescenti. Ci rimane da controllare che $s_n \rightarrow f^+$ e $t_n \rightarrow f^-$ in $L^1(\mathbb{R}^N)$. Sappiamo che $s_n \nearrow f^+$ e $t_n \nearrow f^-$. Allora

$$\int_{\mathbb{R}^N} |s_n - f^+| d\mu = \int_{\mathbb{R}^N} (f^+ - s_n) d\mu \rightarrow 0$$

dove si è usato BL 1.31 perché la successione integranda è monotona decrescente e gli integrali sono tutti maggiorati da quello di f^+ che è finito. Altrimenti si può anche usare il teorema di convergenza dominata di Lebesgue perché tutte le funzioni sono dominate da f^+ . Lo stesso vale per t_n e f^- .

Allora la successione $\{s_n - t_n\}$ converge a f in $L^1(\mathbb{R}^N)$ □

Per $C_C^0(\Omega) \subseteq C^0(\Omega)$ si intende lo spazio di funzioni continue a supporto compatto

Proposizione 2.17. $C_C^0(\mathbb{R}^N)$ è denso in $L^1(\mathbb{R}^N)$

Dimostrazione. Dobbiamo provare che

$$\forall f \in L^1(\mathbb{R}^N) \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists g \in C_C^0(\mathbb{R}^N) \quad \|f - g\|_1 < \varepsilon$$

Sappiamo per 2.16 già che esiste s semplice, misurabile e nulla al di fuori di un compatto tale che $\|f - s\|_1 < \varepsilon/2$. Ora sappiamo che

$$s = \sum_{i=1}^n \alpha_i \chi_{A_i}$$

dove possiamo prendere $\alpha_i \neq 0$ per ogni i e A_i insiemi limitati. Dico allora che basta controllare che

$$\forall E \in \mathcal{M} \text{ limitato} \quad \forall \delta > 0 \quad \exists g \in C_C^0(\mathbb{R}^N) \quad \|\chi_E - g\|_1 < \delta$$

E è un misurabile limitato, quindi $\forall \delta$ esistono un chiuso F e un aperto limitato G tali che $F \subseteq E \subseteq G$ e $\mu(G \setminus F) < \delta$. Consideriamo allora la funzione

$$u(x) = \frac{d(x, \mathbb{R}^N \setminus G)}{d(x, F) + d(x, \mathbb{R}^N \setminus G)}$$

dove se C è un chiuso, $d(x, C) = \inf_{y \in C} d(x, y)$ è la distanza tra un punto e un chiuso. Allora u è continua² e

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \in F \\ 0 & x \in \mathbb{R}^N \setminus G \\ 0 \leq u \leq 1 & x \in G \setminus F \end{cases}$$

e quindi $u \in C_C^0(\mathbb{R}^N)$. Inoltre

$$\|\chi_E - u\|_1 = \int_{\mathbb{R}^N} |\chi_E - u| d\mu = \int_{G \setminus F} |\chi_E - u| d\mu \leq \int_{G \setminus F} d\mu = \mu(G \setminus F) < \delta$$

□

Proposizione 2.18. $C_C^0(\mathbb{R}^N)$ è denso in $L^p(\mathbb{R}^N)$ per $1 \leq p < \infty$

Dimostrazione. Vogliamo provare che

$$\forall f \in L^p(\mathbb{R}^N) \quad \forall \varepsilon > 0 \quad \exists g \in C_C^0(\mathbb{R}^N) \quad \|f - g\|_p < \varepsilon$$

1. Cominciamo ad approssimare f con una funzione $h \in L^\infty(\mathbb{R}^N) \cap L^1(\mathbb{R}^N)$.

Fissiamo un operatore di troncamento $T_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$

$$T_n(r) = \begin{cases} n & r > n \\ r & |r| \leq n \\ -n & r < -n \end{cases}$$

allora $T_n \circ f \in L^\infty(\mathbb{R}^N)$. Allora $h_n(x) = T_n(f(x)) \chi_{B_n}(x)$, con $B_n = \{x \in \mathbb{R}^N : |x| \leq n\}$. Allora $h_n \in L^\infty(\mathbb{R}^N) \cap L^1(\mathbb{R}^N)$. Succede che $h_n \rightarrow f$ in $L^p(\mathbb{R}^N)$, ossia

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \|h_n - f\|_p = 0 \iff \lim_{n \rightarrow \infty} \int |h_n - f|^p d\mu = 0$$

perché $h_n \rightarrow f$ q.o. per $n \rightarrow \infty$ e inoltre $|h_n - f|^p$ è dominata da $|f|^p \in L^1(\mathbb{R}^N)$. Ne consegue che

$$\exists \bar{n} \in \mathbb{N} : \forall n \geq \bar{n} \quad \|h_n - f\|_p < \frac{\varepsilon}{2}$$

²Sia X, d spazio metrico, $A \subseteq X$ e $d_A(x) = \inf_{y \in A} d(x, y)$ distanza punto-insieme. Allora la funzione d_A è continua rispetto alla topologia indotta da d . Da qualche parte sugli appunti di topologia c'è la dimostrazione.

2. Per ogni $\delta > 0$ esiste una funzione $u \in C_C^0(\mathbb{R}^N)$ tale che $\|h_{\bar{n}} - u\|_1 \leq \delta$ (per 2.17). Considero $v = T_n(u)$ e dico che $\|v - h_{\bar{n}}\|_1 \leq \|u - h_{\bar{n}}\|_1 \leq \delta$. Infatti $v \in C_C^0(\mathbb{R}^N)$ e

$$\begin{aligned} \int_{\mathbb{R}^N} |v - h_{\bar{n}}| d\mu &= \left(\int_{-\bar{n} \leq u \leq \bar{n}} + \int_{u > \bar{n}} + \int_{u < -\bar{n}} \right) |v - h_{\bar{n}}| d\mu = \\ &= \int_{-\bar{n} \leq u \leq \bar{n}} |u - h_{\bar{n}}| d\mu + \int_{u > \bar{n}} (\bar{n} - h_{\bar{n}}) d\mu + \int_{u < -\bar{n}} (h_{\bar{n}} + \bar{n}) d\mu \leq \\ &\leq \left(\int_{-\bar{n} \leq u \leq \bar{n}} + \int_{u > \bar{n}} + \int_{u < -\bar{n}} \right) |u - h_{\bar{n}}| d\mu \end{aligned}$$

Osservo che $v - h_{\bar{n}} \in L^1(\mathbb{R}^N) \cap L^\infty(\mathbb{R}^N)$ e inoltre $|v - h_{\bar{n}}| \leq 2\bar{n}$. Allora

$$\begin{aligned} \|v - h_{\bar{n}}\|_p &= \left(\int |v - h_{\bar{n}}|^{p-1} |v - h_{\bar{n}}| d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \leq (\|v - h_{\bar{n}}\|_\infty^{p-1} \|v - h_{\bar{n}}\|_1)^{\frac{1}{p}} = \\ &= \|v - h_{\bar{n}}\|_\infty^{1/p'} \|v - h_{\bar{n}}\|_1^{1/p} \leq (2\bar{n})^{1/p'} \delta^{1/p} \stackrel{?}{\leq} \frac{\varepsilon}{2} \end{aligned}$$

dove al posto di ? intendiamo che $\delta^{1/p} = \frac{\varepsilon}{2(2\bar{n})^{1/p'}}$ dunque posso prendere $g = v$ e la tesi è dimostrata. \square

Teorema 2.19: $\overline{C_C^0(\Omega)} = L^p(\Omega)$

Per $1 \leq p < \infty$ e $\Omega \subseteq \mathbb{R}^N$ aperto, $C_C^0(\Omega)$ è denso in $L^p(\Omega)$

Dimostrazione. Sia $f \in L^p(\Omega)$ e $\varepsilon > 0$. Prolunghiamo f a \mathbb{R}^N con

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f(x) & x \in \Omega \\ 0 & x \in \mathbb{R}^N \setminus \Omega \end{cases}$$

Allora $\tilde{f} \in L^p(\mathbb{R}^N)$ e per 2.18 esiste $g \in C_C^0(\mathbb{R}^N)$ tale che $\|\tilde{f} - g\|_p < \frac{\varepsilon}{2}$.

Prendiamo una successione di insiemi

$$A_n := \left\{ x \in \Omega : d(x, \mathbb{R}^N \setminus \Omega) > \frac{1}{n}; |x| < n \right\}$$

A_n sono sottoinsiemi aperti e limitati di Ω . Per ogni n posso considerare una funzione φ_n continua tale che

$$\varphi_n(x) = \begin{cases} 1 & x \in \overline{A_n} \\ 0 & x \in \Omega \setminus A_{n+1} \\ 0 \leq \varphi_n \leq 1 & x \in A_{n+1} \setminus \overline{A_n} \end{cases} \quad \text{e.g. } \varphi_n(x) = \frac{d(x, \mathbb{R}^N \setminus A_{n+1})}{d(x, \overline{A_n}) + d(x, \mathbb{R}^N \setminus A_{n+1})}$$

allora $\{\varphi_n\}$ è una successione di funzioni in $C_C^0(\mathbb{R}^N)$ e hanno supporto compatto contenuto in Ω . Mi interessa trovare $n \in \mathbb{N}$ tale che

$$\|g\varphi_n - f\|_{p,\Omega} < \varepsilon \quad (\text{in } \Omega, \text{ indico lo spazio in pedice})$$

Intanto sappiamo che $\|g\varphi_n - g\|_{p,\Omega} \rightarrow 0$, infatti

$$\|g\varphi_n - g\|_{p,\Omega} = \left(\int_\Omega |g|^p (1 - \varphi_n)^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} \rightarrow 0$$

questo perché l'integranda è dominata da $|g|^p \in L^1(\Omega)$ e tende a 0 q.o. in \mathbb{R}^N , infatti se $x \in \Omega$, $\varphi_n(x) = 1$ definitivamente. Dunque esiste n_ε tale che $\|g\varphi_{n_\varepsilon} - g\| \leq \frac{\varepsilon}{2}$ e infine

$$\begin{aligned}\|g\varphi_{n_\varepsilon} - f\|_{p,\Omega} &\leq \|g\varphi_{n_\varepsilon} - g\|_{p,\Omega} + \|g - f\|_{p,\Omega} \leq \|g\varphi_{n_\varepsilon} - g\|_{p,\Omega} + \|g - \tilde{f}\|_{p,\mathbb{R}^N} \leq \\ &\leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon\end{aligned}$$

□

2.5 Operatori lineari e continui tra spazi normati

Definizione 2.9: Operatore lineare

Siano X, Y spazi normati. Sia $T : X \rightarrow Y$ un operatore. Allora è lineare se

$$T(\alpha x + \beta y) = \alpha T(x) + \beta T(y) \quad \forall x, y \in X \quad \forall \alpha, \beta \in \mathbb{K}$$

Esempio 2.17. Se $X = \mathbb{R}^n$ e $Y = \mathbb{R}^m$, un'applicazione o operatore lineare viene tipicamente rappresentato da un sistema lineare

$$\begin{cases} y_1 = a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n \\ \vdots \\ y_m = a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n \end{cases} \quad (2.5)$$

Possiamo anche pensare a operatori lineari tra spazi a dimensione infinita di funzioni. Ad esempio tra funzioni continue possiamo considerare l'operatore

$$\begin{aligned}T : C^0([0, 1]) &\longrightarrow C^0([0, 1]) \\ f &\longmapsto T(f) = hf\end{aligned}$$

dove $h \in C^0([0, 1])$ è una funzione fissata. Questo è un operatore lineare, infatti

$$T(\alpha f + \beta g) = h(\alpha f + \beta g) = \alpha hf + \beta hg = \alpha T(f) + \beta T(g)$$

Definizione 2.10: Operatore continuo

Siano X, Y spazi normati. Sia $T : X \rightarrow Y$ un operatore. Allora è continuo se la funzione individuata da T è continua da X a Y

Definizione 2.11: Operatore limitato

Un operatore $T : X \rightarrow Y$ si dice **limitato** se esista una costante $C > 0$ tale che

$$\|Tx\|_Y \leq C\|x\|_X \quad \forall x \in X$$

Osservazione. Niente a che vedere col concetto di *funzione* limitata.

Teorema 2.20

Siano X, Y spazi normati e $T : X \rightarrow Y$ un operatore lineare. Allora T è continuo se e solo se T è limitato.

Dimostrazione.

\implies Supponiamo T continuo, dunque continuo in 0_X . Allora

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \delta > 0 : \|x\|_X \leq \delta \implies \|Tx\|_Y \leq \varepsilon \quad (2.6)$$

preso ora $0_X \neq z \in X$ allora $\frac{\delta z}{\|z\|_X} =: x$ deve soddisfare 2.6, allora poiché

$$\|x\|_X = \left\| \frac{\delta z}{\|z\|_X} \right\|_X = \frac{\delta}{\|z\|_X} \|z\|_X = \delta$$

ne segue che $\|Tx\|_Y \leq \varepsilon$, in particolare

$$\|Tx\|_Y = \left\| \frac{\delta Tx}{\|z\|_X} \right\|_Y = \frac{\delta}{\|z\|_X} \|Tz\|_Y \leq \varepsilon$$

deduco allora che

$$\|Tz\|_Y \leq \frac{\varepsilon}{\delta} \|z\|_X \quad \forall z \in X$$

infatti vale anche chiaramente per $z = 0_X$.

