

Istituzioni di Analisi Matematica  
Corso del prof. Pietro Majer

Francesco Sorce

Università di Pisa  
Dipartimento di Matematica  
A.A. 2024/25

# Indice

<b>1</b>	<b>Norme e Seminorme</b>	<b>2</b>
1.1	Norme e seminorme . . . . .	2
1.1.1	Teoremini filosofici . . . . .	4
1.2	Completezza . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Spazi vettoriali topologici</b>	<b>8</b>
2.1	Intorni dell'origine in SVT . . . . .	9
2.2	SVT localmente convessi . . . . .	11
2.2.1	Funzionali di Minkowski . . . . .	12
2.3	Continuità di operatori lineari in SVT . . . . .	13
2.4	Topologie deboli . . . . .	14
2.4.1	Caso degli spazi normati . . . . .	16
2.5	Teorema di Riesz . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Limitatezza e Banach-Steinhaus</b>	<b>19</b>
3.1	Limitatezza . . . . .	19
3.2	Spazi di Baire e II-categoria . . . . .	20
3.3	Teorema di Banach-Steinhaus . . . . .	21
3.3.1	Teorema della mappa aperta . . . . .	24
3.4	SVT I-numerabili e paranorme . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Teorema di Hahn-Banach</b>	<b>30</b>
4.1	Teorema di Hahn-Banach reale . . . . .	30
4.1.1	Inclusione isometrica nel biduale . . . . .	32
4.1.2	Sulle ipotesi del teorema di Hahn-Banach . . . . .	33
4.2	Estensioni e altre versioni di Hahn-Banach . . . . .	34
4.2.1	Teorema di Hahn-Banach complesso . . . . .	34
4.2.2	Teoremi di separazione dei convessi . . . . .	34
4.3	Parentesi esercizi . . . . .	36
<b>5</b>	<b>Costruzioni su spazi normati</b>	<b>38</b>
5.1	Costruzione di duali . . . . .	40
<b>6</b>	<b>Completezza e duali di qualche spazio</b>	<b>41</b>
6.1	Elenco di spazi completi . . . . .	41
6.2	Duali di spazi concreti . . . . .	45
6.2.1	Spazi $\ell_p$ . . . . .	45
<b>A</b>	<b>Topologia</b>	<b>53</b>

# Capitolo 1

## Norme e Seminorme

Il corso si concentra sulla relazione che si crea tra la struttura lineare e la struttura topologia degli spazi normati.

Per  $\mathbb{K}$  intendiamo un campo tra  $\mathbb{R}$  o  $\mathbb{C}$ .

### 1.1 Norme e seminorme

**Definizione 1.1** (Seminorma).

Se  $X$  è uno spazio vettoriale su  $\mathbb{K}$ , una **seminorma** è una funzione  $\|\cdot\| : X \rightarrow [0, +\infty)$  tale che

1.  $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$  (*Disuguaglianza triangolare*)
2.  $\|\lambda x\| = \lambda \|x\|$  se  $\lambda \in \mathbb{R}$ ,  $\lambda > 0$  (*Positivamente omogenea*)
- 2'.  $\|\lambda x\| = \|x\|$  se  $|\lambda| = 1$  (*Isotropia*)

Se inoltre vale  $\|x\| = 0 \iff x = 0$  allora  $\|\cdot\|$  è detta **norma**.

La coppia  $(X, \|\cdot\|)$  si dice **spazio (semi)normato**.

*Osservazione 1.2.*

Su uno spazio (semi)normato possiamo definire una (semi)distanza indotta ponendo

$$d(x, y) = \|x - y\|.$$

Diamo alcuni esempi di spazi normati e seminormati:

**Esempio 1.3.** 1.  $X = \mathbb{R}^n$ ,  $\|x\|_\infty = \max_{i \in \{1, \dots, n\}} |x_i|$

2. Per  $1 \leq p < \infty$ ,  $\ell_p = \left\{ x \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}} \mid \sum_{i \geq 0} |x_i|^p < \infty \right\}$  con  $\|x\|_p = \left( \sum_{i \geq 0} |x_i|^p \right)^{1/p}$

3.  $\ell_\infty = \left\{ x \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}} \mid \sup |x_i| < \infty \right\}$  con  $\|x\|_\infty = \sup |x_i|$

4.  $\mathcal{L}^p(X, \mu) = \left\{ f : X \rightarrow \mathbb{K}, \text{ misurabile, } \|f\|_p < \infty \right\}$  con

$$\|f\|_p = \begin{cases} \left( \int_X |f(x)|^p d\mu \right)^{1/p} & \text{se } 1 \leq p < \infty \\ \sup_{x \in X} |f(x)| = \inf_{\substack{N \subseteq X, \\ \mu(N)=0}} \sup_{x \in X \setminus N} |f(x)| & \text{se } p = \infty \end{cases}$$

è uno spazio seminormato ma non normato.

## 5. Spazi di Hilbert.

**Definizione 1.4** (Funzioni continue, limitate e lineari).

Siano  $E, F$  spazi normati e  $S$  un insieme, definiamo i seguenti spazi normati:

$$\begin{aligned}\mathcal{B}(S, E) &= \{f : S \rightarrow E, \text{ limitate}\}, & \|f\|_{\infty, S} &= \sup_{s \in S} \|f(s)\|_E \\ \mathcal{BC}(S, E) &= \{f : S \rightarrow E, \text{ continue e limitate}\}, & \|f\|_{\infty, S} &= \sup_{s \in S} \|f(s)\|_E \\ L(E, F) &= \{T : E \rightarrow F \text{ lineare}, \|T\| < \infty\}, & \|T\| &= \sup_{x \in B_E(0,1)} \|T(x)\|_F\end{aligned}$$

**Definizione 1.5** (Spazio duale).

Sia  $V$  uno spazio vettoriale. Denotiamo con  $V'$  il **duale algebrico**, cioè l'insieme delle mappe lineari  $V \rightarrow \mathbb{K}$ .

Definiamo lo **spazio duale** a  $V$  come  $V^* = L(V, \mathbb{K})$ , cioè come il sottoinsieme di  $V'$  dato dalle mappe continue. La norma su  $V^*$  è quindi data da

$$\|f\|_{V^*} = \sup_{\|x\| \leq 1} |f(x)| \stackrel{\text{Lineare}}{=} \sup_{\|x\|=1} |f(x)|.$$

**Proposizione 1.6** (Per funzionale limitato equivale continuo).

*Per un funzionale lineare in  $V^*$ , essere limitato è equivalente ad essere continuo.*

*Dimostrazione.*

Se  $\|f\| = M \in \mathbb{R}_+$  allora

$$\|f(x) - f(y)\| = \|f(x - y)\| = \left\| f \left( \frac{x - y}{\|x - y\|} \right) \right\| \|x - y\| \leq \|f\| \|x - y\| = M \|x - y\|,$$

cioè  $f$  è  $M$ -lipschitz, e quindi continua.

Sia ora  $f$  lineare e continua. Per definizione di continuità in 0 esiste  $\delta > 0$  tale che  $\|f(x)\| = \|f(x) - f(0)\| \leq 1$  per ogni  $x \in B_V(0, \delta)$ . Segue che

$$\|f(x)\| = \left\| \frac{\|x\|}{\delta} f \left( \delta \frac{x}{\|x\|} \right) \right\| \leq \frac{\|x\|}{\delta},$$

cioè  $\|f\|_{V^*} \leq 1/\delta$  e quindi  $f$  limitato. □

*Osservazione 1.7.*

Se  $(X, \|\cdot\|)$  è uno spazio seminormato e  $N = \ker \|\cdot\| = \{x \in X \mid \|x\| = 0\}$  allora  $\|\cdot\|$  passa al quoziente e lo rende uno spazio normato.

**Esempio 1.8.**

Considerando lo spazio seminormato  $(\mathcal{L}^p(X, \mu), \|\cdot\|_p)$ , la costruzione sopra corrisponde a definire lo spazio normato  $(L^p(X, \mu), \|\cdot\|_p)$ , infatti  $\ker \|\cdot\|_p$  sono le funzioni con supporto in un insieme trascurabile.

*Osservazione 1.9.*

$L(E, F) \hookrightarrow \mathcal{B}(B_E(0, 1), F)$  mandando  $T \mapsto T|_{B_E(0,1)}$ . Infatti per definizione questa mappa è isometrica<sup>1</sup>. Questo identifica il primo spazio con un chiuso del secondo.

---

<sup>1</sup> $\|T\| = \left\| T|_{B_E(0,1)} \right\|_{\infty, B_E(0,1)}$

### 1.1.1 Teoremini filosofici

**Teorema 1.10** (Banach Mazur).

Sia  $(E, \|\cdot\|)$  normato,  $f : E \rightarrow E$  isometria<sup>2</sup>. Allora  $f$  è affine.

*Dimostrazione. (ESERCIZIO).*

TRACCIA:

- Basta provare che  $\forall a, b \in E$  vale

$$f\left(\frac{a+b}{2}\right) = \frac{f(a) + f(b)}{2}$$

(conservando questa conserva i razionali 2-adici e quindi per continuità ogni combinazione convessa)

- Fissati  $a, b \in E$ , definiamo la *deficienza affine* di  $f$  (rispetto ad  $a$  e  $b$ )

$$def(f) = \left\| \left\{ f\left(\frac{a+b}{2}\right) - \frac{f(a) + f(b)}{2} \right\} \right\|$$

La tesi è  $def(f) = 0$ .

- Notiamo che

$$def(f) \leq \left\| f\left(\frac{a+b}{2}\right) \right\| + \left\| \frac{f(a)}{2} \right\| + \left\| \frac{f(b)}{2} \right\| = \frac{1}{2} (\|a+b\| + \|a\| + \|b\|)$$

- Consideriamo l'applicazione affine che scambia  $f(a)$  e  $f(b)$  data da

$$\rho(y) = f(a) + f(b) - y$$

Poniamo  $\tilde{f} = f^{-1} \circ \rho \circ f$ .

- Mostrare  $def(\tilde{f}) = 2def(f)$ .
- Se  $def(f) \neq 0$ , iterando otteniamo che esiste  $g$  tale che  $def(g)$  è arbitrariamente grande (raddoppio  $def(f)$  tante volte), ma questo è assurdo perché abbiamo il limite trovato prima che non dipende dalla funzione.