\Leftarrow Sia T limitato, dunque esiste $C > 0$ tale che

$$\|Tx\|_Y \leq C\|x\|_X \quad \forall x \in X$$

e dobbiamo provare che per ogni successione $\{x_n\}$ convergente a x in X si ha che $T(x_n) \rightarrow Tx$ in Y . Si ha che

$$\|T(x_n) - T(x)\|_Y = \|T(x_n - x)\|_Y \leq C\|x_n - x\|_X \rightarrow 0$$

□

Nota. Notare che abbiamo usato solo la continuità in 0_X per dimostrare \implies

Osserviamo dunque che l'insieme degli operatori lineari e continui tra X e Y costituisce uno spazio vettoriale. Infatti se $T, S : X \rightarrow Y$ e sono lineari e continui, e $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$ allora l'operatore $\alpha T + \beta S$ è ancora lineare e continuo (e anche limitato). Infatti se $\|Tx\|_Y \leq C_T\|x\|_X$ e $\|Sx\|_Y \leq C_S\|x\|_X$ allora

$$\|(\alpha T + \beta S)(x)\|_Y \leq \alpha\|Tx\|_Y + \beta\|Sx\|_Y \leq (\alpha C_T + \beta C_S)\|x\|_X$$

Indichiamo ora con $\mathcal{L}(X, Y)$ lo spazio vettoriale degli operatori lineari e limitati (o lineari e continui) tra X e Y munito della norma

$$\|T\| = \inf \{C \geq 0 : \|Tx\|_Y \leq C\|x\|_X \quad \forall x \in X\} \quad (2.7)$$

tale norma ha senso e utilizza la limitatezza dell'operatore, assomiglia inoltre alla norma L^∞ .

Se ora considero

$$S_T = \sup \left\{ \frac{\|Tx\|_Y}{\|x\|_X} : x \in X \setminus \{0_X\} \right\}$$

ottengo una definizione equivalente di norma. Succede infatti che $\|T\| = S_T$. Infatti rinominati A e B rispettivamente gli insiemi usati nella definizione di $\|T\|$ e di S_T abbiamo che $b \leq a$ per ogni $b \in B$ e $a \in A$, infatti presa una costante dell'insieme A , sicuramente maggiore il rapporto $\frac{\|Tx\|_Y}{\|x\|_X}$ proprio perché tale costante è in A . Passando al sup in $b \leq a$ otteniamo $S_T \leq a$, $\forall a \in A$ e passando ora all'inf sugli a otteniamo $S_T \leq \|T\|$. Sappiamo ora che S_T è il sup di B , quindi

$$\frac{\|Tx\|_Y}{\|x\|_X} \leq S_T \quad \forall x \in X \setminus \{0_X\} \implies S_T \in A$$

infatti chiaramente $\|Tx\|_Y \leq S_T \|x\|_X$ anche per $x = 0_X$. Ma allora necessariamente $\|T\| \leq S_T$ poiché ne è l'inf.

Da questo deduciamo che $\|T\| = S_T$ e che $\|T\| = \min A$ tale norma è una norma, infatti

1. $\|T\| \geq 0$ per ogni $T \in \mathcal{L}(X, Y)$
2. $\|T\| = 0 \iff T \equiv 0$, infatti se $\|T\| = 0$ allora $\|Tx\|_Y \leq 0$
3. $\|\lambda T\| = \sup_{x \in X \setminus \{0_X\}} \frac{\|\lambda Tx\|_Y}{\|x\|_X} = |\lambda| \|T\|$
4. $\|T + S\| = \sup_{x \in X \setminus \{0_X\}} \frac{\|(T + S)(x)\|_Y}{\|x\|_X} \leq \sup_{x \in X \setminus \{0_X\}} \left(\frac{\|Tx\|_Y}{\|x\|_X} + \frac{\|Sx\|_Y}{\|x\|_X} \right) \leq \|T\| + \|S\|$

Osservazione. $\|T\| = \sup\{\|Tx\|_Y, x \in X : \|x\| = 1\}$ infatti se $z \in X \setminus \{0_X\}$ allora $\frac{\|Tz\|_Y}{\|z\|_X} = \left\| T \left(\frac{z}{\|z\|_X} \right) \right\|_Y$ dove l'argomento è un vettore di norma unitaria

Esercizio 2.5

Mostrare che

$$\|T\| = \sup_{\|x\|_X \leq 1} \{\|Tx\|_Y\}$$

Esempio 2.18. I sistemi lineari da \mathbb{R}^N in \mathbb{R}^M del tipo (2.5), anche scritto $\vec{y} = A\vec{x}$, con $\vec{x} = (x_1, \dots, x_N)$, $\vec{y} = (y_1, \dots, y_M)$ e $A = (a_{ij})$ sono operatori lineari $(x_1, \dots, x_N) \mapsto (y_1, \dots, y_M)$.

La ricerca della norma di questo problema è un bel problema di massimo sulla palla chiusa di raggio 1 di \mathbb{R}^N .

Esempio 2.19. Sia $(\Omega, \mathcal{M}, \mu)$ uno spazio di misura con $\mu(\Omega) < +\infty$. Allora l'inclusione $i : L^q(\Omega) \rightarrow L^p(\Omega)$, con $1 \leq p < q \leq \infty$ è un operatore lineare. Sappiamo

$$\|f\|_p \leq \mu(\Omega)^{\frac{1}{p} - \frac{1}{q}} \|f\|_q \quad \forall f \in L^q(\Omega)$$

e quindi necessariamente $\|i\| \leq \mu(\Omega)^{\frac{1}{p} - \frac{1}{q}}$. La domanda ora si volge a capire se vale l'uguale o il minore. Dobbiamo trovare un elemento $0 \neq f \in L^p(\Omega)$ che realizza l'uguaglianza per dire che vale l'uguaglianza. Sia $f = 1$, allora

$$\begin{aligned} \|f\|_p &= \left(\int_{\Omega} 1^p d\mu \right)^{\frac{1}{p}} = \mu(\Omega)^{\frac{1}{p}} \\ \|f\|_q &= \begin{cases} \mu(\Omega)^{\frac{1}{q}} & \text{se } q < \infty \\ 1 & \text{se } q = \infty \end{cases} \end{aligned}$$

e quindi effettivamente

$$\|f\|_p = \mu(\Omega)^{\frac{1}{p}} = \mu(\Omega)^{\frac{1}{p} - \frac{1}{q}} \cdot \begin{cases} \mu(\Omega)^{\frac{1}{q}} & \text{se } q < \infty \\ 1 & \text{se } q = \infty \end{cases}$$

Esempio 2.20. Sia $T : L^\infty(\mathbb{R}) \rightarrow L^1(\mathbb{R})$, $f \mapsto \chi_{[-1,1]} f$. Allora

$$\|Tf\|_1 = \int_{[-1,1]} |f| d\mu \leq 2 \|f\|_\infty$$

e quindi $\|T\| \leq 2$

Esempio 2.21. $T : L^1(\mathbb{R}) \rightarrow L^\infty(\mathbb{R})$ con $T(f) = \int_{\mathbb{R}} f d\mu$. Allora

$$\|Tf\|_\infty \leq \|f\|_1 \implies \|T\| \leq 1$$

Similmente possiamo prendere $g \in L^\infty(\Omega)$ e considerare l'operatore

$$Tf(x) = \int_{(-\infty, x)} f(t)g(t)dt$$

e allora

$$\|Tf\|_\infty \leq \|f\|_1 \|g\|_\infty \implies \|T\| \leq \|g\|_\infty$$

Importante! Se lo spazio di arrivo è \mathbb{K} , allora si parla di funzionali lineari e continui su X , e lo spazio $\mathcal{L}(X, \mathbb{K})$ viene detto **spazio duale** e viene denotato con X' oppure X^*

Teorema 2.21

Se X è normato e Y è Banach, allora $\mathcal{L}(X, Y)$ è uno spazio di Banach

Dimostrazione. Sia T_n una successione di Cauchy in $\mathcal{L}(X, Y)$, quindi

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \bar{n} \in \mathbb{N} : \forall n, m \geq \bar{n} \quad \|T_n - T_m\| \leq \varepsilon$$

che a sua volta significa

$$\|(T_n - T_m)(x)\|_Y = \|T_n(x) - T_m(x)\|_Y \leq \varepsilon \|x\|_X \quad \forall x \in X$$

Fissiamo ora $x \in X$, allora $T_n(x)$ è una successione di Cauchy in Y . Poiché Y è Banach, tale successione converge, quindi esiste un elemento $y \in Y$ tale che $T_n(x) \rightarrow y$ in Y .

Definiamo ora l'applicazione $T : X \rightarrow Y$ tale che $T(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} T_n(x)$, che vogliamo mostrare essere lineare e continua. Allora $\forall u, v \in X$ e $\forall \alpha, \beta \in \mathbb{K}$

$$T(\alpha u + \beta v) = \lim_{n \rightarrow \infty} T_n(\alpha u + \beta v) \stackrel{*}{=} \alpha \lim_{n \rightarrow \infty} T_n(u) + \beta \lim_{n \rightarrow \infty} T_n(v) = \alpha T(u) + \beta T(v)$$

dove in \star si è usata contemporaneamente la linearità di T_n e la linearità del limite. Quindi T è lineare. Dalla disuguaglianza della successione di Cauchy abbiamo

$$\|T_{\bar{n}}x - T_mx\|_Y \leq \varepsilon \|x\|_X \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \|T_{\bar{n}}x - Tx\|_Y \leq \varepsilon \|x\|_X$$

e quindi

$$\|Tx\|_Y \leq \|Tx - T_{\bar{n}}x\|_Y + \|T_{\bar{n}}x\|_Y \leq \varepsilon \|x\|_X + \|T_{\bar{n}}\| \|x\|_X \leq (\varepsilon + \|T_{\bar{n}}\|) \|x\|_X$$

da cui T è limitata e $\|T\| < \varepsilon + \|T_{\bar{n}}\|$, per cui $T \in \mathcal{L}(X, Y)$.

Ci rimane solo da controllare che $T_n \rightarrow T$ in $\mathcal{L}(X, Y)$. Sappiamo che

$$\|T_n x - Tx\|_Y \leq \varepsilon \|x\|_X \quad \forall x \in X, \quad \forall n \geq \bar{n}$$

ma allora

$$\|(T_n - T)(x)\|_Y \leq \varepsilon \|x\|_X \implies \|T_n - T\| \leq \varepsilon \quad \forall n \geq \bar{n}$$

□

Corollario 2.21.1. Se X è normato, X' è sempre Banach

Dimostrazione. Sia \mathbb{R} che \mathbb{C} sono completi

□

Esempio 2.22 (Prodotto di convoluzione). Fissiamo una funzione $g \in L^\infty(\mathbb{R})$ e consideriamo l'operatore

$$(Tf)(x) = \int_{\mathbb{R}} f(x-y)g(y)dy$$

Sappiamo già dalla proposizione 1.41 che $f, g \in L^1(\mathbb{R})$ allora $Tf \in L^1(\mathbb{R})$ e inoltre

$$\|Tf\|_1 \leq \|f\|_1 \|g\|_1$$

Se invece $g \in L^\infty(\mathbb{R})$ allora $Tf \in L^\infty(\mathbb{R})$? Sì, infatti

$$|(Tf)(x)| \leq \int_{\mathbb{R}} |f(x-y)| \|g\|_\infty dy = \|f\|_1 \|g\|_\infty$$

quindi $Tf \in L^\infty(\mathbb{R})$ e $\|Tf\|_\infty \leq \|f\|_1 \|g\|_\infty$ e quindi $\|T\| \leq \|g\|_\infty$

Esempio 2.23 (Spazio Duale). Lo spazio duale di \mathbb{K}^n è isomorfo a \mathbb{K}^n . Ma come è fatto lo spazio duale di $L^1(\Omega)$? Ad esempio per $\Omega = \mathbb{R}$ necessariamente contenere funzionali del tipo $L : L^1(\mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}$. Ad esempio

$$Lf = \int_{\Omega} f d\mu$$

è un tale funzionale. Ma anche fissata $g \in L^\infty(\Omega)$, il funzionale

$$L_g(f) = \int_{\Omega} fg d\mu$$

è lineare ed è limitato in quanto

$$|L_g(f)| \stackrel{\text{Hölder 2.7}}{\leq} \|f\|_1 \|g\|_\infty \implies \|f\|_{(L^1(\Omega))'} \leq \|g\|_\infty$$

allora per ogni $g \in L^\infty(\Omega)$ esiste un funzionale lineare e continuo L_g . Risulta (spoiler di analisi funzionale) che non ve ne sono altri, quindi in particolare $(L^1(\Omega))' \cong L^\infty(\Omega)$

2.6 Spazi di successioni ℓ^p

Definizione 2.12: Spazi ℓ^p

Gli spazi di successioni ℓ^p sono definiti come

$$\begin{aligned} \ell^p &= \{x = (x_n)_{n \in \mathbb{N}} : \sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^p < +\infty\} \text{ se } 1 \leq p < \infty \\ \ell^\infty &= \{x = (x_n)_{n \in \mathbb{N}} : \sup_{n \in \mathbb{N}} |x_n| < +\infty\} \end{aligned}$$

con $x_n \in \mathbb{K}$, e $\mathbb{K} = \mathbb{C}$ o \mathbb{R} . Altrimenti detto,

$$\ell^p := L^p(\mathbb{N}, 2^{\mathbb{N}}, \#)$$

Sono tutti spazi di Banach, in quanto spazi L^p . La norma, se $1 \leq p < \infty$, è

$$\|x\|_p = \left(\int_{\Omega} |x|^p d\# \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^p \right)^{\frac{1}{p}}$$

e se $p = \infty$

$$\|x\|_\infty = \sup_{n \in \mathbb{N}} |x_n|$$

Proposizione 2.22 (Inclusioni fra spazi ℓ^p). Se $1 \leq p < q \leq \infty$, allora $\ell^p \subseteq \ell^q$ e inoltre $\|x\|_q \leq \|x\|_p$, $\forall x \in \ell^p$

Dimostrazione. Chiaramente

$$|x_n|^p \leq \sum_{i=1}^{\infty} |x_i|^p \implies |x_n| \leq \left(\sum_{i=1}^{\infty} |x_i|^p \right)^{\frac{1}{p}} = \|x\|_p$$

Se $q = \infty$ allora

$$\|x\|_{\infty} = \sup_{n \in \mathbb{N}} |x_n| \leq \|x\|_p$$

Per $q < \infty$ allora

$$\begin{aligned} \|x\|_q^q &= \sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^q = \sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^{q-p} |x_n|^p \stackrel{\ell^q \subseteq \ell^{\infty}}{\leq} \sum_{n=1}^{\infty} \|x\|_{\infty}^{q-p} |x_n|^p = \|x\|_{\infty}^{q-p} \|x\|_p^p \leq \\ &\stackrel{\ell^p \subseteq \ell^{\infty}}{\leq} \|x\|_p^{q-p} \|x\|_p^p = \|x\|_p^q \end{aligned}$$

da cui la tesi □

Esempio 2.24. Consideriamo la successione $x_n = \frac{1}{n}$. Allora $\{x_n\} \in \ell^p$, $\forall p \in (1, \infty]$, ma $p \notin \ell^1$.

Esempio 2.25. $i : \ell^p \rightarrow \ell^q$ inclusione è lineare e limitato con norma $\|i\| \leq 1$. È proprio $\|i\| = 1$: Consideriamo la successione canonica

$$e^k = (0, 0, 0, \dots, \overset{(k)}{1}, 0, \dots)$$

allora la successione $\{e^k\}_k$ è detta successione canonica, $\{e^k\} \in \ell^p$ per ogni $p \in [1, \infty]$ e inoltre

$$\|e^k\|_p = 1 \quad \forall p \in [1, \infty]$$

dunque $\|e^k\|_p = \|e^k\|_q$ per $1 \leq p < q \leq \infty$ e allora

$$\|i\| = \sup_{x \neq 0} \frac{\|i(x)\|_q}{\|x\|_p} = 1$$

Consideriamo i seguenti spazi

$$\begin{aligned} c &= \{x = (x_n) : \text{la successione } x_n \text{ è convergente} \} \\ c_0 &= \{x = (x_n) : \text{la successione } x_n \text{ è infinitesima} \} \\ c_{00} &= \{x = (x_n) : \exists k \in \mathbb{N} : x_n = 0 \forall n > k\} \end{aligned}$$

allora se $p < \infty$ e $x \in \ell^p$ allora $\sum_{n=1}^{\infty} |x_n|^p$ converge e quindi $\lim_{n \rightarrow \infty} |x_n|^p = 0$ e allora $x = (x_n) \in c_0$. Ne consegue che

$$c_{00} \subseteq \ell^1 \subseteq \ell^p \subseteq c_0 \subseteq c \subseteq \ell^{\infty}$$

c_{00} è un sottospazio di ℓ^1 **denso**: infatti se $x = (x_n) \in \ell^1$ allora posso costruire la successione

$$x^k = (x_1, x_2, \dots, x_k, 0, 0, \dots) \in c_{00} \tag{2.8}$$

e chiaramente

$$\|x^k - x\|_1 = \sum_{n=1}^{\infty} |x_n^k - x_n| = \sum_{n=k+1}^{\infty} |0 - x_n| \xrightarrow{k \rightarrow \infty} 0$$

in quanto resto $k+1$ -esimo di serie convergente. Se ora $p \in 1 < p < \infty$, con analoga dimostrazione provo anche che c_{00} è denso in ℓ^p .

Ora studiamo se c_{00} è denso in c_0 , che è **si**, infatti preso un elemento $x = (x_n) \in c_0$ allora $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$. Esiste una successione $x^k = (x_n^k)$ tale che $x^k \in c_{00}$ per ogni k e $\|x^k - x\|_\infty \rightarrow 0$, ed è di nuovo definita come in (2.8). Allora

$$\|x^k - x\|_\infty = \sup_{n \in \mathbb{N}} |x_n^k - x_n| = \sup_{n > k} |x_n| \rightarrow 0 \quad \text{per } k \rightarrow \infty$$

c_0 e c sono invece sottospazi di ℓ^∞ . Sia $x^k = (x_n^k)$ una successione di elementi $x^k \in c_0 \forall k$ tale che $\exists x \in \ell^\infty$ con

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \|x^k - x\|_\infty = 0$$

Ora dobbiamo mostrare che $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = 0$, ossia

$$\forall \varepsilon > 0 \exists n_\varepsilon \in \mathbb{N} : \forall n \geq n_\varepsilon \quad |x_n| \leq \varepsilon$$

ma noi sappiamo che

$$|x_n| \leq |x_n^k| + |x_n - x_n^k| \leq \frac{\varepsilon}{2} + \frac{\varepsilon}{2} = \varepsilon$$

questo perché ogni x^k è una successione infinitesima e per la convergenza uniforme di x_n^k a x_n . Quindi c_0 è **chiuso** in ℓ^∞ . Si può dire lo stesso osservando che l'operatore

$$L : c \longrightarrow \mathbb{R} \quad (2.9)$$

$$x = (x_n) \longmapsto L(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \quad (2.10)$$

è un funzionale lineare e continuo perché il limite è lineare e inoltre

$$|Lx| \leq \sup_n |x_n| = \|x\|_\infty$$

e in particolare $\|L\|_{c'} = 1$ (basti prendere una successione con limite uguale al sup). Allora

$$|L(x^k) - L(x)| \leq \|x^k - x\|_\infty \rightarrow 0$$

ma poiché $L(x^k)$ è sempre uguale a 0 allora lo è anche $L(x)$. Infine si può anche osservare che c_0 è la controimmagine di $\{0\}$ tramite l'operatore continuo L e quindi è chiuso in c .

c è chiuso in ℓ^∞ in quanto se $x(k) \rightarrow x$ in ℓ^∞ allora $L(x^k) \rightarrow L(x)$ in quanto L è continuo, quindi in particolare $L(x)$ esiste ed è finito.

Proposizione 2.23. *Ricapitolando quanto mostrato finora abbiamo la seguente catena di inclusioni e chiusure*

$$c_{00} \subset \overline{c_{00}}^{\ell^1} = \ell^1 \subset \overline{c_{00}}^{\ell^p} = \ell^p \subset \overline{c_{00}}^{c_0} = c_0 = \overline{c_0}^{c, \ell^\infty} \subset c = \overline{c}^{\ell^\infty} \subset \ell^\infty$$

Osservazione. L non è ben definito in ℓ^∞

Possiamo adattare agli ℓ^p la disuguaglianza di Hölder 2.7 ottenendo che se abbiamo $x \in \ell^p, y \in \ell^{p'}$ con p, p' coniugati, allora

$$xy = (x_1 y_1, x_2 y_2, \dots, x_n y_n, \dots) \in \ell^1$$

e inoltre

$$\|xy\|_1 = \sum_{n=1}^{\infty} x_n y_n \leq \sum_{n=1}^{\infty} |x_n y_n| \leq \|x\|_p \|y\|_{p'}$$

Definizione 2.13: Spazio normato separabile

Uno spazio normato X si dice **separabile** se esiste un sottoinsieme denso e numerabile di X

Gli spazi ℓ^p con $1 \leq p < \infty$ sono spazi **separabili**. Infatti sappiamo che c_{00} è denso in ℓ^p se $p < \infty$ e consideriamo ora q_{00} il sottoinsieme di c_{00} delle successioni a componenti (oppure a parti reali e immaginarie delle componenti) razionali. Allora q_{00} è numerabile ed è denso in ℓ^p poiché è denso in c_{00}

Proposizione 2.24. ℓ^∞ **non** è separabile

Dimostrazione. Se così fosse, allora esisterebbe una successione x^k che è densa in ℓ^∞ . Allora considero la seguente successione

$$z = (z_k) = \begin{cases} 0 & \text{se } |x_k^k| \geq 1 \\ 1 + x_k^k & \text{se } |x_k^k| < 1 \end{cases}$$

quindi sicuramente $z \in \ell^\infty$ in quanto è limitata da 2, ma

$$\|z - x^k\|_\infty = \sup_n |z_n - x_n^k| \geq |z_k - x_k^k| \geq 1$$

che è una contraddizione in quanto quindi la successione $x = (x^k)$ non è densa \square

Teorema 2.25: Spazi duali di ℓ^p

Sia $1 \leq p < \infty$. Allora per ogni $\varphi \in (\ell^p)'$ esiste unico $u \in \ell^{p'}$ tale che

$$\varphi(x) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n x_n \quad \forall x \in \ell^p$$

Inoltre si ha che $\|\varphi\|_{(\ell^p)'} = \|u\|_{p'}$

Osservazione. In soldoni ne consegue che $(\ell^p)' \cong \ell^{p'}$. Sarà un risultato valido anche per spazi L^p ma è più difficile dimostrarlo quindi non se ne parla in questo corso

Dimostrazione. Consideriamo la successione $e^k = (0, \dots, 0, \overset{(k)}{1}, 0, \dots, 0, \dots)$ che è la successione canonica. A partire da queste consideriamo $u_k = \varphi(e^k)$ per ogni $k \in \mathbb{N}$ e consideriamo la successione $u = (u_k)$. Vorremmo ora provare che $u \in \ell^{p'}$ e $\|u\|_{p'} \leq \|\varphi\|_{(\ell^p)'}$. A tal scopo cominciamo da $p = 1$.

$$|u_k| = |\varphi(e^k)| \leq \|\varphi\|_{(\ell^1)'} \|e^k\|_\infty \leq \|\varphi\|_{(\ell^1)'} \implies \|u\|_\infty = \sup_k |u_k| \leq \|\varphi\|_{(\ell^1)'}$$

Consideriamo ora $1 < p < \infty$ e consideriamo $x \in c_{00}$ tale che $x_n = 0$ per ogni $n > k$ allora

$$|\varphi(x)| = \left| \varphi\left(\sum_{i=1}^k x_i e^i\right) \right| = \left| \sum_{i=1}^k x_i \varphi(e_i) \right| = \left| \sum_{i=1}^k x_i u_i \right| \leq \|\varphi\|_{(\ell^p)'} \|x\|_p \quad (2.11)$$

Scegliamo ora $x_i = |u_i|^{p'-2}$ e $x_i = 0$ se $u_i = 0$. Allora nella (2.11) abbiamo

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^k |u_i|^{p'} &\leq \|\varphi\|_{(\ell^p)'} \left(\sum_{i=1}^k \left(|u_i|^{p'-1} \right)^p \right)^{\frac{1}{p}} = \left(\sum_{i=1}^k |u_i|^{p'p-p=p'} \right)^{\frac{1}{p}} \\ &= \left(\sum_{i=1}^k |u_i|^{p'} \right)^{1-\frac{1}{p}} = \left(\sum_{i=1}^k |u_i|^{p'} \right)^{\frac{1}{p'}} \leq \|\varphi\|_{(\ell^p)'} \end{aligned}$$

che vale per ogni $k \in \mathbb{N}$ e quindi in particolare tutte le ridotte sono dominate da $\|\varphi\|_{(\ell^p)'}^p$ e quindi anche la serie

$$\sum_{i=1}^{\infty} |u_i|^{p'} < +\infty \implies u \in \ell^{p'} \text{ e } \|u\|_{p'} \leq \|\varphi\|_{(\ell^p)'} \quad (2.12)$$

Ci resta da provare che $\varphi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i$ per ogni $x \in \ell^p$ e sappiamo che vale per ogni $x \in c_{00}$. Usando la densità di c_{00} in ℓ^p , quindi per ogni $x \in \ell^p$ esiste una successione $x^k \in c_{00}$ tale che $x^k \rightarrow x$ in ℓ^p . Allora

$$\varphi(x^k) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i^k \xrightarrow{k \rightarrow \infty} \varphi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i$$

dove il secondo termine ha tale limite per la disuguaglianza di Hölder, infatti

$$\varphi(x^k) = \left| \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i^k \right| < \|u\|_{p'} \|x^k\|_p \implies \varphi(x) = \left| \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i \right| \leq \|u\|_{p'} \|x\|_p \quad (2.13)$$

e ne consegue che

$$\left| \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i^k - \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i \right| \leq \|u\|_{p'} \|x^k - x\|_p \rightarrow 0$$

Ora dalla (2.13) otteniamo che $\|\varphi\|_{(\ell^p)'} \leq \|u\|_{p'}$ che insieme a (2.12) ci dà l'ultima parte della tesi $\|\varphi\|_{(\ell^p)'} = \|u\|_{p'}$ \square

Teorema 2.26

Se $\varphi \in (c_0)'$ allora esiste un $u = (u_k) \in \ell^1$ tale che

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i \quad \forall x \in c_0$$

e inoltre $\|\varphi\|_{(c_0)'} = \|u\|_1$

Osservazione. Il precedente significa che $(c_0)' \cong \ell^1$

Teorema 2.27

Se $\varphi \in c'$ allora esiste unica una coppia $(u, \lambda) \in \ell^1 \times \mathbb{R}$ tali che

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^{\infty} u_i x_i + \lambda \lim_{n \rightarrow \infty} x_n \quad \forall x \in c$$

e inoltre $\|\varphi\|_{c'} = \|u\|_1 + |\lambda|$

2.7 Funzioni a variazione limitata

Ci interessiamo ora a funzioni $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$

Definizione 2.14: funzione a variazione limitata

Una funzione $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ si dice **a variazione limitata** se presa comunque una suddivisione

$$S = \{a = x_0 < x_1 < x_2 < \cdots < x_{n-1} < x_n = b\}$$

dell'intervallo $[a, b]$ la quantità

$$v_s = \sum_{i=1}^n |f(x_{i+1}) - f(x_i)|$$

(somma delle variazioni relative ai punti di suddivisione) l'insieme dei valori v_s così ottenuti ammette un estremo superiore finito, cioè

$$\sup\{v_s : S \text{ suddivisione di } [a, b] \text{ in un numero finito di punti}\}$$

viene detto **variazione totale** di f in $[a, b]$ e si indica con $V_f([a, b])$

Esempio 2.26 (Funzioni monotone). Tutte le funzioni monotone sono a variazione limitata e inoltre

$$v_s = V_f([a, b]) = |f(b) - f(a)|$$

Esempio 2.27 (Funzioni continue?). In generale non è detto. Ad esempio la funzione $f : [0, \frac{2}{\pi}] \rightarrow \mathbb{R}$

$$f(x) = \begin{cases} x \sin \frac{1}{x} & x \neq 0 \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

ci interessa considerare i punti del tipo $\frac{1}{x} = \frac{\pi}{2} = k\pi$ quindi $x_k = \frac{1}{\frac{\pi}{2} + k\pi} = \frac{2}{\pi + 2k\pi}$ per $k = 0, \dots, n$ e la mia suddivisione è

$$S_n = \left\{0, \frac{2}{\pi + 2\pi}, \frac{2}{\pi + 4\pi}, \dots, \frac{2}{\pi + 2(n-1)\pi}, \frac{2}{\pi}\right\}$$

e quindi

$$\begin{aligned} v_{S_n} &= \sum_{k=0}^n |f(x_k) - f(x_{k+1})| + \left| f\left(\frac{2}{\pi + 2n\pi}\right) - 0 \right| = \sum_{k=0}^n \\ &= \sum_{k=0}^{n-1} \left| \frac{2}{\pi + 2k\pi} (-1)^k - \frac{2}{\pi + 2(k+1)\pi} (-1)^{k+1} \right| + \frac{2}{\pi + 2n\pi} = \\ &= \left(\frac{2}{\pi + 2k\pi} + \frac{2}{\pi + 2(k+1)\pi} \right) + \frac{2}{\pi + 2n\pi} = \frac{2}{\pi} = \frac{2}{\pi} + \sum_{k=1}^n \frac{4}{\pi + 2k\pi} \rightarrow \infty \end{aligned}$$

quindi l'estremo superiore non può essere finito.