□

**Filosoficamente questo vuol dire che la struttura metrica in un qualche modo determina la struttura vettoriale.**

**Teorema 1.11** (Inclusione isometrica / Fréchet-Kuratowski).

Sia  $(M, d)$  spazio metrico. Allora esso si immerge isometricamente in uno spazio normato<sup>3</sup>. In particolare si immerge in  $(\mathcal{BC}(M, \mathbb{R}), \|\cdot\|_\infty)$  via l'assegnazione seguente:

Fissiamo un punto base  $x_0 \in M$ .<sup>4</sup>

$$\begin{array}{ccc} M & \longrightarrow & \mathcal{BC}(M, \mathbb{R}) \\ x & \longmapsto & d(\cdot, x) - d(\cdot, x_0) \end{array}$$

<sup>2</sup>con questo termine intendiamo che la mappa, oltre a rispettare le distanze, è anche bigettiva. Se non vale bigettività diremo "inclusione isometrica"

<sup>3</sup>addirittura di Banach.

<sup>4</sup>saremmo tentati da  $x \mapsto d(\cdot, x)$ , ma la funzione in arrivo non è limitata e quindi non esiste una norma ben definita

*Dimostrazione.*

ESERCIZIO

□

Filosoficamente questo vuol dire che studiando mappe tra spazi metrici, possiamo pensare al codominio come spazi normati.

Se consideriamo l'immersione di uno spazio metrico in un Banach, possiamo “incicciottirlo” e trovare uno spazio metrico “vicino” che è localmente contraibile. Queste idee a volte possono aiutare.

## 1.2 Completezza

**Definizione 1.12** (Successione di Cauchy).

Una successione  $(x_n)$  è **di Cauchy** o **fondamentale** se  $\forall \varepsilon > 0 \exists n \in \mathbb{N}$  tale che per ogni  $p, q > n$  si ha  $d(x_p, x_q) < \varepsilon$ .

**Fatto 1.13** (Proprietà delle successioni di Cauchy).

1. Ogni successione convergente è di Cauchy.
2. Se  $(x_n)$  è di Cauchy e  $\tilde{x} \in X$  è un punto ad essa aderente allora  $\tilde{x}$  è il limite.
3. Se  $(x_n)$  come sopra ha una sottosuccessione convergente, la successione converge allo stesso limite.
4. Ogni successione di Cauchy<sup>5</sup>  $(x_n)$  ha una sottosuccessione  $(x_{n_k})$  tale che

$$d(x_{n_{k+1}}, x_{n_k}) < 2^{-k}.$$

**Definizione 1.14** (Spazio completo).

Uno spazio metrico  $(X, d)$  è **completo** se ogni successione di Cauchy in  $X$  converge.

Se  $(X, \|\cdot\|)$  spazio normato è completo rispetto alla distanza indotta da  $\|\cdot\|$  allora si dice **di Banach**.

*Osservazione 1.15.*

Uno spazio normato  $(X, \|\cdot\|)$  è di Banach se e solo se ogni serie  $\sum x_k$  definita a partire da una successione tale che  $\|x_k\| < 2^{-k}$  è convergente.

Equivalentemente  $X$  di Banach se ogni serie  $\sum x_k$  assolutamente convergente<sup>6</sup> è convergente.

*Dimostrazione.*

Ogni successione si può scrivere come serie, infatti  $y_n = \sum_{i=0}^n x_i$  per  $x_i = y_i - y_{i-1}$ . Il resto segue pensando sulle definizioni. □

*Osservazione 1.16.*

Sia  $Y \subseteq X$  con  $(X, d)$  metrico.

- Se  $X$  è completo e  $Y$  è chiuso allora  $Y$  è completo.
- Se  $Y$  è completo allora è anche chiuso.

**Proposizione 1.17** (Completamento).

Sia  $(X, d)$  uno spazio metrico, allora

<sup>5</sup>questa proprietà è comoda perché implica  $d(x_{n_k}, x_{n_p}) < 2^{-k+1}$  per ogni  $p > k$

<sup>6</sup>cioè  $\sum \|x_k\|$  convergente

1. esiste una inclusione isometrica densa di  $X$  in uno spazio metrico completo

$$j : (X, d) \hookrightarrow (\tilde{X}, \tilde{d})$$

2. il completamento è universale, cioè se  $j' : (X, d) \rightarrow (\tilde{X}', \tilde{d}')$  è un'altra mappa come sopra allora esiste un'unica isometria  $\phi : \tilde{X} \rightarrow \tilde{X}'$  che fa commutare il diagramma

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{j} & \tilde{X} \\ & \searrow j' & \downarrow \phi \\ & & \tilde{X}' \end{array}$$

*Dimostrazione.*

Consideriamo un paio di costruzioni

**Costruzione 1** Consideriamo

$$C_X = \{\xi = (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \in X^{\mathbb{N}} \mid \xi \text{ di Cauchy}\}$$

con una semidistanza<sup>7</sup>

$$d(\xi, \eta) = \lim_{n \rightarrow \infty} d(\xi_n, \eta_n).$$

Questo limite esiste perché la successione di queste distanze è di Cauchy in  $\mathbb{R}$ , che è completo. Notiamo che

$$d(\xi, \eta) = 0 \iff d(\xi_n, \eta_n) = o(1).$$

Notiamo che  $X$  ha una inclusione isometrica in  $(C_X, d)$  data associando a  $x$  la successione costante al valore  $x$ .

Consideriamo

$$\tilde{X} = C_X / \mathcal{R}, \quad \xi \mathcal{R} \eta \iff d(\xi, \eta) = 0.$$

L'inclusione isometrica di prima definisce  $X \hookrightarrow \tilde{X}$ , ma stavolta  $\tilde{X}$  è uno spazio metrico per costruzione.

ESERCIZIO: VERIFICA PROPRIETÀ DI NORMA E DENSITÀ

**Costruzione 2** Definiamo  $\tilde{X}$  come la chiusura in  $(\mathcal{BC}(X), \|\cdot\|_{\infty})$  dell'immagine di  $X$  tramite l'inclusione di Fréchet Kuratowski (1.11).

**Costruzione 3** (Solo per  $X$  spazio normato, ma per il teorema di inclusione isometrica (1.11) questo è sufficiente) Vedremo che esiste una inclusione isometrica di  $X$  nel suo biduale ( $x \mapsto \text{val}_x$ ) e che il biduale stesso è completo, quindi un completamento di  $X$  è fornito dalla chiusura di  $\text{val}_*(X) \subseteq X^{**}$

□

**Proposizione 1.18** (Estensione per densità di uniformemente continue).

Siano  $X$  e  $Y$  spazi metrici,  $Y$  completo,  $D \subseteq X$  denso e  $f : D \rightarrow Y$  uniformemente continua, allora esiste un'unica estensione continua  $\tilde{f}$  di  $f$  a tutto  $X$ , inoltre  $\tilde{f}$  è essa stessa uniformemente continua con lo stesso modulo di continuità.

$$\begin{array}{ccc} D & \xrightarrow{f} & Y \\ \text{I} \cap & \nearrow \tilde{f} & \\ X & & \end{array}$$

<sup>7</sup>VERIFICARE CHE LO È

**Definizione 1.19** (Categorie di spazi metrici).

Sia  $\text{Met}$  la categoria degli spazi metrici con mappe date da applicazioni uniformemente continue e  $\text{CMet}$  la sottocategoria piena dove gli oggetti sono spazi metrici completi

*Osservazione 1.20.*

L'operazione di completamento è un funtore<sup>8</sup>  $\sim : \text{Met} \rightarrow \text{CMet}$ . Questo funtore è aggiunto al funtore dimenticante / di inclusione  $j : \text{CMet} \rightarrow \text{Met}$ , infatti

$$\text{Hom}_{\text{CMet}}(\tilde{X}, Y) = UC(\tilde{X}, Y) \stackrel{(1.18)}{\cong} UC(X, j(Y)) = \text{Hom}_{\text{Met}}(X, j(Y)).$$

**Esercizio 1.21.**

Verificare l'aggiunzione.

---

<sup>8</sup>preserva composizione per l'unicità della mappa tra estensioni



## Capitolo 2

# Spazi vettoriali topologici

**Definizione 2.1** (Spazio vettoriale topologico).

Uno **spazio vettoriale topologico** è uno spazio vettoriale  $X$  su  $\mathbb{K} \in \{\mathbb{R}, \mathbb{C}\}$  munito di una topologia che rende continue le mappe

$$+ : X \times X \rightarrow X \quad \text{e} \quad \cdot : \mathbb{K} \times X \rightarrow X.$$

**Esempio 2.2.**

Esempi di SVT sono

- Ogni spazio normato
- $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  con la topologia della convergenza uniforme sui compatti.
- Se  $X$  è uno spazio topologico qualunque considero  $C(X, \mathbb{R})$  con topologia di convergenza uniforme su compatti.

**Esercizio 2.3.**

La topologia della convergenza uniforme su compatti su  $C(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  non è indotta da una norma.

*Dimostrazione.*

TRACCIA

- Su uno spazio normato, se  $U$  e  $V$  sono intorni di 0 allora esiste  $\lambda \in \mathbb{R}$  tale che  $\lambda U \supseteq V$ .
- Mostrare che la topologia della convergenza uniforme su compatti non ha questa proprietà.

□

**Esercizio 2.4.**

Ogni SVT che è  $T_0$  è anche<sup>1</sup>  $T_3$  e<sup>2</sup>  $T_{3\frac{1}{2}}$

**Esercizio 2.5** (Spazi non  $T_0$  non sono troppi interessanti).

Ogni SVT  $X$  si decompone in somma diretta topologica  $X = Y \oplus \overline{\{0\}}$  con  $Y$  qualunque addendo algebrico di  $\{0\}$ . Segue che  $Y \cong X/\{0\}$ ,  $Y$  risulta essere  $T_0$  e  $\{0\}$  ha la topologia indiscreta.

<sup>1</sup>In questo corso con  $T_3$  intendiamo  $T_3$  e Hausdorff

<sup>2</sup> $T_{3\frac{1}{2}}$  è  $T_3$  più esiste una funzione continua che vale 1 sul punto e 0 sul chiuso che sto separando

## 2.1 Intorni dell'origine in SVT

**Definizione 2.6** (Filtro).

Un **filtro**  $\mathcal{F}$  su un insieme  $X$  è una famiglia non vuota di sottoinsiemi di  $X$  tale che

- per ogni  $F \in \mathcal{F}$ ,  $F \neq \emptyset$
- Se  $F \in \mathcal{F}$  e  $F \subseteq F'$  allora  $F' \in \mathcal{F}$
- Se  $F, F' \in \mathcal{F}$  allora  $F \cap F' \in \mathcal{F}$

**Definizione 2.7** (Sottoinsieme bilanciato).

Sia  $X$  un  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale e  $A \subseteq X$ .  $A$  è **bilanciato** se per ogni  $\lambda \in \mathbb{K}$  tale che  $|\lambda| \leq 1$  si ha  $a \in A \implies \lambda a \in A$ , cioè

$$B_{\mathbb{K}}(0, 1) \cdot A \subseteq A.$$

*Osservazione 2.8.*

Se  $V$  è bilanciato allora  $0 \in V$  perché  $0 \in B_{\mathbb{K}}(0, 1)$ .