Proposizione 2.28 (Le funzioni lipschitziane sono a variazione limitata). Sia $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ lipschitziana, ossia esiste una costante $L \in \mathbb{R}$ tale per cui

$$|f(x) - f(y)| \leq L|x - y| \quad \forall x, y \in [a, b]$$

allora f è a variazione limitata e inoltre

$$V_f([a, b]) \leq L(b - a)$$

Dimostrazione. $v_s = \sum_{i=1}^n |f(x_i) - f(x_{i-1})| \leq \sum_{i=1}^n L|x_i - x_{i-1}| \leq L(b - a)$ \square

Teorema 2.29: Caratterizzazione

Una funzione $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è a variazione limitata se e solo se può essere rappresentata come differenza di funzioni monotone non decrescenti

Osservazione. non decrescenti può essere ovviamente sostituito da non crescenti cambiando i segni.

Osservazione. Segue che le funzioni a variazione limitata possono avere un'infinità numerabile di discontinuità.

Teorema 2.30: (ennesimo) Teorema di Lebesgue

Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è a variazione limitata, allora f è derivabile quasi ovunque in $[a, b]$ e la derivata q.o. f' è sommabile in $[a, b]$

Osservazione. sommabile significa integrabile, in altre parole $f' \in L^1([a, b])$

Dimostrazione. È difficile e laboriosa e non la faremo. □

Negli esempi precedenti in effetti ad esempio le funzioni lipschitziane sono derivabili ovunque e pure le funzioni costanti. Siamo interessati all'estensione della formula fondamentale del calcolo

$$f(x) - f(a) = \int_{[a, x]} f'(t) dt \quad \forall x \in [a, b] \quad (2.14)$$

dove l'integrale possa essere inteso come integrale di Lebesgue.

Nota. La formula (2.14) è valida per funzioni continue C^1 , ma vogliamo vedere se possiamo alleggerire tale ipotesi.

Dunque le funzioni a variazione limitata potrebbero essere esattamente quelle che stiamo cercando. In realtà no. Ad esempio la funzione di Heaviside considerata in $[-1, 1]$ e a variazione limitata, H' esiste e vale 0 q.o. ma chiaramente non vale la formula (2.14), perché

$$H(1) - H(-1) = 1 \neq 0 = \int_{[-1, 1]} H'(t) dt$$

Consideriamo ora la **funzione di Vitali** che è continua e a variazione limitata, ma non verifica la formula (2.14). Ricordiamo l'insieme di cantor definito come nell'esempio 1.11 e sia χ_n la funzione caratteristica di C_n , ora sia

$$f_n(x) = \left(\frac{3}{2}\right)^n \int_0^x \chi_n(t) dt$$

Abbiamo quindi che la funzione f_n assume valori costanti sul complementare di C_n . Se I è uno degli intervalli chiusi la cui unione è C_n allora

$$\begin{aligned} \left(\frac{3}{2}\right)^n \int_I \chi_n(t) dt &= \left(\frac{3}{2}\right)^n \cdot \frac{1}{3^n} = \frac{1}{2^n} = \\ &= \left(\frac{3}{2}\right)^{n+1} \int_I \chi_{n+1}(t) dt = \left(\frac{3}{2}\right)^{n+1} \cdot 2 \frac{1}{3^{n+1}} = \frac{1}{2^n} \end{aligned}$$

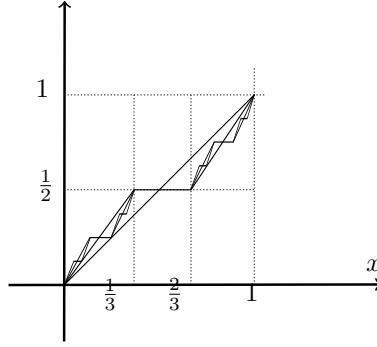


Figura 7: Funzione di Vitali

perché allora I viene suddiviso in 3 intervalli di cui il primo e il terzo vanno a comporre C_{n+1} . Abbiamo inoltre che $f_{n+1} = f_n(x) \forall x \notin C_n$ e che

$$|f_n(x) - f_{n+1}(x)| \leq \int_I \left| \left(\frac{3}{2}\right)^n \chi_n(t) - \left(\frac{3}{2}\right)^{n+1} \chi_{n+1}(t) \right| dt \leq \frac{1}{2^{n-1}}$$

Ora vediamo che

$$f_{n+1}(x) = f_0(x) + \sum_{k=1}^{n+1} (f_k(x) - f_{k-1}(x))$$

e poiché gli elementi di ogni ridotta sono maggiorati di $\frac{1}{2^{k-2}}$ allora la serie f_n converge uniformemente a una funzione limite $f(x)$ che è la funzione di Vitali.

Tale f limite è costante su ogni connesso del complementare di C l'insieme di Cantor. Inoltre f di Vitali è sicuramente continua in quanto limite uniforme di funzioni continue, non decrescente perché tutte le f_n lo sono, dunque f è a variazione limitata. f ammette derivata prima $f' = 0$ quasi ovunque (vale 0 sui punti del complementare di C). Viene anche detta “Scala del diavolo”. Una funzione di questo tipo ($f' = 0$ q.o. ma f continua e non costante) viene detta **singolare**.

Nota. anche la funzione di Vitali non verifica la formula $f(x) - f(a) = \int_{[a,x]} f'(t) dt$

La classe di funzioni che invece vogliamo noi è quella delle funzioni *assolutamente continue*.

Definizione 2.15: Assoluta continuità

$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è assolutamente continua se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste $\delta > 0$ tale che per ogni sequenza finita di intervalli $(a_i, b_i) \subseteq [a, b]$ per $i = 1, \dots, n$ disgiunti e tali che se $\sum_{i=1}^n (b_i - a_i) \leq \delta$, allora

$$\sum_{i=1}^n |f(b_i) - f(a_i)| \leq \varepsilon$$

È evidentemente una richiesta più forte dell'uniforme continuità, infatti su un compatto uniforme continuità e continuità sono equivalenti. Vale infatti chiaramente che se f è assolutamente continua allora è uniformemente continua, ma non il viceversa, infatti

Proposizione 2.31 (Assoluta continuità \implies variazione limitata). *Se f è assolutamente continua allora è a variazione limitata*

Dimostrazione. Se prendo $\varepsilon = 1$ e mi arriva un $\delta > 0$. Se prendo l'intervallo $[a, a + \delta]$ allora f è a variazione limitata in $[a, a + \delta]$. Infatti presa una suddivisione S qualunque di $[a, a + \delta]$ e considero gli intervallini (a_i, b_i) di questa suddivisione osservo allora

$$\sum_{i=1}^n (b_i - a_i) = \delta \implies \sum_{i=1}^n |f(b_i) - f(a_i)| < 1$$

Con questa idea in mente possiamo semplicemente dividere $[a, b]$ in intervalli di misura al più δ e in ognuno di questi intervalli la funzione è a variazione limitata. \square

Proposizione 2.32 (Assoluta continuità \implies esistenza derivata prima q.o.). *Se f è assolutamente continua, allora esiste la derivata prima f' di f e inoltre $f' \in L^1(a, b)$*

Proposizione 2.33 (Lipschitziana \implies Assolutamente continua).

Dimostrazione. Abbiamo che

$$\sum_{i=1}^n |f(b_i) - f(a_i)| \leq \sum_{i=1}^n L|b_i - a_i|$$

prendendo $\delta = \frac{\varepsilon}{L}$ allora abbiamo la condizione richiesta \square

Ricordando che una funzione è Hölderiana di esponente $\alpha \in (0, 1)$ se esiste una costante $H > 0$ tale che per ogni $x, y \in [a, b]$ si ha

$$|f(x) - f(y)| \leq H|x - y|^\alpha$$

Allora se f è Hölderiana non necessariamente è assolutamente continua. Un esempio è la stessa funzione di Vitali, che non è assolutamente continua (come vedremo a breve) è hölderiana di esponente $\alpha = \log_3 2 \approx 0,631$

Osservazione. Le funzioni hölderiane non sono necessariamente lipschitziane, infatti ad esempio $x \mapsto \sqrt[3]{x}$ in $[-1, 1]$ è hölderiana di esponente $\frac{1}{3}$ ma non è lipschitziana.

Teorema 2.34: Caratterizzazione funzioni assolutamente continue

$f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è assolutamente continua se e solo se è a variazione limitata e verifica la formula fondamentale del calcolo.

ne consegue che la funzione di Vitali non è assolutamente continua.

Osservazione. La caratterizzazione ha un parallelo con la caratterizzazione delle misure relative assolutamente continua, ossia che esiste una derivata di Radon-Nikodym e vale la “formula fondamentale del calcolo”.

In effetti se gli insiemi E del teorema di Radon-Nikodym sono intervalli ne esce proprio la formula fondamentale del calcolo.

Teorema 2.35: Decomposizione (tipo Radon-Nikodym-Lebesgue)

Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ è a variazione limitata, allora f si può scomporre nella somma di 3 funzioni

$$f(x) = g(x) + h(x) + s(x)$$

dove g è assolutamente continua in $[a, b]$, h è singolare oppure nulla, s è la funzione dei salti (cioè costante a tratti oppure nulla).

Osservazione. $g' = f'$ quasi ovunque in $[a, b]$, perché le altre hanno $h' = s' = 0$ q.o. Inoltre possiamo richiedere $f(a) = g(a)$

Nota. Sia h che s possono essere nulle, ad esempio $s = 0$ se f è continua in $[a, b]$

D'ora in poi chiameremo $AC(\Omega)$ lo spazio di funzioni assolutamente continue a dominio in Ω

2.8 Estensione di altre formule di integrazione

- **Integrazione per parti** La formula di integrazione per parti

$$\int_a^b f(x)g'(x)dx = f(b)g(b) - f(a)g(a) - \int_a^b f'(x)g(x)dx$$

è vera se $f, g \in AC([a, b])$

- **Integrazione per sostituzione** La formula di sostituzione

$$\int_a^b f(x)dx = \int_\alpha^\beta f(\varphi(t))\varphi'(t)dt$$

è vera se (ad esempio) f è misurabile e limitata in $[a, b]$ e $\varphi : [\alpha, \beta] \rightarrow [a, b]$ è assolutamente continua

2.9 Spazi di Sobolev

Considereremo gli spazi di Sobolev in dimensione 1 usando le funzioni di $AC([a, b])$ (non è l'approccio canonico) su un intervallo limitato $[a, b]$. Consideriamo lo spazio

$$W^{1,p}(a, b) = \{f \in AC([a, b]) : f' \in L^p(a, b)\}$$

chiaramente quindi $W^{1,1}(a, b) = AC([a, b])$ e succede che se $1 \leq p < p \leq \infty$ allora $W^{1,q}(a, b) \subseteq W^{1,p}(a, b)$ per le inclusioni tra spazi L^p quando $\mu(\Omega) < \infty$. Ne segue che il più piccolo è $W^{1,\infty}$.

Gli spazi $W^{1,p}$ sono tutti spazi vettoriali. Inoltre ci possiamo mettere una norma sopra, di solito si prende

$$\|f\|_{W^{1,p}(a,b)} = \|f\|_p + \|f'\|_p$$

in generale questa norma è presa negli spazi $W^{1,p}(\Omega)$ con Ω aperto di \mathbb{R}^N (con aggiustamenti dovuti al caso N -dimensionale). Un'altra norma comune è

$$\|f\|_{W^{1,p}(a,b)} = \left(\int_a^b |f(x)|^p dx + \int_a^b |f'(x)|^p dx \right)^{\frac{1}{p}} = (\|f\|_p^p + \|f'\|_p^p)^{\frac{1}{p}}$$

Esercizio 2.6

Verificare che entrambe le norme presentate sono effettivamente delle norme. Inoltre mostrare che se $1 \leq p < \infty$ le norme $\|\cdot\|_{W^{1,p}(a,b)}$ e $\|\cdot\|_{W^{1,p}(a,b)}$ sono equivalenti.

Sono spazi di Banach? È vero che $W^{1,2}(a, b)$ è uno spazio di Hilbert? Chiaramente quello che guessiamo essere il prodotto scalare su $W^{1,2}(a, b)$ sarebbe

$$\langle f, g \rangle = \int_a^b f(x)g(x)dx + \int_a^b f'(x)g'(x)dx \quad (2.15)$$

che avrebbe come norma associata la norma $\|\cdot\|_{W^{1,2}(a,b)}$.

Proposizione 2.36. Per ogni $p \in [1, \infty]$ esiste una costante $C_p > 0$ tale che

$$\underbrace{\|f\|_{C^0([a,b])}}_{(\|f\|_\infty)} \leq C_p \|f\|_{W^{1,p}(a,b)}$$

per ogni $f \in W^{1,p}(a,b)$

Nota. Questo significa che l'operatore di immersione $i : W^{1,p}(a,b) \rightarrow C^0([a,b])$ è limitato dunque continuo

Dimostrazione. Per $p = \infty$ il risultato è banale: basta prendere $C_\infty = 1$.

Consideriamo ora il caso $1 \leq p < \infty$ Usiamo l'assoluta continuità della $f \in W^{1,p}(a,b)$ per scrivere la formula

$$f(x) - f(y) = \int_y^x f'(t) dt \quad \forall x, y \in [a, b] \quad (2.16)$$

allora $f(x) = f(y) + \int_y^x f'(t) dt$ e quindi

$$|f(x)| \leq |f(y)| + \int_y^x |f'(t)| dt$$

ora integro rispetto a y entrambi i termini ottenendo

$$(b-a)|f(x)| \leq \int_a^b |f(y)| dy + (b-a) \int_a^b |f'(t)| dt$$

Ora usiamo la disuguaglianza di Hölder 2.7

$$(b-a)|f(x)| \leq \|f\|_p \|1\|_{p'} + (b-a) \|f'\|_p \|1\|_{p'}$$

e poiché $\|1\|_p = \left(\int_a^b dt \right)^{\frac{1}{p}} = (b-a)^{\frac{1}{p}}$ abbiamo

$$|f(x)| \leq \underbrace{(b-a)^{\frac{1}{p'}-1}}_{=\frac{1}{(b-a)^{1/p}}} \|f\|_p + (b-a)^{\frac{1}{p'}} \|f'\|_p$$

Ora prendendo

$$C_p = \max \left\{ \frac{1}{(b-a)^{\frac{1}{p}}}, (b-a)^{\frac{1}{p'}} \right\}$$

abbiamo che finalmente

$$\|f\|_\infty = \sup_{x \in [a,b]} |f(x)| \leq C_p (\|f\|_p + \|f'\|_p)$$

□

Teorema 2.37: Completezza di $W^{1,p}(a,b)$

$W^{1,p}(a,b)$ è uno spazio di Banach. In particolare $W^{1,2}(a,b)$ è uno spazio di Hilbert, con il prodotto scalare (2.15) e la norma $\|\cdot\|_{W^{1,2}(a,b)}$.

Dimostrazione. Sia $\{f_n\}$ di Cauchy in $W^{1,p}(a,b)$, dunque $\|f_n - f_m\|_{W^{1,p}(a,b)} \rightarrow 0$ per $n, m \rightarrow \infty$. Ma allora abbiamo

$$\begin{aligned}\|f_n - f_m\|_p &\rightarrow 0 \\ \|f'_n - f'_m\|_p &\rightarrow 0 \\ \|f_n - f_m\|_{C^0(a,b)} &\rightarrow 0\end{aligned}$$

per $n, m \rightarrow \infty$ dove per la terza si è usata la proposizione (2.36). Ne consegue che f_n e f'_n sono di Cauchy in $L^p(a,b)$, essendo L^p completo allora esistono $f, g \in L^p(a,b)$ tali che $f_n \rightarrow f$ e $f'_n \rightarrow g$ in $L^p(a,b)$. Inoltre f_n è di Cauchy in $C^0(a,b)$ e quindi esiste $h \in C^0([a,b])$ tale che $f_n \rightarrow h$ in $C^0([a,b])$. Siccome la convergenza in C^0 è uniforme allora implica la convergenza in $L^p(a,b)$ e allora $h = f$ q.o. e vogliamo mostrare che vale anche $f' = g$ q.o.

Sappiamo che

$$f_n(x) = f_n(a) + \int_a^x f'_n(t) dt$$

per ogni $x \in [a,b]$. Passando al limite per $n \rightarrow \infty$ abbiamo

$$f(x) = f(a) + \int_a^x g(t) dt \quad \forall x \in [a,b] \quad (2.17)$$

dove le prime due sono per la convergenza in C^0 e l'ultima poiché $\int_a^b f'_n(t) dt = \int_{[a,b]} \chi_{[a,x]} f'_n$ e poiché $f'_n \rightarrow g$ in L^p e chiaramente $\chi_{[a,x]} \rightarrow \chi_{[a,x]}$ in $L^{p'}$. Da (2.17) otteniamo che necessariamente $f' = g$. Quindi poiché vale la formula fondamentale del calcolo, f è assolutamente continua, e abbiamo già detto $f' \in L^1([a,b])$, quindi $f \in W^{1,p}(a,b)$ \square

Proposizione 2.38 ($f \in W^{1,p}(a,b)$, allora f hölderiana). *Se $f \in W^{1,p}(a,b)$, dove $1 < p \leq \infty$, allora f è Hölderiana di esponente $\alpha = 1 - \frac{1}{p} = \frac{1}{p'}$*

Dimostrazione. Da (2.16) e dalla proposizione 1.24 otteniamo che, supponendo WLOG $x > y$

$$|f(x) - f(y)| = \left| \int_y^x f'(t) dt \right| \leq \int_y^x |f'(t)| dt = \|f'\|_1$$

Allora per la disuguaglianza di Hölder 2.7 otteniamo

$$|f(x) - f(y)| \leq \|1 \cdot f'\|_1 \leq \|1\|_{p'} \|f'\|_p = |x - y|^{\frac{1}{p'}} \|f'\|_p$$

per ogni $x, y \in [a,b]$ \square

Osservazione. Per $p = 1$ la proposizione non vale, e in effetti nella dimostrazione si avrebbe $\|1\|_{p'} = \|1\|_\infty = 1$. In effetti possiamo vedere il controesempio

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\log x} & x \in (0, \frac{1}{2}] \\ 0 & x = 0 \end{cases}$$

che è assolutamente continua, quindi $f \in W^{1,1}(0,1)$ ma non è Hölderiana in 0, infatti per ogni $\alpha > 0$ si ha che

$$\frac{f(x)}{x^\alpha} = \frac{1}{x^\alpha \log x} = \frac{x^{-\alpha}}{\log x} \underset{x \rightarrow 0}{\sim} \frac{-\alpha x^{-\alpha-1}}{x^{-1}} = -\frac{\alpha}{x^\alpha} \rightarrow \infty \text{ per } x \rightarrow 0$$

eppure è assolutamente continua in quanto C^1 in ogni intervallo $[\delta, 1/2]$ con $\delta > 0$.

Nota. Per $p = \infty$ si ottiene che f è 1-Hölderiana, cioè lipschitziana.

Lo spazio $C^{0,1}([a, b])$ delle funzioni lipschitziane su $[a, b]$ coincide con lo spazio $W^{1,\infty}(a, b)$ cioè la derivata quasi ovunque di una funzione lipschitziana non solo è integrabile ma è anche essenzialmente limitata, cioè è in $L^\infty([a, b])$.

Per $N > 1$ le cose sono più complicate, bisogna guardare come si comportano i gradienti invece che le derivate, ad esempio.

2.10 Proiezioni in spazi di Hilbert

Sul piano euclideo $H = \mathbb{R}^2$ possiamo considerare la proiezione intuitiva di un punto z su un insieme convesso e chiuso K come il punto di K più vicino a z , come in figura 8. È importante notare che abbiamo preso $z \notin K$ altrimenti, la proiezione

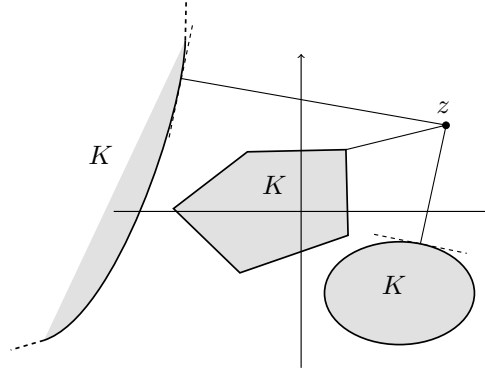


Figura 8: Proiezioni su spazi K convessi e chiusi

sarebbe lo stesso punto z

Teorema 2.39: delle Proiezioni

Sia H uno spazio di Hilbert e sia $K \subseteq H$ un sottoinsieme non vuoto, convesso e chiuso di H . Allora per ogni $f \in H$ esiste unico un punto $u \in K$ tale che

$$\|u - f\| = \min_{v \in K} \|v - f\| \quad (2.18)$$

inoltre tale u è anche l'unica soluzione della disuguaglianza variazionale

$$\Re(\langle u - f, u - v \rangle) \leq 0 \quad \forall v \in K \quad (2.19)$$

Definizione 2.16: Proiezione

Il punto u del teorema 2.39 è detto proiezione di f su K e si indica con $P_K(f)$

Per la dimostrazione, riassumiamo il teorema 2.39 come esistenza e unicità della soluzione di (2.18) e (2.19) e uguaglianza di tali soluzioni, e a tale scopo articoliamo la dimostrazione nei seguenti passaggi

1. Esistenza della soluzione di (2.18)
2. u soluzione di (2.18) risolve anche (2.19)
3. u soluzione di (2.19) risolve anche (2.18)
4. La soluzione di (2.19) è unica

Passo 1: Esistenza della soluzione di (2.18). Costruiamo una successione minimizzante.

$$\lambda = \inf_{v \in K} \|f - v\| \text{ esiste ed è } \geq 0$$

Ora $\forall n \in \mathbb{N}$ esiste $v_n \in K$ tale che

$$\lambda \leq \|f - v_n\| \leq \lambda + \frac{1}{n}$$

e vogliamo provare che v_n è di Cauchy in H . Infatti prendendo $x = f - v_n$ e $y = f - v_m$ possiamo applicare la regola del parallelogramma 2.14 ottenendo

$$\begin{aligned} \|2f - v_n - v_m\|^2 + \|v_n - v_m\|^2 &= 2\|f - v_n\|^2 + 2\|f - v_m\|^2 \\ 4\left\|f - \frac{v_n + v_m}{2}\right\|^2 + \|v_n - v_m\|^2 &= 2\|f - v_n\|^2 + 2\|f - v_m\|^2 \end{aligned}$$

dove $\frac{v_n + v_m}{2}$ è il punto medio del segmento di estremi v_n e v_m e poiché K è convesso, $\frac{v_n + v_m}{2} \in K$ e quindi $\|f - \frac{v_n + v_m}{2}\| \geq \lambda$. Allora la precedente uguaglianza diventa

$$\begin{aligned} \frac{1}{4}\|v_n - v_m\|^2 &= \frac{1}{2}\|f - v_n\|^2 + \frac{1}{2}\|f - v_m\|^2 - \left\|f - \frac{v_n + v_m}{2}\right\|^2 \leq \\ &\leq \frac{1}{2}\left(\lambda + \frac{1}{n}\right)^2 + \frac{1}{2}\left(\lambda + \frac{1}{m}\right)^2 - \lambda^2 = \\ &= \frac{\lambda}{n} + \frac{\lambda}{m} + \frac{1}{2n^2} + \frac{1}{2m^2} \rightarrow 0 \text{ per } n, m \rightarrow \infty \end{aligned}$$

quindi v_n è di Cauchy, e siccome H è completo, v_n converge a $u \in H$ e siccome K è chiuso, $u \in K$. Abbiamo ora che $\|f - v_n\| \rightarrow \|f - u\|$ per continuità della norma e d'altra parte la norma di $\|f - v_n\| \rightarrow \lambda$ per costruzione, e per l'unicità del limite ne concludiamo che $\|f - u\| = \lambda$ che quindi è il minimo cercato. \square

Passo 2: u sol. (2.18) $\implies u$ sol. (2.19). Sappiamo per ipotesi che $\|u - f\| \leq \|w - f\|$ per ogni $w \in K$, e prendo $w = tv + (1 - t)u$ per $t \in [0, 1]$ e $v \in K$, allora w è la combinazione convessa di u e v che siccome K è convesso sta in K . Allora

$$\begin{aligned} \cancel{\|u - f\|^2} &\leq \|w - f\|^2 = \|tv + (1 - t)u - f\|^2 = \|t(v - u) + u - f\|^2 \\ &= \langle t(v - u) + u - f, t(v - u) + u - f \rangle = \\ &= t^2\|v - u\|^2 + 2t\Re(\langle v - u, u - f \rangle) + \cancel{\|u - f\|^2} \\ \implies 0 &\leq t^2\|v - u\|^2 + 2t\Re(\langle u - f, v - u \rangle) \quad \forall t \in (0, 1] \end{aligned}$$

dove abbiamo specificato che vale per $t \in (0, 1]$ in modo da poter dividere per t ottenendo

$$0 \leq t\|v - u\|^2 + 2\Re(\langle u - f, v - u \rangle)$$

e passando al limite per $t \rightarrow 0^+$ otteniamo la disuguaglianza

$$0 \leq 2\Re(\langle u - f, v - u \rangle) \iff \Re(\langle u - f, u - v \rangle) \leq 0$$

che è esattamente la (2.19) \square

Passo 3: u sol. (2.19) $\implies u$ sol. (2.18). Vogliamo provare la seguente uguaglianza:

$$\|u - f\|^2 - \|v - f\|^2 = 2\Re(\langle f - u, v - u \rangle) - \|u - v\|^2 \quad \forall v \in K$$

e da qui concludiamo facilmente in quanto il secondo membro è sempre non positivo essendo u soluzione di (2.19). Allora anche il primo membro è ≤ 0 e dunque u risolve (2.18).