**Definizione 2.9** (Sottoinsieme assorbente).

Sia  $X$  un  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale e  $B \subseteq X$ .  $B$  è **assorbente** se per ogni  $x \in X$  esiste  $n_x \in \mathbb{N}$  tale che per ogni  $t \geq n_x$  si ha  $x \in tB$ .

*Osservazione 2.10.*

Poiché in uno SVT le traslazioni  $X \rightarrow X$  con  $x \mapsto x + x_0$  sono omeomorfismi, per descrivere la topologia basta descrivere il filtro degli intorni di 0.

Come notazione sia  $\mathcal{U} = \mathcal{U}_X$  l'insieme degli intorni di  $0 \in X$ .

**Proposizione 2.11** (Proprietà intorni di 0).

$\mathcal{U}$  ha le seguenti proprietà

1.  $\mathcal{U}$  è un filtro
2. Per ogni  $U \in \mathcal{U}$  esiste  $V \in \mathcal{U}$  tale che  $V + V \subseteq U$
3. Per ogni  $U \in \mathcal{U}$  esiste  $V \in \mathcal{U}$  con  $V \subseteq U$  e  $V$  bilanciato
4. Ogni elemento di  $\mathcal{U}$  è assorbente

*Dimostrazione.*

Dimostriamo le varie proprietà

1. La proprietà 1. è vera per ogni insieme definito come “gli intorni di  $x$ ” per  $x$  fissato in spazio topologico  $X$ .
2. Segue dalla continuità di  $+$  in  $(0, 0) \in X \times X$ . Basta definire  $V$  in modo tale che  $V \times V \subseteq +^{-1}(U)$ .
3. Segue dalla continuità di  $\cdot$  in  $(0, 0)$ . Se  $U$  intorno di 0 in  $X$ , siano  $\varepsilon > 0$  e  $V \in \mathcal{U}$  tali che  $B_{\mathbb{K}}(0, \varepsilon) \times V \subseteq \cdot^{-1}(U)$ . Allora  $B_{\mathbb{K}}(0, \varepsilon) \cdot V$  è bilanciato e contenuto in  $U$  per costruzione. Questo insieme è anche un intorno perché si può scrivere come

$$\bigcup_{|\lambda| \leq \varepsilon} \lambda V$$

e poiché  $V$  è un intorno di 0, ogni  $\lambda V$  è un intorno di 0, quindi anche questa unione.

4. Segue dalla continuità della mappa  $\mathbb{R}_+ \rightarrow X$  che per fissato  $x_0 \in X$  assegna  $s \mapsto sx_0$ . Infatti per ogni  $U \in \mathcal{U}$  esiste  $\varepsilon > 0$  tale che per ogni  $0 \leq s \leq \varepsilon$ ,  $sx_0 \in U$  e riscrivendo questo in termini di  $t = 1/s$  abbiamo  $x_0 \in tU$  per ogni  $t \geq 1/\varepsilon$ . Come  $n_{x_0}$  basta scegliere  $\lfloor \varepsilon^{-1} \rfloor$ .

□

**Esercizio 2.12.**

Sia  $X$  spazio vettoriale su  $\mathbb{K}$  e  $\mathcal{U}$  una famiglia di sottoinsiemi di  $X$  tali che valgano le quattro proprietà della proposizione precedente (2.11). Allora esiste un'unica topologia su  $X$  che rende  $X$  uno SVT e tale che  $\mathcal{U}$  è il filtro degli intorni di 0. In questa topologia  $\mathcal{U}$  è un sistema fondamentale di intorni per 0.

*Dimostrazione.*

L'idea è che definiamo  $A \subseteq X$  aperto se e solo se per ogni  $a \in A$ ,  $A - a \in \mathcal{U}$  (sto traducendo “aperto  $\iff$  intorno di ogni suo punto”). Si può mostrare che questa scelta definisce una topologia che rende  $X$  uno SVT. □

**Esercizio 2.13.**

Definire analogamente una topologia di SVT su  $X$  tramite degli assiomi che si basano su una base di intorni di 0 (al posto di tutti gli intorni). Per esempio la famiglia degli intorni bilanciati di 0.

*Osservazione 2.14.*

Se uno SVT è  $T_0$  allora è automaticamente  $T_1$  e  $T_2$ , basta sfruttare proprietà di simmetria.

*Osservazione 2.15.*

Ogni SVT è uno spazio topologico regolare, cioè ogni punto ha una base di intorni chiusi. Se  $X$  è anche  $T_0$  allora  $X$  è  $T_3$ .

*Dimostrazione.*

Sia  $C$  un chiuso di  $X$  e  $x \in X$  con  $x \notin C$ . Sia  $U \in \mathcal{U}_X$  tale che  $x + U \cap C = \emptyset$ , che esiste perché  $C$  è chiuso. Sia  $V \in \mathcal{U}_X$  tale che  $V - V \subseteq U$ , allora<sup>3</sup>  $(x + V) \cap (C + V) = \emptyset$  dove  $C + V$  è un intorno di  $c$  per ogni  $c \in C$  per definizione. □

*Osservazione 2.16.*

Se  $K$  è compatto,  $C$  chiuso con  $K \cap C = \emptyset$  allora esiste  $V$  tale che  $(K + V) \cap (C + V) = \emptyset$ .

*Dimostrazione.*

Per ogni  $x \in K$  sia  $V_x \in \mathcal{U}_X$  tale che  $x + (V_x + V_x - V_x)$  è disgiunto da  $C$ . Abbiamo dunque un ricoprimento  $\{x + V_x\}_{x \in K}$  di  $K$ , che è compatto, quindi estraggo un sottoricoprimento finito  $\{x_i + V_{x_i}\}$  e definisco  $V$  come l'intersezione di questi. Allora

$$(K + V) \cap (C + V) = \emptyset,$$

infatti se  $x \in K + V$  allora  $x = k + v$  con  $k \in K$  e  $v \in V$  ma  $k \in x_i + V_{x_i}$  per qualche  $i$ , quindi  $x = x_i + v_i + v$ , e avendo supposto che  $x_i + (V_{x_i} + V_{x_i} - V_{x_i}) \cap C = \emptyset$  abbiamo che  $x = x_i + v_i + v \notin C + V$ . □

<sup>3</sup>Un insieme come  $C + V$  è detto intorno uniforme di  $C$

## 2.2 SVT localmente convessi

**Definizione 2.17** (SVT localmente convesso).

Uno **spazio vettoriale topologico localmente convesso** (SVTLC) è uno SVT tale che 0 ha una base di intorni convessi.

**Esempio 2.18.**

Diamo alcuni esempi

- Ogni spazio normato
- $C(X)$  con  $X$  spazio topologico con la topologia della convergenza uniforme sui compatti
- $C^\infty(\Omega)$  con  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$  aperto e topologia della convergenza uniforme sui compatti di tutte le derivate in ogni ordine

**Esercizio 2.19.**

Sia  $\mathcal{M} = \{f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R} \mid \text{misurabili}\}$ , allora esiste una metrica su  $\mathcal{M}$  che lo rende uno SVT e tale che  $f_n \rightarrow f$  se e solo se  $f_n \rightarrow f$  in misura, cioè per ogni

$$\forall \varepsilon > 0, \quad \lim_{n \rightarrow \infty} |\{ |f_n| > \varepsilon \}| = 0$$

Mostrare che l'unico intorno convesso di 0 è  $\mathcal{M}$  stesso, da cui segue  $\mathcal{M}^* = \{0\}$ .

*Osservazione 2.20.*

Per ciò che sappiamo sugli intorni di 0 in uno SVT, se  $X$  è SVTLC allora esiste una base  $\mathcal{B}$  data dagli intorni di 0 assorbenti, bilanciati e convessi.

**Definizione 2.21** (Disco).

Un insieme  $B$  è detto **disco** se è assorbente, bilanciato e convesso.

**Proposizione 2.22.**

Sia  $X$  un  $\mathbb{R}$ -SV e  $\mathcal{B}$  una famiglia di sottoinsiemi di  $X$  tale che

- Per ogni  $B \in \mathcal{B}$ ,  $B$  è Assorbente, Bilanciato e Convesso
- Per ogni  $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$  si ha  $B_1 \cap B_2 \in \mathcal{B}$

allora  $\mathcal{U} = \{U \subseteq X \mid \exists r > 0, \exists B \in \mathcal{B} \mid rB \subseteq U\}$  è un filtro di insiemi che induce una topologia che rende  $X$  uno SVT come da esercizio (2.12). La topologia indotta è anche localmente convessa.

*Dimostrazione.*

Mostriamo le quattro proprietà:

- Chiaramente  $\mathcal{U}$  è un filtro.
- Ogni  $U \in \mathcal{U}$  è assorbente perché lo sono gli elementi di  $\mathcal{B}$
- Per ogni  $U \in \mathcal{U}$  esiste  $V \in \mathcal{U}$  tale che  $V + V \subseteq U$ , basta scegliere  $V = \frac{1}{2}B$  con  $B \subseteq U$  convesso in quanto se  $B$  è convesso  $B + B = 2B$
- Ogni  $U \in \mathcal{U}$  contiene un bilanciato perché contiene una versione scalata di un elemento di  $\mathcal{B}$ .

□

*Osservazione 2.23.*

Se  $\mathcal{B}$  è una famiglia di dischi allora definendo  $\tilde{\mathcal{B}} = \{B_1 \cap B_2 \mid B_1, B_2 \in \mathcal{B}\}$  si ha che  $\tilde{\mathcal{B}}$  rispetta gli assiomi della proposizione (2.22) e quindi induce una topologia su  $X$  che lo rende uno SVT. Questa è la meno fine tale che  $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{U}_X$ . In particolare  $\mathcal{U}_X$  ha una base data da  $\{rB \mid B \in \tilde{\mathcal{B}}\}$ .

### 2.2.1 Funzionali di Minkowski

**Definizione 2.24** (Funzionale di Minkowski).

Sia  $X$  un  $\mathbb{R}$ -spazio vettoriale,  $C \subseteq X$  convesso,  $0 \in C$ . Il **funzionale di Minkowski** associato a  $C$  è dato da:

$$p_C : \begin{array}{ccc} X & \longrightarrow & [0, +\infty] \\ x & \longmapsto & \inf \{t \geq 0 \mid x \in tC\} \end{array}$$

dove  $\inf \emptyset = \infty$  in questo formalismo.

*Osservazione 2.25.*

Se  $B(0, 1) \subseteq C \subseteq \overline{B(0, 1)}$  per  $X$  normato allora  $p_C(x) = \|x\|$ .

**Proposizione 2.26** (Proprietà funzionali di Minkowski).

*Valgono le seguenti proprietà*

- $C$  è assorbente se e solo se  $p_C(x) < \infty$  per ogni  $x \in X$ .
- Si ha  $\{p_C < 1\} \subseteq C \subseteq \{p_C \leq 1\}$

*Dimostrazione.*

Mostriamo le varie proprietà

- Evidente dalla definizione di assorbente.
- Se  $p_C(x) < 1$  allora esiste  $0 \leq t \leq 1$  tale che  $x \in tC$ , cioè  $x = tc$ . Poiché  $(1-t)0 = 0$  si ha  $x = tc + (1-t)0$  e per convessità questo è un elemento di  $C$ , cioè  $x \in C$ .  
Se  $x \in C$  allora  $1 \in \{t \geq 0 \mid x \in tC\}$ , quindi  $p_C(x) \leq 1$ .

□

*Osservazione 2.27* (Famiglia di seminorme induce SVTLC).

Se  $\mathcal{P}$  è una famiglia di seminorme su  $X$ , possiamo definire

$$\mathcal{B} = \{B_p(0, r) \mid p \in \mathcal{P}, r \in \mathbb{R}_+\}, \quad B_p(0, r) = \{y \in X \mid p(x - y) < r\}$$

Si può mostrare che  $\mathcal{B}$  è un insieme di dischi e quindi induce una struttura di SVTLC su  $X$ .

*Osservazione 2.28.*

Se  $\mathcal{P}$  è una famiglia di seminorme su  $X$  e definiamo

$$\tilde{\mathcal{P}} = \{\max(p_1, \dots, p_n) \mid p_i \in \mathcal{P}\}$$

allora  $\mathcal{U} = \{B_p(0, r) \mid p \in \tilde{\mathcal{P}}, r > 0\}$  è una base di intorni di 0 che induce la topologia dell'osservazione precedente.

*Osservazione 2.29* (Ogni SVTLC è indotto da seminorme).

Poiché se  $B$  è assorbente, bilanciato e convesso, esso produce una seminorma  $p_B$  data dal funzionale di Minkowski tale che  $\{p_B < 1\} \subseteq B \subseteq \{p_B \leq 1\}$ , ogni topologia di  $X$  come SVTLC si può ottenere a partire da famiglie di seminorme.

**Proposizione 2.30.**

*La topologia di SVTLC indotta da  $\mathcal{P}$  insieme di seminorme è  $T_0$  se e solo se  $\mathcal{P}$  è separante, cioè per ogni  $x \in X \setminus \{0\}$  esiste  $p \in \mathcal{P}$  tale che  $p(x) \neq 0$ .*

*Dimostrazione.*

Se  $p(x) = 0$  per ogni  $p \in \mathcal{P}$  allora  $x \in B(0, r)$  per ogni  $p \in \tilde{\mathcal{P}}$  e per ogni  $r > 0$ , quindi  $x \in U$  per ogni  $U \in \mathcal{U}_X$ , ovvero

$$x \in \bigcap_{U \in \mathcal{U}_X} U = \overline{\{0\}}.$$

□

## 2.3 Continuità di operatori lineari in SVT

**Proposizione 2.31** (Continuità mappe lineari).

Sia  $T : X \rightarrow Y$  lineare tra SVT. Valgono le seguenti affermazioni

1.  $T$  è continua se e solo se è continua in 0
2.  $T$  è continua se e solo se per ogni  $U \in \mathcal{U}_Y$  esiste  $V \in \mathcal{U}_X$  tale che  $T(V) \subseteq U$
3. Se  $X$  e  $Y$  sono SVTLC con topologia indotta dalle famiglie di seminorme  $\mathcal{P}$  e  $\mathcal{Q}$  rispettivamente,  $T$  è continua se e solo se

$$\forall q \in \mathcal{Q}, \exists p_1, \dots, p_n \in \mathcal{P}, \exists M \geq 0 \quad \text{tali che}$$

$$\forall x \in X, q(Tx) \leq M \max \{p_1(x), \dots, p_n(x)\}$$

4. Se  $X$  e  $Y$  sono SVTLC con topologia indotta dalle famiglie di seminorme  $\mathcal{P}$  e  $\mathcal{Q}$  rispettivamente con  $\mathcal{P}$  e  $\mathcal{Q}$  stabili per max allora  $T$  è continua se e solo se  $\forall q \in \mathcal{Q}$  esistono  $p \in \mathcal{P}$  e  $M \geq 0$  tali che

$$q(Tx) \leq Mp(x)$$

*Dimostrazione.*

Dimostriamo le affermazioni

1. Basta traslare dato che traslare è un omeomorfismo.
2. Ovvio.
3. La condizione significa che la palla di centro 0 e raggio 1 rispettivamente alla seminorma  $\max(p_1, \dots, p_n)$  di  $X$  ha immagine tramite  $T$  contenuta nella palla di raggio  $M$  rispetto a  $q$ , concludendo per il punto 2. a meno di omotetia.
4. Caso sopra.

□

**Proposizione 2.32** (Caratterizzazione funzionali continui).

Sia  $f \in X'_{alg} \setminus \{0\}$  con  $X$  un  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale. Le seguenti affermazioni sono equivalenti

1.  $f$  è continua
2.  $\ker f$  è chiuso
3.  $\ker f$  non è denso
4.  $f$  non è surgettiva su un aperto non vuoto

5.  $f$  è limitata su un intorno di 0

*Dimostrazione.*

Diamo le implicazioni

1.  $\implies$  2. Ovvio perché  $\{0\}$  è chiuso in  $\mathbb{K}$ .
2.  $\implies$  3. Se  $\ker f$  è denso allora  $\overline{\ker f} = X$  e quindi ha codimensione 0, ma  $\ker f$  ha codimensione 1 in quanto  $f \neq 0$ , quindi  $\ker f \neq \overline{\ker f}$ , cioè non è chiuso.
3.  $\implies$  4. Se  $\ker f$  non è denso esiste un aperto non vuoto  $A$  disgiunto da  $\ker f$ , cioè  $0 \notin f(A)$  e in particolare  $f$  non è surgettiva su  $A$ .
4.  $\implies$  5. Se  $f$  non è surgettiva su aperto non vuoto allora non lo è su un intorno bilanciato  $U$  di 0 e quindi  $f(U)$  è un insieme bilanciato di  $\mathbb{K}$  diverso da  $\mathbb{K}$  in quanto  $f \neq 0$ , dunque  $f(U)$  è un disco e in particolare è limitato.
5.  $\implies$  1. Se  $|fx| \leq M$  per ogni  $x \in U \in \mathcal{U}_X$  allora per omogeneità

$$|f(x)| \leq \varepsilon \quad \forall x \in \frac{\varepsilon}{M}U \in \mathcal{U}_X$$

per un qualsiasi  $\varepsilon > 0$ , quindi  $f$  è continua in 0. Questo conclude perché

$$f(x) = f(x_0) + f(x - x_0).$$

□

## 2.4 Topologie deboli

**Proposizione 2.33** (Topologia iniziale nel caso SVT).

Sia  $X$  uno spazio vettoriale su  $\mathbb{K}$  e sia  $\mathcal{F} : \{T_i : X \rightarrow Y_i\}$  dove ogni  $Y_i$  è SVT e  $T_i$  è lineare, allora la topologia iniziale su  $X$  indotta<sup>4</sup> da  $\mathcal{F}$  rende  $X$  uno SVT.

*Dimostrazione.*

Voglio verificare che  $+$  e  $\cdot$  sono mappe continue per la topologia iniziale.

$$\begin{array}{ccc} X \times X & \xrightarrow{+} & X \\ T_i \times T_i \downarrow & & \downarrow T_i \\ Y_i \times Y_i & \xrightarrow{+_i} & Y_i \end{array}$$
  

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{K} \times X & \xrightarrow{\cdot} & X \\ id_{\mathbb{K}} \times T_i \downarrow & & \downarrow T_i \\ \mathbb{K} \times Y_i & \xrightarrow{\cdot_i} & Y_i \end{array}$$

Per la proprietà universale della topologia iniziale (A.2), vogliamo verificare che  $T_i \circ + = +_i \circ (T_i \times T_i)$  è continua per ogni  $i$  e similmente per  $T_i \circ \cdot$ . Questo è vero perché la topologia iniziale è rende  $T_i$  continua per ogni  $i$ . □

*Osservazione 2.34.*

Se ogni  $Y_i$  inoltre è SVTLC allora anche  $X$  lo è.

<sup>4</sup>vedi (A.1)

**Definizione 2.35** (Topologie deboli).

Sia  $X$  un  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale e  $\mathcal{F} \subseteq X'$  (duale algebrico). La topologia iniziale indotta da  $\mathcal{F}$  viene detta la **topologia debole di  $\mathcal{F}$**  e si indica  $\sigma(X, \mathcal{F})$ .

*Osservazione 2.36.*

$\sigma(X, \mathcal{F}) = \sigma(X, \text{Span}_{\mathbb{K}}(\mathcal{F}))$  quindi senza perdita di generalità possiamo sempre supporre  $\mathcal{F}$  sottospazio vettoriale di  $X'$ .

*Osservazione 2.37.*

La famiglia di seminorme associata a  $\mathcal{F}$  (quella che induce la stessa topologia di  $SVTLC$ ) è data da

$$\mathcal{P} = \{|f| \mid f \in \mathcal{F}\}$$

*Osservazione 2.38.*

La topologia debole  $\sigma(X, \mathcal{F})$  è  $T_0$  (e quindi Hausdorff perché SVT) se e solo se la famiglia  $\mathcal{F}$  è separante ( $\forall x \in X \setminus \{0\}, \exists f \in \mathcal{F}$  tale che  $f(x) \neq 0$ ).