Abbiamo che

$$\|v - f\|^2 = \|(u - f) - (u - v)\|^2 = \|u - f\|^2 + \|u - v\|^2 - 2\Re(\langle u - f, u - v \rangle)$$

che è esattamente l'eguaglianza richiesta \square

Passo 4: unicità sol. (2.19). Siano u_1, u_2 due soluzioni di (2.19):

$$\Re(\langle u_1 - f, u_1 - v \rangle) \leq 0 \quad \text{e} \quad \Re(\langle u_2 - f, u_2 - v \rangle) \leq 0 \quad \forall v \in K$$

Allora poniamo nella prima $v = u_2$ e nella seconda $v = u_1$ ottenendo

$$\Re(\langle u_1 - f, u_1 - u_2 \rangle) \leq 0 \quad \text{e} \quad \Re(\langle f - u_2, u_1 - u_2 \rangle) \leq 0$$

da cui per linearità del prodotto scalare nel primo termine otteniamo $\|u_1 - u_2\| \leq 0$ e quindi $u_1 = u_2$ \square

Osservazione. Se K non fosse chiuso, allora la proiezione potrebbe non esistere. Sia ad esempio $K = x^2 + y^2 < 1$ sul piano Oxy e un punto f al di fuori di K , allora qualunque u io prenda in K , esiste sempre $\bar{u} \in K$ tale che $\|\bar{u} - f\| < \|u - f\|$.

Se K non fosse convesso, allora la proiezione potrebbe non essere unica. Sempre in \mathbb{R}^2 prendiamo come $K = x^2 + y^2 = 1$ ossia la circonferenza unitaria. Allora se prendiamo $f = (0, 0)$ abbiamo che ogni punto di K è proiezione.

Nello spazio H , con K chiuso e non vuoto, posso considerare l'operatore $P_K : f \mapsto P_K(f)$. Allora $P_K|_K = \text{Id}$ e in generale $P_K(H) = K$. L'operatore P_K non è lineare, infatti se $K = \{z\}$, con $z \in H \setminus \{0_H\}$ abbiamo che $P_K(f) = z$ è costante e diverso da 0_H quindi non è lineare. P_K è però continuo, infatti è lipschitziano di costante 1: siano $f_1, f_2 \in H$, sia $u_1 = P_K(f_1)$ e $u_2 = P_K(f_2)$. Allora, procedendo in modo simile al passo 4 della dimostrazione del teorema 2.39 otteniamo

$$\begin{aligned} & \Re(\langle u_1 - f_1 + f_2 - u_2, u_1 - u_2 \rangle) \leq 0 \iff \\ \iff & \Re(\langle u_1 - u_2, u_1, u_2 \rangle) + \Re(\langle f_2 - f_1, u_1 - u_2 \rangle) \leq 0 \iff \\ \iff & \|u_1 - u_2\|^2 \leq |\langle f_1 - f_2, u_1 - u_2 \rangle| = \|f_1 - f_2\| \|u_1 - u_2\| \end{aligned}$$

da cui otteniamo che, se $u_1 \neq u_2$, $\|u_1 - u_2\| \leq \|f_1 - f_2\|$ e quindi P_K è lipschitziano di costante 1.

Ne concludiamo che P_K è **non espansivo**, ossia o contrae oppure lascia inalterate le distanze. Non è una contrazione, si consideri l'esempio della figura 9

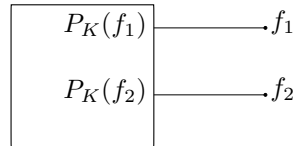


Figura 9: K è un quadrato chiuso nel piano H

Esercizio 2.7 Es. 2 del 10 marzo 2020

Posto $\varphi(x) = x^2$ e $\psi(x) = x$ per $x \in [0, 1]$ andiamo a considerare

$$C = \{v \in L^2([0, 1]) : \varphi(x) \leq v(x) \leq \psi(x) \quad \text{q.o. in } [0, 1]\}$$

a. Mostrare che C è un convesso chiuso e non vuoto di L^2

C è non vuoto perché ad esempio $\varphi, \psi \in C$.

Siano $u, v \in C$ e $t \in [0, 1]$ allora

$$\varphi = t\varphi + (1-t)\varphi \leq tu + (1-t)v \leq t\psi + (1-t)\psi = \psi$$

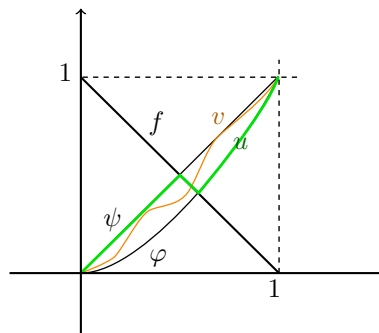
e quindi $tu + (1-t)v \in C$.

Inoltre C è chiuso in L^2 in quanto se $\{v_n\} \subseteq C$ è una successione convergente in L^2 a v allora esiste una sottosuccessione $\{v_{n_k}\}$ che converge q.o. a v e quindi sapendo $\varphi \leq v_{n_k} \leq \psi$ q.o. otteniamo che $\varphi \leq v \leq \psi$ q.o. e quindi $v \in C$.

- b. Se $f(x) = 1 - x$, con $x \in [0, 1]$ allora determinare $P_C(f)$ e giustificare la risposta.

La proiezione $u = P_C(f)$ è l'elemento di C che realizza la minima distanza da f in norma L^2 . In particolare verifica la disuguaglianza variazionale

$$\begin{aligned} \langle u - f, u - v \rangle &= \\ &= \int_0^1 (u - f)(u - v) dx \leq 0 \quad \forall v \in C \end{aligned}$$



Volendo provare a fare un guess di possibile proiezione, notiamo che un tratto della funzione f è contenuto in C (detto malissimo), quindi un buon tentativo di soluzione è la funzione $u : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ data da

$$u(x) = \begin{cases} \psi(x) & f(x) > \psi(x) \\ f(x) & \varphi(x) \leq f(x) \leq \psi(x) \\ \varphi(x) & f(x) < \varphi(x) \end{cases} = \begin{cases} \psi(x) & x \in (0, \frac{1}{2}) \\ f(x) & x \in [\frac{1}{2}, \frac{-1+\sqrt{5}}{2}] \\ \varphi(x) & x \in (\frac{-1+\sqrt{5}}{2}, 1) \end{cases}$$

poiché $f(x) = \varphi(x) \iff x = 1/2$ e $f(x) = \psi(x) \iff x = (-1 + \sqrt{5})/2$. Vogliamo vedere se la funzione g soddisfa la disuguaglianza variazionale (2.19):

$$\begin{aligned} \int_0^1 (u - f)(u - v) dx &= \int_0^{1/2} \underbrace{(\psi - f)}_{<0} \underbrace{(\psi - v)}_{\geq 0} dx + \\ &+ \int_{1/2}^{(-1+\sqrt{5})/2} \underbrace{(f - f)}_{=0} (f - v) dx + \int_{(-1+\sqrt{5})/2}^1 \underbrace{(\varphi - f)}_{>0} \underbrace{(\varphi - v)}_{\leq 0} dx \end{aligned}$$

quindi tutti gli addendi sono non positivi e dunque la disuguaglianza è verificata e per unicità $P_C(f) = u$

In particolare fra i convessi vi sono anche i sottospazi, e possiamo in tal caso ottenere qualcosa in più

Teorema 2.40: Proiezioni per sottospazi

Sia H uno spazio di Hilbert e $K \subseteq H$ un sottospazio chiuso. Allora per ogni

$f \in H$ esiste unica $u \in K$ tale che

$$\|f - u\| \leq \|f - v\| \quad \forall v \in K$$

Inoltre tale u è anche l'unica soluzione dell'**uguaglianza** variazionale

$$\langle u, v \rangle = \langle f, v \rangle \quad \forall v \in K \quad (2.20)$$

Osservazione. La u è quell'elemento di K che replica tutti i prodotti scalari di f con gli elementi di K

Dimostrazione. So già che vale (2.18) e (2.19), allora in (2.19) poniamo $w = u \pm v$, con $v \in K$ e sappiamo $w \in K$ poiché è un sottospazio. Allora otteniamo

$$\Re(\langle u - f, \mp v \rangle) \leq 0 \iff \mp \Re(\langle u - f, v \rangle) \iff \Re(\langle u - f, v \rangle) = 0 \quad \forall v \in K$$

supponendo di essere in ambito complesso, prendiamo ora $w = u \pm iv$, allora

$$\Re(\langle u - f, \mp iv \rangle) \leq 0 \iff \Re(\pm i \langle u - f, v \rangle) = \mp \Im(\langle u - f, v \rangle) \leq 0$$

e di nuovo quindi otteniamo $\Im(\langle u - f, v \rangle) = 0$ per ogni $v \in K$ e quindi anche la parte immaginaria è nulla. Ne consegue

$$\langle u - f, v \rangle = \langle u, v \rangle - \langle f, v \rangle = 0 \quad \forall v \in K$$

□

Osservazione. Se $K \subseteq H$ è un sottospazio chiuso, allora l'operatore P_K di proiezione è **lineare**, infatti sappiamo che, date $f, g \in H$

$$\langle P_K(f), v \rangle = \langle f, v \rangle \quad \langle P_K(g), v \rangle = \langle g, v \rangle \quad \forall v \in K$$

dalle quali otteniamo, per $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$

$$\langle \alpha P_K(f) + \beta P_K(g), v \rangle = \langle \alpha f + \beta g, v \rangle \quad \forall v \in K$$

ma poiché l'unico elemento di K che replica tutti i prodotti scalari di $\alpha f + \beta g$ con gli elementi di K è $P_K(\alpha f + \beta g)$ otteniamo

$$P_K(\alpha f + \beta g) = \alpha P_K(f) + \beta P_K(g)$$

ossia P_K è lineare.

Osservazione. Se K è sottospazio chiuso allora $P_K \in \mathcal{L}(H, H)$ e inoltre $\|P_K\| = 1$ se K contiene almeno un elemento $z \neq 0$ (basta osservare che $P_K(z) = z$) $\|P_K\| = 0$ se $K = \{0_H\}$

Esercizio 2.8 Es. 4 del 13 gennaio 2020

$$C = \left\{ v \in L^2(\mathbb{R}) : \int_{(-1,1)} v d\mu = 0 \right\}$$

a) Mostrare che C è sottoinsieme di $L^1(0,1)$. Dimostrare che C è sottospazio chiuso di $L^2(0,1)$.

Siccome $(0,1)$ ha misura finita, allora $L^2(0,1) \subseteq L^1(0,1)$.

Presi $v, w \in C$ e $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ allora

$$\int_{(0,1)} \alpha v + \beta w d\mu = \alpha \int_{(0,1)} v d\mu + \beta \int_{(0,1)} w d\mu = 0$$

e quindi $\alpha v + \beta w \in C$. Inoltre poiché $M : v \mapsto \int_{(0,1)} v d\mu$ è un operatore continuo (esempio 2.20) e $C = M^{-1}\{0\}$ è la controimmagine del chiuso $\{0\}$ e quindi è chiuso.

b) Con $f(x) = \ln \frac{1}{x}$, $x \in (0, 1)$. Mostrare che $f \in L^2(0, 1)$ e trovare $P_C(f)$.

$f(x) = -\ln x = |\ln x|$. Abbiamo che $|\ln(x)|^2 \leq c/\sqrt{x}$ infatti se $h(x) = \sqrt{x}|\ln x|^2$ allora $\lim_{x \rightarrow 0^+} h(x) = 0$ e $h(1) = 0$ quindi $|\ln x|^2 \leq \|h\|_\infty/\sqrt{x}$ che sta in $L^1(0, 1)$ e quindi $f \in L^2(0, 1)$. Per la proiezione $P_C(f)$ come nell'esercizio precedente ipotizziamo un risultato plausibile e poi la controlliamo con l'uguaglianza variazionale. In particolare quindi vogliamo trovare $u \in C$ tale che

$$\int_{(0,1)} uv d\mu = \int_{(0,1)} fv d\mu \quad \forall v \in C$$

notando che $\int_{(0,1)} -\ln x d\mu = 1$ possiamo provare a prendere $u(x) = f(x) - 1 = -\ln x - 1 \in C$ e otteniamo

$$\begin{aligned} \int_{(0,1)} \cancel{-\ln x \cdot v} d\mu - \int_{(0,1)} v d\mu &= \int_{(0,1)} \cancel{-\ln x \cdot v} d\mu \\ \iff \int_{(0,1)} v d\mu &= 0 \quad \text{vero } \forall v \in C \end{aligned}$$

quindi $P_C(f) = u$

2.11 Sottospazi ortogonali

Sia H uno spazio di Hilbert, $S \subseteq H$ un sottoinsieme non vuoto. Allora definiamo

$$S^\perp = \{x \in H : \langle x, y \rangle = 0 \quad \forall y \in S\}$$

ovviamente $0_H \in S^\perp$ ma inoltre S^\perp è sottospazio di H , infatti presi $u, v \in S^\perp$ e $\alpha, \beta \in \mathbb{K}$ allora

$$\langle \alpha u + \beta v, y \rangle = \alpha \langle u, y \rangle + \beta \langle v, y \rangle = 0 + 0 = 0 \quad \forall y \in S$$

Inoltre S^\perp è chiuso in H in quanto intersezione di chiusi (le controimmagini di 0 tramite $x \mapsto \langle x, y \rangle$ che è continuo al variare di $y \in S$).

Partendo da un sottoinsieme S qualunque di H abbiamo quindi che S^\perp è un sottospazio chiuso.

Teorema 2.41: Decomposizione ortogonale

Sia H uno spazio di Hilbert e sia $K \subseteq H$ un sottospazio chiuso. Allora per ogni $f \in H$ esistono $u \in K, v \in K^\perp$ tale che $f = u + v$ e tale rappresentazione è unica.

Osservazione. Si scrive allora $H = K \oplus K^\perp$ e si dice che H è la **somma diretta** di K e K^\perp .

Osservazione. Partendo da un sottoinsieme $S \subseteq H$ qualsiasi, abbiamo che $S^\perp \ni 0_H$. Se però ora parto da K sottospazio chiuso, allora anche $0_H \in K$ allora in realtà $K \cap K^\perp = \{0\}$, infatti se $z \in K \cap K^\perp$ allora $\langle z, z \rangle = 0$ e quindi $z = 0_H$.