**Lemma 2.39.**

Siano  $f_0, \dots, f_n \in X'_{alg}$  per  $X$  un  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale, allora sono equivalenti

1.  $f_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i f_i$
2.  $|f_0| \leq M \max_{i \in \{1, \dots, n\}} |f_i|$  per qualche  $M \geq 0$
3.  $\ker f_0 \supseteq \bigcap_{i=1}^n \ker f_i$

*Dimostrazione.*

Diamo le tre implicazioni

**1.  $\implies$  2.** Da 1. segue  $|f_0| \leq \sum_{i=1}^n |\lambda_i| |f_i| \leq M \max |f_i|$  per  $M = \sum |\lambda_i|$ .

**2.  $\implies$  3.** Se  $x \in \bigcap \ker f_i$ , cioè  $\langle f_i, x \rangle = 0$  per ogni  $i$ , allora  $\langle f_0, x \rangle \leq M \cdot 0 = 0$ , cioè  $f_0(x) = 0$  e abbiamo l'inclusione voluta.

**3.  $\implies$  1.** Sia  $F : X \rightarrow \mathbb{K}^n$  data da  $F = (f_1, \dots, f_n)$ , allora

$$\ker F = \bigcap \ker f_i \subseteq \ker f_0$$

quindi abbiamo una fattorizzazione

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f_0} & \mathbb{K} \\ F \downarrow & \nearrow L & \\ \mathbb{K}^n & & \end{array}$$

dove  $L(x_1, \dots, x_n) = \sum \lambda_i x_i$  per dei  $\lambda_i$  (in quanto è una forma lineare). Ma allora  $f_0 = L \circ F = \sum \lambda_i f_i$  come voluto.

□

**Proposizione 2.40** (Duale per topologia debole).

Dato  $X$   $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale e  $\mathcal{F}$  sottospazio di  $X'_{alg}$  allora

$$(X, \sigma(X, \mathcal{F}))^* = \mathcal{F}$$



*Dimostrazione.*

Sia  $f_0 \in (X, \sigma(X, \mathcal{F}))^*$ , allora per la proposizione (2.31) esistono  $f_1, \dots, f_n \in \mathcal{F}$  e  $M \geq 0$  tali che per ogni  $x \in X$

$$|f_0(x)| \leq M \max_i |f_i(x)|.$$

Dunque per il lemma (2.39)  $f_0$  si scrive come combinazione lineare delle  $f_i$  e quindi in particolare  $f_0 \in \mathcal{F}$ .

L'altra inclusione è ovvia per definizione di topologia debole.  $\square$

*Osservazione 2.41.*

Se  $X$  ha dimensione infinita,  $\sigma(X, \mathcal{F})$  non è mai localmente limitata. In particolare ogni intorno di 0 contiene uno spazio vettoriale di codimensione finita.

*Dimostrazione.*

Se  $U$  intorno di 0 per  $\sigma(X, \mathcal{F})$  allora esistono  $f_1, \dots, f_n \in \mathcal{F}$  tali che<sup>5</sup>

$$U \supseteq \bigcap_{i=1}^n \{|f_i| < 1\} \supseteq \bigcap_{i=1}^n \ker f_i$$

e l'intersezione di questi nuclei ha codimensione al massimo  $n$ .  $\square$

## 2.4.1 Caso degli spazi normati

**Definizione 2.42** (Topologia debole).

Se  $X$  è normato, la **topologia debole** su  $X$  è la topologia debole associata a  $X^*$ , cioè  $\sigma(X, X^*)$ .

**Proposizione 2.43.**

*La topologia debole è localmente convessa e Hausdorff.*

*Dimostrazione.*

Per Hahn-Banach (4.2), il duale  $X^*$  separa i punti  $\square$

**Definizione 2.44** (Topologia debole\*).

Su  $X^*$  possiamo considerare la topologia debole associata alle valutazioni  $X \subseteq X^{**}$ , cioè scegliendo

$$\mathcal{F} = \{val_x \in (X^*)' \mid x \in X\}.$$

Questa è la **topologia debole\*** su  $X^*$  e la indichiamo  $\sigma(X^*, X)$ .

*Osservazione 2.45.*

La topologia debole\* rende  $X^*$  uno SVTLC  $T_0$  (e quindi Hausdorff), infatti se  $f \in X^* \setminus \{0\}$  allora esiste  $x \in X$  tale che  $f(x) \neq 0$ .

*Osservazione 2.46.*

In generale  $\sigma(X^*, X)$  è meno fine di  $\sigma(X^*, X^{**})$ . Abbiamo uguaglianza solo quando  $X = X^{**}$  in quanto se  $X \neq X^{**}$  allora dalla proposizione (2.40) ricaviamo

$$(X^*, \sigma(X^*, X))^* = X \neq X^{**} = (X^*, \sigma(X^*, X^{**}))^*$$

e quindi in partenza  $\sigma(X^*, X^{**}) \neq \sigma(X^*, X)$

<sup>5</sup>vedi lemma (2.39)

*Osservazione 2.47.*

Poiché  $(X, \|\cdot\|) \hookrightarrow (X^{**}, \|\cdot\|)$  isometricamente allora  $(X, \sigma(X, X^*))$  ha la topologia indotta come sottospazio da<sup>6</sup>  $(X^{**}, \sigma(X^{**}, X^*))$ .

*Dimostrazione.*

Questo deriva dalla transitività della topologia iniziale (A.3) dove la prima famiglia è la mappa  $X \hookrightarrow X^{**}$  e l'unica altra famiglia sono gli elementi di  $X^*$  che vanno verso  $\mathbb{K}$ .  $\square$

## 2.5 Teorema di Riesz

**Teorema 2.48** (Riesz).

Per  $X$  SVT  $T_0$  su  $\mathbb{K}$  sono equivalenti

1.  $X$  ha dimensione finita
2.  $X \cong \mathbb{K}^n$  per qualche  $n \in \mathbb{N}$
3.  $X$  è localmente compatto

*Dimostrazione.*

Diamo le implicazioni

1.  $\implies$  2. Sia  $X$  SVT  $T_0$  di dimensione  $n$  e sia  $x_1, \dots, x_n$  una sua base di Hamel. Allora

$$\varphi : \begin{array}{ccc} \mathbb{K}^n & \longrightarrow & X \\ \lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n) & \longmapsto & \sum_{i=1}^n \lambda_i x_i \end{array}$$

è lineare, bigettiva e continua.

Dimostriamo che è aperta: L'insieme  $\partial B(0, 1) \subseteq \mathbb{K}^n$  visto con la norma euclidea è compatto, quindi  $\varphi(\partial B(0, 1))$  è compatto, e quindi chiuso perché  $X$  è Hausdorff. Per bigettività  $0 \notin \varphi(\partial B(0, 1))$ , quindi esiste un intorno  $V$  di 0 in  $X$  disgiunto da  $\varphi(\partial B(0, 1))$ . Senza perdita di generalità  $V$  bilanciato, allora  $\varphi^{-1}(V)$  è un insieme bilanciato di  $\mathbb{K}^n$  disgiunto da  $\partial B(0, 1)$ , dunque  $\varphi^{-1}(V) \subseteq B(0, 1)$  (se avesse un punto di modulo maggiore a 1 allora in quanto bilanciato conterrebbe tutti i punti tra esso e 0, intersecando il bordo).

Questo mostra che  $B(0, 1)$  è un intorno di 0 e quindi  $\varphi$  è aperta (per traslazione e omotetia  $\varphi(B(\lambda, r))$  è intorno di  $\varphi(\lambda)$  per ogni  $\lambda \in \mathbb{K}^n$  e  $r > 0$  e concludo notando che aperti di  $\mathbb{K}^n$  sono dati da unioni di palle).

2.  $\implies$  3.  $\mathbb{K}^n$  è localmente compatto perché conosciamo la topologia euclidea, quindi anche  $X$  lo è.

3.  $\implies$  1. Sia  $X$  SVT localmente compatto e  $T_0$ . Mostriamo che  $X$  è I-numerabile:

Sia  $V$  intorno compatto di 0. Mostriamo che  $\{\frac{1}{n}V\}$  è una base di intorni di 0. Sia  $U$  un intorno (senza perdita di generalità  $U$  bilanciato). Poiché  $V$  è compatto e<sup>7</sup>  $V \subseteq \bigcup_{n \geq 1} nU = X$  possiamo estrarre un sottoricoprimento finito

$$V \subseteq \bigcup_{1 \leq i \leq k} n_i U \stackrel{U \text{ bilanciato}}{=} \left( \max_{1 \leq i \leq k} n_i \right) U$$

<sup>6</sup>nota che  $X^*$  lo si può pensare come immerso in  $X^{***} = (X^{**})^*$ , quindi stiamo considerando la topologia debole\* su  $(X^*)^*$

<sup>7</sup> $U$  assorbente

infatti  $\frac{n_i}{\max n_i}U \subseteq U$ . Questo mostra che  $\{\frac{1}{n}V\}$  è una base numerabile di intorni di  $0 \in X$ .

Notiamo che  $V$  si può coprire con un numero finito di traslati di  $\frac{1}{2}V$  in quanto  $V \subseteq V + \frac{1}{2}V$  e applico compattezza al variare di  $v + \frac{1}{2}V$  per  $v \in V$ . Sia allora  $F$  tale che  $V \subseteq \bigcup_{v \in F} v + \frac{1}{2}V$  con  $F$  finito e poniamo  $Y = \text{Span}_{\mathbb{K}} F$ . Notiamo che  $Y$  ha dimensione finita.

Procedendo per induzione, per ogni  $n \in \mathbb{N}$  si ha  $V \subseteq Y + 2^{-n}V$ , ma  $\{2^{-n}V\}_{n \geq 0}$  è una base di intorni, quindi

$$\overline{Y} = \bigcap_{n \geq 0} Y + 2^{-n}V \supseteq V$$

e dato che  $V$  è un intorno assorbente,  $X = \bigcup_{n \geq 0} nV \subseteq \overline{Y}$ , cioè  $Y$  è denso in  $X$ .

Poiché  $Y$  ha dimensione finita, per l'implicazione precedente  $Y \cong \mathbb{K}^n$ , in particolare  $Y$  è completo. Se  $x \in X = \overline{Y}$ , poiché  $X$  è I-numerabile, si ha che esiste  $y_k \rightarrow x$  in  $X$  con  $y_k \in Y$  con  $(y_k)$  di Cauchy in  $X$  e quindi anche in  $Y$ , che però è completo, quindi  $y_k \rightarrow y$  per  $y \in Y$ , ma  $X$  è Hausdorff, quindi  $y = x$ .

□

*Osservazione 2.49.*

Se non avessimo supposto  $T_0$  potremmo considerare  $X/\overline{\{0\}}$  e troveremmo  $X \cong \mathbb{K}^n \oplus \overline{\{0\}}$ .

## Capitolo 3

# Limitatezza e Banach-Steinhaus

### 3.1 Limitatezza

**Definizione 3.1** (Insieme limitato).

Un sottoinsieme  $S$  di uno SVT  $X$  con  $\mathcal{U}$  intornoi di 0 è **limitato** se è assorbito da ogni elemento di  $\mathcal{U}$ , cioè<sup>1</sup> per ogni  $U \in \mathcal{U}$  esiste  $n \in \mathbb{N}$  tale che  $nU \supseteq S$ .

*Osservazione 3.2.*

Valgono le seguenti proprietà

1. Se  $S$  è limitato allora anche  $\overline{S}$  lo è, basta considerare intornoi chiusi.
2. Se  $S$  e  $S'$  sono limitati,  $S \cup S'$  lo è.
3. Ogni compatto è limitato, basta scegliere un intorno limitato di  $x$  per ogni  $x \in K$  e poi estrarre un sottoricoprimento finito. Un tale intorno esiste scalando intornoi di 0 bilanciati.
4. Ogni  $T : X \rightarrow Y$  lineare e continua tra SVT è limitata, cioè per ogni  $S \subseteq X$  limitato,  $T(S)$  è limitato. In generale non vale il viceversa ma vale se  $X$  e  $Y$  sono normati.

**Proposizione 3.3** (Limitatezza in SVTLC).

Se  $(X, \mathcal{P})$  è SVTLC allora  $S \subseteq X$  è limitato se e solo se per ogni seminorma  $p \in \mathcal{P}$ ,  $p$  è limitata su  $S$ .

*Dimostrazione.*

$p$  limitata su  $S$  significa che

$$S \subseteq B_p(0, R_p) = \frac{R_p}{\varepsilon} B_p(0, \varepsilon)$$

e le palle  $\{B_p(0, \varepsilon)\}_{p \in \mathcal{P}, \varepsilon > 0}$  sono una prebase di intornoi di 0 in  $X$ . □

**Corollario 3.4.**

Se  $(X, \|\cdot\|)$  è normato allora  $S$  è limitato se e solo se  $\exists R > 0$  tale che  $S \subseteq B(0, R)$ .

<sup>1</sup>questa condizione è equivalente a chiedere  $tU \supseteq S$  per ogni  $t$  con  $|t| \geq n$  o a chiedere che l'assorbimento valga per elementi di una pre-base di intornoi di 0 al posto di tutti gli elementi di  $\mathcal{U}$ .

**Esercizio 3.5.**

Se  $X$  è I-numerabile e  $T : X \rightarrow Y$  lineare tale che per ogni  $x_k \rightarrow 0$  in  $X$  esiste  $x_{k_j}$  tale che  $T(x_{k_j})$  limitata allora  $T$  è continua.

**Proposizione 3.6** (Caratterizzazione sequenziale della limitatezza).

Se  $X$  SVT e  $S \subseteq X$ ,  $S$  è limitato se e solo se per ogni  $(s_k)$  successione in  $S$  e per ogni  $(\alpha_k)$  successione in  $\mathbb{K}$  infinitesima, si ha  $\alpha_k s_k \rightarrow 0$ .

*Dimostrazione.*

Sia  $S$  limitato,  $(s_k)$  successione in  $S$  e  $(\alpha_k)$  successione infinitesima in  $\mathbb{K}$ . Sia  $U$  intorno bilanciato di 0 e sia  $n$  tale che  $S \subseteq nU$ . Notiamo che definitivamente  $|\alpha_k| < \frac{1}{n}$ , quindi

$$\alpha_k s_k \in \alpha_k S \subseteq \alpha_k nU \stackrel{\text{k grande}}{\subseteq} U.$$

Supponiamo ora  $S$  non limitato, allora esiste  $U \in \mathcal{U}_X$  che non assorbe  $S$ , cioè per ogni  $n \in \mathbb{N}$  esiste  $s_n \in S \setminus nU$ . Dunque  $(s_n)$  è una successione in  $S$  tale che  $\frac{1}{n}s_n \notin U$  per costruzione, dunque  $\frac{1}{n}s_n$  non tende a 0 in  $X$  nonostante  $\frac{1}{n}$  sia infinitesima.  $\square$

**Proposizione 3.7.**

Le successioni di Cauchy sono limitate.

*Dimostrazione.*

Sia  $(x_k)$  una successione di Cauchy in  $X$ , cioè per ogni  $U \in \mathcal{U}_X$  esiste  $n \in \mathbb{N}$  tale che per ogni  $p, q \geq n$  si ha  $x_p - x_q \in U$ .

Fissiamo  $U \in \mathcal{U}_X$  e sia  $V$  bilanciato tale che  $V + V \subseteq U$ . Per la definizione di successione di Cauchy esiste  $n_0$  tale che  $x_k - x_{n_0} \in V$  per ogni  $k \geq n_0$ , cioè  $x_k \in x_{n_0} + V$ .

Inoltre, esiste  $m$  tale che  $x_k \in mV$  per ogni  $k \leq n_0$  dato che un insieme finito è limitato. Allora per ogni  $k \in \mathbb{N}$  si ha  $x_k \in mV + V$ , infatti se  $k \leq n_0$  allora abbiamo  $mV$ , se  $k > n_0$  allora  $x_{n_0} \in mV$  e  $x_k \in x_{n_0} + V \subseteq mV + V$ .

Poiché  $V$  è bilanciato,  $mV + V \subseteq mV + mV = m(V + V) \subseteq mU$ .  $\square$

## 3.2 Spazi di Baire e II-categoria

**Teorema 3.8** (Baire).

Se  $\{A_k\}_{k \geq 0}$  è una famiglia numerabile di aperti densi di uno spazio metrico completo allora  $\bigcap A_k$  è denso.

*Dimostrazione.*

Per induzione si definisce una successione di palle chiuse di  $X$  dove  $B_0$  è arbitraria e

$$B_k = \overline{B(x_k, r_k)} \text{ tali che } B_{k+1} \subseteq B_k \cap A_k \text{ e } r_k = o(1)$$

che possiamo fare perché  $A_k$  è un aperto denso.

Allora la successione dei centri è una successione di Cauchy, infatti se  $p, q \geq n$  si ha  $x_p, x_q \in B_n$  e quindi  $d(x_p, x_q) \leq 2r_n$ . Dunque  $x_n \rightarrow x^*$  in  $X$  per completezza. Inoltre, poiché  $x_k \in B_n$  definitivamente,  $x^* = \lim x_k \in B_n$  per ogni  $n$  (dato che  $B_n$  è chiuso). In particolare  $x^* \in B_{n+1} \subseteq A_n$  per ogni  $n$  e quindi  $x^* \in \bigcap A_n$ . Per costruzione  $x^* \in B_0$ , quindi per ogni palla  $B_0$  abbiamo mostrato che  $B_0 \cap \bigcap A_n \neq \emptyset$ , cioè  $\bigcap A_n$  è denso.  $\square$

**Esercizio 3.9.**

La stessa conclusione vale se  $X$  è localmente compatto al posto di metrico completo.

**Definizione 3.10** (Spazio di Baire).

Uno spazio topologico è **di Baire** se ogni intersezione numerabile di aperti densi è densa.

*Osservazione 3.11.*

Ogni aperto non vuoto di  $X$  di Baire è ancora di Baire. Basta verificare che ogni aperto denso di  $A$  è della forma  $A \cap U$  con  $U$  aperto denso di  $X$ .

**Definizione 3.12** (Sottoinsieme di I- e II-categoria).

Un sottoinsieme  $S$  di  $X$  è di **I-categoria (di Baire) in  $X$**  se è unione numerabile di insiemi  $(E_i)_{i \in \mathbb{N}}$  con  $\text{int}(\overline{E_i}) = \emptyset$ .

Inoltre  $S$  è di **II-categoria (di Baire) in  $X$**  se non è di I-categoria.

*Osservazione 3.13.*

Se  $X$  è di Baire e  $S \subseteq X$  è di I-categoria allora  $X \setminus S$  è di II-categoria in quanto  $X$  stesso è di II-categoria (se  $X = \bigcup E_i$  con  $E_i$  chiusi a parte interna vuota allora  $\emptyset = \bigcap E_i^c$  con  $E_i^c$  aperti densi, ma questo è assurdo perché  $X$  di Baire).

### 3.3 Teorema di Banach-Steinhaus

**Definizione 3.14** (Famiglia equicontinua).

Una famiglia  $\Gamma$  di operatori lineari continui fra SVT  $X$  e  $Y$  è **equicontinua** se per ogni  $U \in \mathcal{U}_Y$  esiste  $V \in \mathcal{U}_X$  tale che per ogni  $T \in \Gamma$ ,  $T(V) \subseteq U$ .

*Osservazione 3.15.*

Possiamo riformulare la condizione nei seguenti modi: per ogni  $U \in \mathcal{U}_Y$  esiste  $V \in \mathcal{U}_X$  tale che

$$\forall T \in \Gamma, V \subseteq T^{-1}(U) \iff V \subseteq \bigcap_{T \in \Gamma} T^{-1}(U) \doteq \Gamma^{-1}(U).$$

Equivalentemente la condizione predica che per ogni  $V \in \mathcal{U}_Y$  si abbia  $\Gamma^{-1}(V) \in \mathcal{U}_X$ .

*Osservazione 3.16.*

Se  $T : X \rightarrow Y$  fra spazi normati, la norma degli operatori

$$\|T\| = \|T\|_{\infty, B(0,1)} = \text{migliore costante di Lipschitz per } T.$$

**Esempio 3.17.**

Se  $X$  e  $Y$  sono normati,  $\Gamma$  è equicontinua se e solo se  $\Gamma$  è limitato in  $L(X, Y)$  rispetto alla norma degli operatori.

**Teorema 3.18** (Banach-Steinhaus / Uniforme limitatezza).

Siano  $X, Y$  SVT,  $S \subseteq X$  di seconda categoria e  $\Gamma \subseteq L(X, Y)$  con  $\Gamma$  puntualmente limitata su  $S \subseteq X$ , cioè per ogni  $s \in S$ ,  $\Gamma(s) = \bigcup_{T \in \Gamma} T(s)$  è limitato in  $Y$ .

Allora  $\Gamma$  è equicontinua.