Dimostrazione. Dato $f \in H$ prendiamo $u = P_K(f) \in K$. Ora posto $v = f - u$ controllo che $v \in K^\perp$. In effetti

$$\langle v, y \rangle = \langle f - u, y \rangle = \langle f, y \rangle - \langle u, y \rangle = 0 \quad (2.20)$$

e quindi $v \in K^\perp$, quindi $H = K + K^\perp$.

Per l'unicità, supponiamo che esistano $u_1, u_2 \in K, v_1, v_2 \in K^\perp$ tali che

$$H \ni f = u_1 + v_1 = u_2 + v_2 \implies \underbrace{u_1 - u_2}_{\in K} = \underbrace{v_2 - v_1}_{\in K^\perp}$$

ma allora $u_1 - u_2 = v_1 - v_2 = 0_H$ e quindi $u_1 = u_2, v_1 = v_2$ \square

Osservazione. Data $f \in H$, abbiamo $f = P_K(f) + P_{K^\perp}(f)$ perché $K = (K^\perp)^\perp$ (se e solo se K è **sottospazio chiuso**)

Esempio 2.28. In \mathbb{R}^2 i sottospazi chiusi sono $\{0\}, \mathbb{R}^2$ e le rette passanti per l'origine. Se ora $K = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 2x + 3y = 0\}$ allora $K^\perp = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 : 3x - 2y = 0\}$ è la retta perpendicolare.

Esempio 2.29. Preso $H = L^2(0, 1)$ e $C = \{v \in L^2(0, 1) : \int_{(0,1)} v d\mu = 0\}$. Allora C^\perp consiste di tutte le funzioni $u \in L^2(0, 1)$ tali che $\int_{(0,1)} u \cdot v d\mu = 0$ per ogni $v \in C$. Se u è una funzione costante, allora chiaramente $u \in C^\perp$. Allora C^\perp è costituito solo dalle costanti? Sì perché presa una $f \in L^2(0, 1)$ la si può scomporre in $f_0 + k$, con $k = \int_{(0,1)} f d\mu$ ($L^2 \subseteq L^1$ perché $\mu(0, 1) < +\infty$) e $f_0 = f - k$. Allora k è costante e $f_0 \in C$ e quindi se K è il sottospazio delle costanti $L^2(0, 1)$ abbiamo che $H = C \oplus K$ e $K \subseteq C^\perp$, dunque $K = C^\perp$.

Lemma 2.42. Se H è uno spazio prehilbertiano e fissiamo $y \in H$, allora l'applicazione

$$L_y = H \ni x \mapsto \langle x, y \rangle \in \mathbb{K}$$

è un funzionale lineare e continuo su H .

Inoltre $\|L_y\|_{H'} \leq \|y\|$

Dimostrazione. È lineare perché il prodotto scalare è lineare, ed è continuo per la disuguaglianza di Schwarz (Teorema 2.12). Diretta conseguenza è che la norma di L_y è minore o uguale a $\|y\|$ \square

Quindi per ogni elemento $y \in H$ si costruisce un elemento $L_y \in H'$. Il seguente teorema ci dice che vale anche il viceversa.

Teorema 2.43: di Riesz

Sia H uno spazio di Hilbert. Allora per ogni $L \in H'$ esiste unico un elemento $y \in H$ tale che $L(x) = \langle x, y \rangle$ per ogni $x \in H$. Inoltre vale l'uguaglianza

$$\|L\|_{H'} = \|y\|_H$$

Osservazione. Grazie a questo teorema possiamo dire che in uno spazio di Hilbert, abbiamo che $H \cong H'$

Nota. Abbiamo già incontrato un risultato simile negli spazi ℓ^p , trovando che $(\ell^p)' = (\ell^p)'$ per $p < +\infty$. In particolare avevamo trovato che $(l^2)' = l^2$, che potrebbe essere provato anche con il teorema di Riesz, in quanto l^2 è uno spazio di Hilbert.

Dimostrazione. Per l'**unicità**, supponiamo esistano $y_1, y_2 \in H$ tali che

$$L(x) = \langle x, y_1 \rangle = \langle x, y_2 \rangle \quad \forall x \in H$$

e allora sottraendo troviamo $\langle x, y_1 - y_2 \rangle = 0$ per ogni $x \in H$. Prendendo ora $x = y_1 - y_2$ otteniamo che $\|y_1 - y_2\| = 0$ e quindi $y_1 = y_2$.

Per l'**esistenza**, definiamo

$$N = \{x \in H : L(x) = 0\} = \ker L$$

Allora N è non vuoto, in quanto chiaramente $0_H \in N$ ed è un sottospazio chiuso di H . Infatti è chiuso in quanto controimmagine di $\{0\}$ tramite L che è continuo ed è sottospazio perché L è lineare. Si presentano due casi allora

1. $N = H \implies L$ è il funzionale nullo e quindi $y = 0_H$
2. $N \neq H \implies$ esiste uno $z \in N^\perp$ e tale che $\|z\| = 1$. Infatti se $N \not\neq g \in H$ allora consideriamo $P_N(g) \neq g$ e possiamo allora fissare $z = \frac{g - P_N(g)}{\|g - P_N(g)\|}$. È chiaramente vero che $z \in N^\perp$ per il teorema 2.41 e inoltre $\|z\| = 1$. Ora mostriamo che $y = \overline{L(z)}z$ è l'elemento cercato, ossia vogliamo mostrare che

$$L(x) = \langle x, y \rangle = \langle x, \overline{L(z)}z \rangle \quad \forall x \in H \quad (2.21)$$

Se $x \in N$ allora (2.21) è banalmente vera in quanto $L(x) = 0 = \langle x, z \rangle$ perché $z \in N^\perp$.

Se invece $x = \lambda z$, con $\lambda \in \mathbb{K}$ allora

$$L(\lambda z) = \lambda L(z) = \lambda L(z) \|z\|^2 = \langle \lambda z, \overline{L(z)}z \rangle$$

e quindi anche in questo caso vale (2.21). Ora mostriamo che $H = N \oplus \langle z \rangle$ e ne conseguirà la tesi per linearità. Infatti per ogni $x \in H$ abbiamo

$$x = \underbrace{\left(x - \frac{L(x)}{L(z)}z\right)}_{=: x_N} + \underbrace{\frac{L(x)}{L(z)}z}_{=: \lambda} z$$

e $L(x_N) = L(x) - \frac{L(x)}{L(z)}L(z) = 0$, quindi $x \in N$. Poiché $\langle z \rangle \subseteq N^\perp$ allora $N^\perp = \langle z \rangle$ e quindi $H = N \oplus \langle z \rangle$.

Per l'**uguaglianza delle norme**, abbiamo che

$$\|L\|_{H'} = \sup_{x \neq 0} \frac{|L(x)|}{\|x\|} = \sup_{x \neq 0} \frac{|\langle x, y \rangle|}{\|x\|} \leq \sup_{x \neq 0} \frac{\|x\|_H \|y\|_H}{\|x\|_H} = \|y\|_H$$

per l'altra disuguaglianza, prendiamo $x = y$ ottenendo

$$\|y\|^2 = |\langle y, y \rangle| = |L(y)| \leq \|L\|_{H'} \|y\| \implies \|y\| \leq \|L\|_{H'}$$

□

2.12 Serie di Fourier

Definizione 2.17: Sistema ortonormale

Sia H uno spazio prehilbertiano. Una successione $\{e_n\}$ di elementi di H si dice sistema **ortonormale** (o successione ortonormale) se $\langle e_i, e_j \rangle = \delta_{ij}$ per ogni $i, j \in \mathbb{N}$

\mathbb{N} , con δ_{ij} la delta di Kronecker.

Quindi la precedente definizione significa che gli e_n sono tutti di norma unitaria e sono tutti ortogonali tra loro.

Esempio 2.30. In ℓ^2 gli elementi della base canonica

$$e^k = (0, \dots, 0, \overset{(k)}{1}, 0, \dots)$$

costituiscono un sistema ortonormale.

Osservazione. Se il mio spazio H ha dimensione finita, allora i sistemi ortonormali di questo spazio saranno formati al più da una sequenza di n elementi, con $n = \dim H$ e in tal caso formano una base di H . In H con dimensione infinita si possono invece prendere successioni ortonormali.

Definizione 2.18: Serie di Fourier

Dato un sistema ortonormale $\{e_n\} \subseteq H$ allora per ogni $x \in H$ si potranno considerare i valori

$$\langle x, e_k \rangle, \quad k \in \mathbb{N} \quad \text{coefficienti di Fourier}$$

e la serie

$$\sum_{k=1}^{\infty} \langle x, e_k \rangle e_k \quad \text{serie di Fourier di } x \in H$$

Vi sono almeno due problemi di interesse: la serie di Fourier converge? Se converge, qual è la sua somma? Tenteremo di rispondere a queste domande.

Proposizione 2.44 (Disuguaglianza di Bessel). *Sia H uno spazio di Hilbert, $\{e_n\} \subseteq H$ un sistema ortonormale. Allora*

1. Per ogni $x \in H$ e per ogni $n \in \mathbb{N}$ si ha

$$\left\| x - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k \right\|^2 = \|x\|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2 \quad (2.22)$$

2. Vale la disuguaglianza di Bessel

$$\sum_{k=1}^{\infty} |\langle x, e_k \rangle|^2 \leq \|x\|^2 \quad (2.23)$$

3. Per ogni elemento $c = (c_k)$ successione di scalari vale

$$\sum_{k=1}^{\infty} c_k e_k \text{ converge in } H \iff c \in \ell^2 \quad (2.24)$$

Dimostrazione. La 2. discende in modo immediato da 1. in quanto tutte le ridotte della serie differiscono da $\|x\|^2$ per una quantità non negativa. Proviamo dunque 1.

$$\begin{aligned}
\left\| x - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k \right\|^2 &= \left\langle x - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k, x - \sum_{j=1}^n \langle x, e_j \rangle e_j \right\rangle = \\
&= \langle x, x \rangle - \sum_{j=1}^n \overline{\langle x, e_j \rangle} \langle x, e_j \rangle - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle \langle e_k, x \rangle + \sum_{k,j=1}^n \langle x, e_k \rangle \overline{\langle x, e_j \rangle} \langle e_k, e_j \rangle = \\
&= \|x\|^2 - \sum_{j=1}^n |\langle x, e_j \rangle|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2 + \sum_{(k=i)=1}^n \langle x, e_k \rangle \overline{\langle x, e_j \rangle} = \\
&= \|x\|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2
\end{aligned}$$

Ci rimane dunque da provare 3. $\sum_{k=1}^{\infty} c_k e_k$ converge in H se e solo se la serie è di Cauchy in H cioè se

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \bar{k} \in \mathbb{N} : \forall n \geq \bar{k}, j \geq 0 \text{ si ha } \underbrace{\left\| \sum_{k=n}^{n+j} c_k e_k \right\|^2}_{\text{differenza di due ridotte}} < \varepsilon$$

Allora poiché

$$\left\| \sum_{k=n}^{n+j} c_k e_k \right\|^2 = \left\langle \sum_{k=n}^{n+j} c_k e_k, \sum_{i=n}^{n+j} c_i e_i \right\rangle = \sum_{k=n}^{n+j} |c_k|^2$$

abbiamo che la precedente condizione di Cauchy richiede che la serie $\sum_{k=1}^{\infty} |c_k|^2$ sia di Cauchy, e questa converge se e solo se $c \in \ell^2$ \square

Osservazione. Questa proposizione ci dice già che la serie di Fourier 2.12 converge in H siccome la successione numerica data da $\langle x, e_k \rangle$ è in ℓ^2 (per la disuguaglianza di Bessel (2.23))

Proposizione 2.45. Sia H uno spazio di Hilbert e sia $\{e_n\}$ un sistema ortonormale in H . Allora posto $V_n = \text{span}\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, con $n \in \mathbb{N}$ si ha che

$$P_{V_n}(x) = \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k, \quad \forall x \in H$$

Osservazione. Questa proposizione ci dice che la migliore approssimazione di $x \in V_n$ è proprio la ridotta n -esima della serie di Fourier.

Dimostrazione. Se ora c_1, c_2, \dots, c_n sono scalari arbitrari, abbiamo

$$\begin{aligned}
\left\| x - \sum_{k=1}^n c_k e_k \right\|^2 &= \left\langle x - \sum_{k=1}^n c_k e_k, x - \sum_{j=1}^n c_j e_j \right\rangle = \\
&= \|x\|^2 - \sum_{j=1}^n \overline{c_j} \langle x, e_j \rangle - \sum_{k=1}^n c_k \underbrace{\langle e_k, x \rangle}_{=\langle x, e_k \rangle} + \sum_{k,j=1}^n c_k \overline{c_j} \langle e_k, e_j \rangle = \\
&= \|x\|^2 - 2 \sum_{k=1}^n \Re(\overline{c_k} \langle x, e_k \rangle) + \sum_{k=1}^n |c_k|^2 + \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2 = \\
&= \|x\|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2 + \sum_{k=1}^n (|\langle x, e_k \rangle|^2 - 2\Re(\overline{c_k} \langle x, e_k \rangle) + |c_k|^2) = \\
&\stackrel{(2.22)}{=} \left\| x - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k \right\|^2 + \sum_{k=1}^n \underbrace{|\langle x, e_k \rangle - c_k|^2}_{>0} > \left\| x - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k \right\|^2
\end{aligned}$$

Dunque la ridotta della serie di Fourier è proprio l'elemento di minima distanza da x in V_n e quindi è la proiezione di x su V_n \square

Teorema 2.46: Caratterizzazione convergenza della serie di Fourier

Sia H uno spazio di Hilbert e sia $\{e_k\}$ un sistema ortonormale. Allora sono equivalenti:

- i) $\text{span}\{e_k, k \in \mathbb{N}\}$ è denso in H
- ii) La serie di Fourier di x converge a x per ogni $x \in H$
- iii) $\|x\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} |\langle x, e_k \rangle|^2$ per ogni $x \in H$ (identità di Bessel-Parseval)
- iv) Se $x \in H$ è tale che $\langle x, e_k \rangle = 0$ per ogni $k \in \mathbb{N}$, allora $x = 0_H$

Dimostrazione. Dimostriamo che (i) implica (ii). Se $\text{span}\{e_k, k \in \mathbb{N}\}$ è denso in H allora

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \forall x \in H \quad \exists z \in \text{span}\{e_k\} : \|x - z\| \leq \varepsilon$$

e dunque esiste un \bar{k} tale che $z \in V_{\bar{k}} = \text{span}\{e_1, \dots, e_{\bar{k}}\}$ essendo $z \in \text{span}\{e_k\}$. Per la proposizione 2.45 allora $\sum_{j=1}^{\bar{k}} \langle x, e_j \rangle e_j$ è la migliore approssimazione di x in $V_{\bar{k}}$, quindi

$$\left\| x - \sum_{j=1}^{\bar{k}} \langle x, e_j \rangle e_j \right\|^2 \leq \|x - z\|^2 \leq \varepsilon^2$$

se ora prendo $n > \bar{k}$, dico che

$$\begin{aligned}
\|x\|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2 &\leq \|x\|^2 - \sum_{k=1}^{\bar{k}} |\langle x, e_k \rangle|^2 \iff \\
\iff \left\| x - \sum_{j=1}^n \langle x, e_j \rangle e_j \right\|^2 &\leq \left\| x - \sum_{j=1}^{\bar{k}} \langle x, e_j \rangle e_j \right\|^2 \leq \varepsilon^2
\end{aligned}$$

dove si è usata la (2.22) della proposizione 2.44. Ne viene fuori che

$$\forall \varepsilon > 0 \quad \exists \bar{k} \in \mathbb{N} : \forall n \geq \bar{k} \quad \left\| x - \sum_{j=1}^n \langle x, e_j \rangle e_j \right\|^2 \leq \varepsilon^2$$

ossia (ii). D'altronde però (ii) implica (i) banalmente in quanto la convergenza della serie di Fourier per ogni $x \in H$ dice che necessariamente $\overline{\text{span}\{e_k\}} = H$. Ne segue che (i) \iff (ii).