*Dimostrazione.*

Sia  $U \in \mathcal{U}_Y$  e consideriamo  $V \in \mathcal{U}_Y$  chiuso tale che  $V - V \subseteq U$ . Per ipotesi, per ogni  $x \in S$  si ha che  $\Gamma(x)$  è limitato in  $Y$ , quindi viene assorbito da  $V$ , cioè esiste  $n_x \in \mathbb{N}$  tale che per ogni  $T \in \Gamma$  si ha  $T(x) \in n_x V$ , cioè tale che

$$x \in \bigcap_{T \in \Gamma} n_x T^{-1}(V) = n_x \bigcap_{T \in \Gamma} T^{-1}(V) = n_x \Gamma^{-1}(V).$$

Dunque  $S \subseteq \bigcup_{n \in \mathbb{N}} n \Gamma^{-1}(V)$ . Notiamo che poiché  $V$  è chiuso,  $T^{-1}(V)$  è chiuso e quindi anche  $\Gamma^{-1}(V)$  lo è perché intersezione di chiusi. Poiché  $S$  è di seconda categoria anche

l'unione delle versioni riscalate di  $\Gamma^{-1}(V)$  lo è, dunque questo insieme non è unione numerabile di chiusi con parte interna vuota, quindi almeno uno tra gli  $n\Gamma^{-1}(V)$  ha parte interna non vuota, quindi anche  $\Gamma^{-1}(V)$  ha parte interna non vuota scalando per  $\frac{1}{n}$ .

Quindi  $\Gamma^{-1}(V)$  è intorno di qualche suo punto, dunque<sup>2</sup>  $\Gamma^{-1}(V) - \Gamma^{-1}(V)$  è un intorno di 0.

Ricordando che  $V - V \subseteq U$  si ha

$$T^{-1}(U \supseteq T^{-1}(V - V) = T^{-1}(V) - T^{-1}(V)) \supseteq \Gamma^{-1}(V) - \Gamma^{-1}(V)$$

quindi passando all'intersezione su  $T \in \Gamma$  si ha

$$\Gamma^{-1}(U) \supseteq \Gamma^{-1}(V) - \Gamma^{-1}(V) \in \mathcal{U}_X,$$

cioè abbiamo mostrato che per ogni  $U \in \mathcal{U}_Y$  si ha  $\Gamma^{-1}(U) \in \mathcal{U}_X$ , che è equivalente all'equicontinuità di  $\Gamma$ .  $\square$

**Corollario 3.19** (Sottoinsiemi limitati di operatori).

Se  $X$  e  $Y$  sono Banach e  $\Gamma \subseteq L(X, Y)$  è puntualmente limitata in  $X$  (o volendo anche un sottoinsieme di  $X$  di II-categoria) allora  $\Gamma$  è un insieme limitato in  $L(X, Y)$ .

*Dimostrazione.*

Diretta applicazione di Banach-Stenhaus (3.18) notando che spazi di Banach sono in particolare SVT e che equicontinuità per la norma su  $L(X, Y)$  significa limitatezza.   
\*\*\*\*\*  $\square$

**Esercizio 3.20.**

Siano  $X, Y$  SVT. Trovare la topologia meno fine  $\tau$  di SVT su  $L(X, Y)$  per la quale

$$\Gamma \text{ puntualmente limitato in } L(X, Y) \iff \Gamma \text{ limitato nella topologia } \tau.$$

**Corollario 3.21.**

Siano  $X$  e  $Y$  Banach e sia  $(T_n) \subseteq L(X, Y)$  puntualmente convergente. Allora il limite  $T$  è ancora lineare, continuo e con norma

$$\|T\| \leq \liminf_{n \rightarrow \infty} \|T_n\|.$$

*Dimostrazione.*

Per il corollario precedente (3.19) si ha che  $(T_n)$  sono limitati in  $\|\cdot\|$  e il limite puntuale è lineare in quanto

$$T_n(\alpha x + \beta y) = \alpha T_n(x) + \beta T_n(y) \rightarrow \alpha T(x) + \beta T(y).$$

Questo mostra che  $T$  è limitato e lineare, quindi  $T \in L(X, Y)$ .

Inoltre per ogni  $x \in X$  si ha

$$\|T(x)\| = \lim_n \|T_n(x)\| \leq \left( \sup_n \|T_n\| \right) \|x\|,$$

quindi  $\|T\| \leq \sup_n \|T_n\|$ . Ragionando analogamente per una sottosuccessione di  $(T_n)$  che in norma converge a  $\liminf_n \|T_n\|$  ricaviamo

$$\|T\| \leq \liminf_n \|T_n\|.$$

$\square$

---

<sup>2</sup>se  $a_0 \in \text{int}(A)$  allora  $A - a_0 \subseteq A - A$  è un intorno di 0.

*Osservazione 3.22.*

In generale NON vale  $T_n \rightarrow T$  in  $\|\cdot\|$ .

**Proposizione 3.23** (Bilineare separatamente continua è continua).

Sia  $b : X \times Y \rightarrow Z$  bilineare e separatamente continua, cioè per ogni  $x \in X, y \in Y$  si ha che  $b(x, \cdot) : Y \rightarrow Z$  e  $b(\cdot, y) : X \rightarrow Z$  sono lineari e continue. Allora  $b$  è continua, cioè

$$\sup_{\|x\| \leq 1, \|y\| \leq 1} \|b(x, y)\| < \infty.$$

*Dimostrazione.*

Consideriamo la famiglia

$$\Gamma = \{b(x, \cdot) : Y \rightarrow Z\}_{x \in X, \|x\| \leq 1} \subseteq L(Y, Z).$$

Per ipotesi  $\Gamma$  è puntualmente limitata in  $Y$ , infatti per ogni  $y \in Y$

$$\sup_{b(x, \cdot) \in \Gamma} \|b(x, \cdot)\|_{L(Y, Z)} = \sup_{\|x\| \leq 1} \|b(x, y)\|_Z = \|b(\cdot, y)\|_{L(X, Z)} \|y\| < \infty$$

Allora  $\Gamma$  è limitata in  $\|\cdot\|_{L(Y, Z)}$ , cioè per ogni  $x \in X$  tale che  $\|x\| \leq 1$  si ha

$$\|b(x, y)\|_Z \leq M \|y\|$$

e quindi al variare di  $y$  con  $\|y\| \leq 1$  troviamo  $\|b\|_{L(X \times Y, Z)} \leq M$ .  $\square$

**Esercizio 3.24.**

Esiste una isometria lineare

$$\begin{array}{ccc} L(X, L(Y, Z)) & \longrightarrow & L^2(X \times Y, Z) \\ T & \longmapsto & (x, y) \mapsto T(x)(y) \end{array}$$

dove  $L^2(X \times Y, Z)$  sono le bilineari.

**Proposizione 3.25** ( $w^*$ -limitato vs limitato in  $\|\cdot\|_{X^*}$ ).

Sia  $Y = \mathbb{K}$  e  $X$  Banach. Sia  $\Gamma \subseteq X^*$ , allora  $\Gamma$  è  $w^*$ -limitato se e solo se è limitato in  $\|\cdot\|_{X^*}$ .

*Dimostrazione.*

Essere limitato nella topologia debole\* significa “essere assorbito da ogni intorno  $w^*$  di  $X^*$ ” cioè, usando intorni di prebase, essere assorbiti da insiemi della forma

$$\{f \in X^* \mid |f(x)| < 1\}$$

per  $x \in X$ . Notiamo che  $\Gamma$  viene assorbito da  $\{f \in X^* \mid |f(x)| < 1\}$  significa  $\Gamma(x)$  limitato in  $\mathbb{K}$ . Per il corollario (3.19) si ha che  $\Gamma$  è limitato in  $L(X, \mathbb{K}) = X^*$ .

L'altra implicazione è ovvia perché la norma operatore già rende continui gli operatori e indebolire la topologia non può trasformare un insieme limitato in uno non limitato.  $\square$

*Osservazione 3.26.*

Se  $E \subseteq F$  è un sottospazio allora  $\Gamma \subseteq E$  è limitato in  $F$  se e solo se è limitato in  $E$  per la topologia indotta.

**Proposizione 3.27.**

Sia  $\Gamma \subseteq X$ , allora  $\Gamma$  è  $w$ -limitato se e solo se è  $\|\cdot\|$ -limitato.

*Dimostrazione.*

Se  $\Gamma$  è  $\sigma(X, X^*)$ -limitato allora tramite l'immersione isometrica  $X \rightarrow X^{**}$  troviamo un insieme  $\sigma(X^{**}, X^*)$ -limitato. A questo punto basta applicare la proposizione precedente (3.25).  $\square$



### 3.3.1 Teorema della mappa aperta

**Lemma 3.28.**

Siano  $X$  e  $Y$  spazi di Banach,  $B$  palla unitaria chiusa di  $X$ ,  $T \in L(X, Y)$ ,  $U$  limitato,  $U \subseteq Y$  tali che se  $0 < t < 1$  allora

$$U \subseteq TB + tU.$$

Allora si ha  $(1 - t)U \subseteq TB$ .

*Dimostrazione.*

RIPECALDA DA DENTRO LA DIMOSTRAZIONE MAPPA APERTA

per ogni  $u_0 \in U$  costruisco  $(x_k) \subseteq B$  e  $(u_k) \subseteq U$  tali che  $u_k = Tx_k + tu_{k+1}$  per ogni  $k \geq 0$ .  $\square$

*Osservazione 3.29.*

Se  $U$  è un intorno di 0 limitato in  $Y$ , o anche  $U$  assorbente, allora  $T$  è surgettivo.

**Esercizio 3.30** (Teorema di estensione di Tietze).

Se  $X$  è T4,  $Y \subseteq X$  chiuso,  $f \in C^0(Y, \mathbb{R})$ , allora  $f$  si estende ad una continua su  $X$ .

*Dimostrazione.*

Basta il caso di  $f$  limitata:

la tesi è che l'operatore di restrizione (il quale è lineare e continuo)

$$R : C_b^0(X) \rightarrow C_b^0(Y)$$

è surgettivo. Basta applicare il lemma (3.28) come segue:

$$3B_{C_b(Y)} \subseteq R(B_{C_b(X)}) + 2B_{C_b(Y)}$$

e chiamiamo  $U = 3B_{C_b(Y)}$ ,  $T = (2/3) \cdot$ . Per il lemma di Urysohn, se  $F_0$  e  $F_1$  sono chiusi disgiunti di  $X$  esiste  $f$  tale che  $F_0 = \{f = 0\}$  e  $F_1 = \{f = 1\}$ .  $\square$

**Teorema 3.31** (Mappa aperta).

Siano  $X, Y$  Banach e  $T : X \rightarrow Y$  lineare continuo e tale che  $T(X)$  è di II-categoria in  $Y$  (per esempio  $T$  surgettivo). Allora  $T$  è una mappa aperta.