Ora mostriamo che (ii) implica (iii). Di nuovo usando la (2.22) abbiamo

$$\underbrace{\left\| x - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k \right\|^2}_{\rightarrow 0 \iff (ii)} = \underbrace{\|x\|^2 - \sum_{k=1}^n |\langle x, e_k \rangle|^2}_{\rightarrow 0 \iff (iii)}$$

e quindi ne consegue (ii) \iff (iii).

Ora se x ha i coefficienti di Fourier tutti nulli, allora per la (iii) abbiamo

$$\|x\|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} |\langle x, e_k \rangle|^2 = \sum_{k=1}^{\infty} 0 = 0 \implies x = 0_H$$

e quindi (iii) \implies (iv).

Infine, sia $x \in H$ e $y = \sum_{k=1}^{\infty} \langle x, e_k \rangle e_k$ la somma della serie di Fourier, che converge sempre in H . Allora succede che l'elemento $x - y$ ha tutti i coefficienti di Fourier nulli. Infatti

$$\begin{aligned} \langle x - y, e_j \rangle &= \lim_{n \rightarrow \infty} \langle x, e_j \rangle - \left\langle \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k, e_j \right\rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} \langle x, e_j \rangle - \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle \langle e_k, e_j \rangle = \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \langle x, e_j \rangle - \langle x, e_j \rangle = \lim_{n \rightarrow \infty} 0 = 0 \end{aligned}$$

dove si è usata la continuità del prodotto scalare e si è assunto $n > j$, cosa definitivamente vera. Ora dunque per (iv) abbiamo che $x - y = 0$ e dunque la serie di Fourier converge a x . Abbiamo quindi mostrato che (iv) \implies (ii) e quindi la tesi è dimostrata. \square

Osservazione. Al teorema 2.46 si potrebbe inserire una quinta condizione equivalente, ossia

$$\langle x, y \rangle = \sum_{k=1}^{\infty} \langle x, e_k \rangle \overline{\langle y, e_k \rangle} \quad \forall x, y \in H$$

dunque il prodotto scalare di due elementi di H qualsiasi si può scrivere come prodotto scalare in ℓ^2 delle successioni date dai coefficienti di Fourier. Questa condizione è esattamente (iii) per $x = y$ e inoltre è implicata da (ii) poiché

$$\left\langle \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle e_k, \sum_{j=1}^n \langle x, e_j \rangle e_j \right\rangle = \sum_{k=1}^n \langle x, e_k \rangle \overline{\langle x, e_k \rangle}$$

e il limite per $n \rightarrow \infty$ è proprio l'identità che si cerca, infatti assumendo (ii) abbiamo che le serie di Fourier nel primo membro convergono rispettivamente a x e a y , e per la continuità del prodotto scalare si ha il risultato.

Definizione 2.19: Sistema ortonormale completo

Un sistema ortonormale $\{e_k\} \subseteq H$ si dice **completo** se vale la condizione (iv) del teorema 2.46, cioè se l'unico elemento $x \in H$ ortogonale a tutti gli e_k è l'elemento nullo di H .

Ovviamente basta che valga una qualunque delle condizioni, ma la definizione è associata alla (iv) per qualche motivo. Un sistema ortonormale completo viene anche detto **base ortonormale** di H .

Proposizione 2.47. *Se lo spazio di Hilbert H possiede una base ortonormale allora H è separabile*

Dimostrazione. Ricordando la definizione 2.6 di spazio separabile, ossia avente un sottoinsieme denso e numerabile, se H è reale posso considerare l'insieme delle combinazioni lineari finite di $\{e_k, k \in \mathbb{N}\}$ a coefficienti razionali. Se H è complesso posso considerare le combinazioni lineari finite a coefficienti con parte reale e parte immaginaria razionali. Tale insieme è denso in H e numerabile, dunque H è separabile anche nella vecchia definizione. \square

Proposizione 2.48. *Ogni spazio di Hilbert di dimensione infinita che possieda una base ortonormale è isomorfo a ℓ^2 .*

Dimostrazione. Ogni elemento dello spazio risulta identificato alla successione dei suoi coefficienti di Fourier. C'è una corrispondenza biunivoca tra $x \in H$ e $\{\langle x, e_k \rangle\} \in \ell^2$ che conserva le norme. \square

Mi chiedo ora Se valga il viceversa della proposizione 2.47, ossia se uno spazio di Hilbert separabile necessariamente abbia una base ortonormale. La risposta è sì.

Lemma 2.49 (Procedura di Gram-Schmidt). *Sia H uno spazio di Hilbert e $\{x_n\}$ una successione di elementi linearmente indipendenti. Allora esiste una successione $\{e_n\}$ di elementi ortonormali tali che $\text{span}\{x_1, \dots, x_n\} = \text{span}\{e_1, \dots, e_n\}$ per ogni $n \in \mathbb{N}$*

Dimostrazione. Per ogni $n \in \mathbb{N}$ definiamo e_n come

$$e_n = \frac{x_n - \sum_{k=1}^{n-1} \langle x_n, e_k \rangle e_k}{\|x_n - \sum_{k=1}^{n-1} \langle x_n, e_k \rangle e_k\|}$$

e si può verificare che $\{e_n\}$ è una successione ortonormale che soddisfa la tesi. \square

Teorema 2.50: Separabile \iff base ortonormale

Sia H uno spazio di Hilbert a dimensione infinita. Allora H è separabile se e solo se H possiede una base ortonormale.

Dimostrazione. Un'implicazione è data dalla proposizione 2.47.

Se H è separabile, allora esiste una successione $\{y_k\}$ densa in H . Allora possiamo costruire un'altra successione $\{x_n\}$ tale che per ogni $n \in \mathbb{N}$, x_1, \dots, x_n sono linearmente indipendenti e inoltre $\text{span}\{x_n, n \in \mathbb{N}\}$ è denso in H . A tal scopo prendiamo infatti y_1 e se $y_1 \neq 0$ pongo $x_1 = y_1$, altrimenti procedo su y_2 allo stesso modo (butto y_1). Poi (assumendo $y_1 \neq 0$) guardo y_2 e se è combinazione lineare di x_1 allora lo butto, altrimenti lo prendo come x_2 , e così via. Costruisco dunque $\{x_n\}$

come sottosuccessione di elementi di $\{y_n\}$. Abbiamo quindi che per ogni $k \in \mathbb{N}$ esiste $n \leq k$ tale che

$$\text{span}\{y_1, \dots, y_k\} = \text{span}\{x_1, \dots, x_n\}$$

e quindi $\text{span}\{x_n, n \in \mathbb{N}\} = \text{span}\{y_n, n \in \mathbb{N}\}$ e dunque anche $\{x_n\}$ ha span denso in H . Da $\{x_n\}$ possiamo costruire una base ortonormale con la procedura di Gram-Schmidt. \square

In ℓ^2 la successione canonica $\{e^k\}$ è una base ortonormale, e infatti se $x = (x_k) \in \ell^2$ è tale che $\langle x, e^k \rangle = x_k = 0$ per ogni $k \in \mathbb{N}$, allora necessariamente x è la successione nulla.

Esercizio 2.9 ★ base ortonormale di $L^2(-\pi, \pi)$

Consideriamo ora $L^2(-\pi, \pi)$ e lavoriamo su funzioni $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ misurabili e periodiche di periodo 2π tali che $f|_{(-\pi, \pi)} \in L^2(-\pi, \pi)$. Mostrare che le funzioni

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}}, \quad \frac{\sin(kt)}{\sqrt{\pi}}, \quad \frac{\cos(kt)}{\sqrt{\pi}}, \quad k \in \mathbb{N}$$

formano una base ortonormale di $L^2(-\pi, \pi)$.

Osservazione. Chiaramente non c'è nulla di particolare nell'intervallo $(-\pi, \pi)$ eccetto che è particolarmente facile definire le funzioni f . Questo esercizio mostra che esiste (e la presenta) una base ortonormale su uno spazio di funzioni periodiche. Basta infatti stretchare le funzioni e traslarle e trovi il periodo che vuoi, dove vuoi.

Osservazione. In ambito complesso si può anche prendere (oltre alle funzioni sopra, che pure funzionano), le funzioni $\frac{1}{\sqrt{2\pi}}e^{int}$, con $n \in \mathbb{Z}$ che pure formano una base ortonormale.

Definizione 2.20: Polinomio trigonometrico

Una funzione del tipo

$$p(t) = a_0 + \sum_{k=1}^n (a_k \cos(kt) + b_k \sin(kt)) \quad \text{con } a_k, b_k \in \mathbb{R}$$

viene detta **polinomio trigonometrico** di grado n in ambito reale. In modo analogo

$$q(t) = \sum_{k=-n}^n c_k e^{ikt} \quad \text{con } c_k \in \mathbb{C}$$

è un **polinomio trigonometrico** di grado n in ambito complesso.

Teorema 2.51: Weierstrass

Sia $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ continua e periodica di periodo 2π . Allora esiste una successione di polinomi trigonometrici $\{p_n\}$ tale che $\|f - p_n\|_\infty \rightarrow 0$ per $n \rightarrow \infty$, ossia p_n converge a f uniformemente in \mathbb{R} .

Lemma 2.52. Esiste una successione di polinomi trigonometrici q_n tali che

a. $q_n(t) \geq 0$ per ogni $t \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$

b. $\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} q_n(t) dt = 1$ per ogni $n \in \mathbb{N}$

c. Per ogni $\delta \in (0, \pi)$ si ha

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\sup_{\delta \leq |t| \leq \pi} q_n(t) \right)$$

Dimostrazione. Definiamo

$$q_n(t) = c_n \left(\frac{1 + \cos t}{2} \right)^n, \quad t \in \mathbb{R}$$

dove i coefficienti c_n sono fissati in modo che valga la condizione b., ossia tali che

$$\frac{c_n}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \underbrace{\left(\frac{1 + \cos t}{2} \right)^n}_{\text{sempre non negativa e si annulla in } -\pi \text{ e } \pi} dt = 1$$

Notiamo che $c_n > 0$ per ogni $n \in \mathbb{N}$ e quindi vale a.

Perché q_n è un polinomio trigonometrico?

$$q_n(t) = \frac{c_n}{2^n} \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} \cos^k t \quad (2.25)$$

notiamo però la seguente:

$$\cos(mt) \cos t = \frac{1}{2} (\cos((m+1)t) + \cos((m-1)t)), \quad m \in \mathbb{N}$$

e per l'equazione 2.25 possiamo scrivere ad esempio $\cos^2(t) = \frac{1}{2}(\cos 2t + 1)$, se ho $\cos^3 t = \cos^2 t \cos t$ dove si può sostituire $\cos^2 t$ con la formula appena data eccetera. Per induzione si può mostrare che q_n è effettivamente un polinomio trigonometrico.

Ora, per c.:

$$\begin{aligned} 1 &= \frac{c_n}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \left(\frac{1 + \cos t}{2} \right)^2 dt = \frac{c_n}{2\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1 + \cos t}{2} \right)^2 dt \geq \\ &\geq \frac{c_n}{\pi} \int_0^{\pi} \left(\frac{1 + \cos t}{2} \right)^n \sin t dt = -2 \frac{c_n}{\pi} \frac{1}{n+1} \left(\frac{1 + \cos t}{2} \right)^{n+1} \Big|_0^{\pi} = \frac{2c_n}{\pi(n+1)} \end{aligned}$$

da cui ne scende che

$$c_n \leq \frac{\pi}{2}(n+1)$$

e se ora prendiamo $\delta \in (0, \pi)$ abbiamo che

$$\sup_{\delta \leq |t| \leq \pi} q_n \stackrel{\text{pari}}{=} \sup_{t \in [\delta, \pi]} q_n = q_n(\delta) = c_n \left(\frac{1 + \cos \delta}{2} \right)^n \leq \frac{\pi}{2}(n+1) \underbrace{\left(\frac{1 + \cos \delta}{2} \right)^n}_{<1} \rightarrow 0$$

dove la seconda eguaglianza è data da come è definita q_n , che è decrescente in $[0, \pi]$ \square