*Dimostrazione.*

Sia  $B$  la palla unitaria chiusa di  $X$ . Basta mostrare che  $T(B)$  è un intorno di 0 in  $Y$  (per omotetia e traslazione seguirà che  $T$  manda intorni di  $x$  in intorni di  $T(x)$ , cioè è aperta). Notiamo che

$$X = \bigcup_n nB \implies T(X) = \bigcup_n nT(B)$$

Per ipotesi  $T(X)$  è di II-categoria in  $Y$ , quindi per qualche  $n$  si ha che  $\overline{nT(B)}$  ha parte interna non vuota e quindi  $\overline{T(B)}$  stesso ha parte interna non vuota. Poiché<sup>3</sup>

$$\overline{T(B)} - \overline{T(B)} \subseteq \overline{T(B - B)} = \overline{T(2B)} = 2\overline{T(B)}$$

<sup>3</sup>ricorda che in generale se  $f$  è continua allora  $f(\overline{A}) \subseteq \overline{f(A)}$ .

In questo caso la mappa è  $(x, y) \mapsto x - y$  e usiamo il fatto che  $T$  è lineare e

$$\overline{T(B)} \times \overline{T(B)} = \overline{T(B)} \times \overline{T(B)}.$$

si ha che  $\overline{T(B)}$  è un intorno di  $0 \in Y$ .

Mostriamo ora che  $T(B)$  stesso è un intorno di  $0$ . Poiché la chiusura è l'intersezione degli aperti che contengono  $T(B)$  si ha in particolare che

$$\overline{T(B)} = T(B) + \frac{1}{2}\overline{T(B)}.$$

Se  $y_0 \in \overline{T(B)}$  allora esistono  $x_0 \in B$  e  $y_1 \in \frac{1}{2}\overline{T(B)}$  tali che  $y_0 = T(x_0) + \frac{1}{2}y_1$ .

Iterando troviamo  $y_2 \in \overline{T(B)}$  tale che  $y_1 = T(x_1) + \frac{1}{2}y_2$  per  $x_1 \in B$ . Questo definisce due successioni  $(x_n) \subseteq B$  e  $(y_n) \subseteq \overline{T(B)}$  tali che  $y_n = T(x_n) + \frac{1}{2}y_{n+1}$ , quindi

$$y_0 = T(x_0) + \frac{1}{2}T(x_1) + \cdots + 2^{-n}T(x_n) + 2^{-n-1}y_{n+1} = T\left(\sum_{i=0}^n 2^{-i}x_i\right) + 2^{-n-1}y_{n+1}.$$

Poiché  $X$  è completo la serie  $\sum_{i=0}^n 2^{-i}x_i$  converge ad un punto  $x^* \in 2B$  (perché assolutamente convergente e  $\sum_{n \geq 0} 2^{-n} = 2$ ).

Siccome  $T$  è continua,  $T(B)$  è limitato e quindi  $\overline{T(B)}$  è limitato, quindi

$$\|2^{-n-1}y_{n+1}\| \leq 2^{-n-1}\|T\| \rightarrow 0,$$

quindi (per continuità di  $T$ ) si ha  $y_0 = T(x^*)$ , cioè

$$\overline{T(B)} \subseteq 2T(B),$$

in particolare  $T(B)$  è un intorno di  $0$  per omotetia. □

*Osservazione 3.32* (Lineare continuo allora omeo se e solo se bigettivo).

Un operatore lineare continuo è un omeomorfismo se e solo se è bigettivo. Questo è immediato da mappa aperta (3.31).

*Osservazione 3.33.*

Se  $T : X \rightarrow Y$  lineare continuo allora induce

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{T} & Y \\ \pi \downarrow & \nearrow \tilde{T} & \\ X/\ker T & & \end{array}$$

con  $\tilde{T}$  lineare continua iniettiva. Se  $T$  è surgettiva allora per il teorema della mappa aperta (3.31)  $\tilde{T}$  è un omeomorfismo lineare.

*Osservazione 3.34.*

Se  $T : X \rightarrow Y$  è lineare e continua allora

$$\text{aperta} \iff \text{surgettiva} \iff \text{identificazione}.$$

**Teorema 3.35** (Grafico chiuso).

Siano  $X, Y$  Banach,  $T : X \rightarrow Y$  lineare. Allora  $T$  è continua se e solo se

$$\Gamma = \{(x, T(x)) \in X \times Y \mid x \in X\}$$

è chiuso.

*Dimostrazione.*

Data una qualsiasi mappa continua  $f : X \rightarrow Y$  con  $Y$  Hausdorff si ha che  $\Gamma$  è la preimmagine della diagonale di  $Y \times Y$  rispetto alla mappa  $id_Y \times f$ . Poiché  $Y$  è un Banach (e quindi metrico e quindi  $T_2$ ) effettivamente abbiamo la prima implicazione.

Supponiamo ora che  $\Gamma$  sia chiuso. Poiché  $X \times Y$  è prodotto di Banach esso stesso è Banach e quindi  $\Gamma$  è Banach perché chiuso di un Banach. Osserviamo ora che

$$T(x) = P_Y((x, T(x))) = P_Y((P_X|_{\Gamma})^{-1}(x)) \implies T = P_Y \circ (P_X|_{\Gamma})^{-1}.$$

Poiché  $P_X|_{\Gamma}$  è bigettiva, continua e lineare, per il teorema della mappa aperta (3.31) essa è un omeomorfismo, quindi  $T$  è continuo in quanto composizione di  $P_Y$  e  $P_X|_{\Gamma}^{-1}$  continue.  $\square$

### Esercizio 3.36.

Sia  $T : X \rightarrow Y$  lineare fra Banach. Controntare la continuità di  $T$  con le topologie forti e deboli di  $X$  e  $Y$

$$\begin{aligned} (X, w) &\rightarrow (Y, w) \\ (X, w) &\rightarrow (Y, s) \\ (X, s) &\rightarrow (Y, w) \\ (X, s) &\rightarrow (Y, s) \end{aligned}$$

*Dimostrazione.*

Hint: usare grafico chiuso (3.35) ricordando che sottospazi vettoriali di Banach sono chiusi forti se e solo se sono chiusi deboli e osservando chi è la topologia debole di  $X \times Y$  (topologia prodotto)

Tre di queste nozioni sono equivalenti e una no. Quella diversa è più forte? Più debole?  $\square$

### Definizione 3.37 (Forte iniettività).

Una mappa  $T : X \rightarrow Y$  lineare continua è **fortemente iniettiva** se esiste  $c > 0$  tale che

$$\forall x \in X \quad \|T(x)\| \geq c \|x\|.$$

### Proposizione 3.38.

Se  $X$  e  $Y$  sono Banach e  $T : X \rightarrow Y$  lineare continua,  $T$  è fortemente iniettiva se e solo se  $T$  è iniettiva e  $\text{Imm } T$  è chiuso.

*Dimostrazione.*

Diamo le implicazioni

$\implies$  Iniettiva ok. Sia  $T' : X \rightarrow \text{Imm } T \subseteq Y$  la stessa mappa di  $T$  ma con codominio ristretto. Notiamo che  $T'$  è invertibile perché iniettiva e surgettiva per costruzione e che ha inversa continua per la disuguaglianza in ipotesi, quindi  $\text{Imm}(T)$  è Banach perché  $X$  è Banach e quindi  $\text{Imm } T$  è chiuso in  $Y$ .

$\impliedby$  Se  $T$  è iniettiva con immagine chiusa allora  $T' : X \rightarrow \text{Imm } T$  è invertibile. Inoltre, poiché  $\text{Imm } T$  è Banach perché chiuso di  $Y$ , si ha che per mappa aperta (3.31) vale  $(T')^{-1}$  continua, cioè  $T$  fortemente iniettiva.  $\square$

**Proposizione 3.39** (Retrazioni e sezioni per lineari continue).

Sia  $T \in L(X, Y)$  con  $X, Y$  Banach. Allora  $T$  è una<sup>4</sup>

- *inversa destra*  $\iff$  *iniettiva* e  $\text{Imm } T$  è *complementato*<sup>5</sup>
- *inversa sinistra*  $\iff$  *surgettivo* e  $\ker T$  è *complementato*.

*Dimostrazione.*

Se  $T : X \rightarrow Y$  e  $S : Y \rightarrow X$  sono una coppia tale che  $S \circ T = id_X$  allora  $T \circ S = P$  è un proiettore lineare continuo, infatti

$$P^2 = (T \circ S) \circ (T \circ S) = T \circ id_X \circ S = T \circ S.$$

Quindi  $Y = \ker P \oplus \text{Imm } P$  e  $\ker P = \ker S$ ,  $\text{Imm } P = \text{Imm } T$ , ovvero

$$Y = \ker S \oplus \text{Imm } T$$

come volevamo.

Viceversa, se  $T$  è iniettivo e  $\text{Imm } T$  è complementata (rispettivamente  $S$  è surgettivo e  $\ker S$  complementato) allora considero un proiettore  $P_{\text{Imm } T}$  (ok per la decomposizione in somma diretta) e definisco  $S = (T')^{-1} \circ P_{\text{Imm } T}$  che è inversa sinistra di  $T$  (rispettivamente definisco un proiettore  $Q$  su  $\ker S$  con  $id_Y - Q$  proiettore sul supplementare  $V$  fissato di  $\ker S$ , a questo punto considero  $S|_V^{-1}$ , che diventa inversa destra).  $\square$

**Proposizione 3.40** (Norme confrontabili su Banach sono equivalenti).

Due norme su Banach confrontabili sullo stesso  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale sono equivalenti.

*Dimostrazione.*

Caso particolare di “ $T$  bigettiva continua” scegliendo  $T = id_X$ .  $\square$

**Esercizio 3.41.**

Su uno spazio normato  $X$  di dimensione infinita esistono sempre forme lineari non continue.

*Osservazione 3.42.*

Esistono  $L : X \rightarrow X$  lineari bigettive non continue

*Dimostrazione.*

Fisso  $f$  forma discontinua e fisso  $u \in X$ , definiamo

$$L(x) = x + f(x)u$$

e notiamo che

$$\begin{aligned} L^2(x) &= L(x + f(x)u) = L(x) + f(x)L(u) = \\ &= x + f(x)u + f(x)(u + f(u)u) = \\ &= x + (2f(x) + f(x)f(u))u. \end{aligned}$$

Se  $u$  è tale che  $f(u) = -2$  allora  $L^2 = id_X$ , cioè  $L$  involuzione. In particolare  $L$  è bigettiva ma continua se e solo se  $f$  lo è, e non lo è quindi  $L$  non continua su  $(X, \|\cdot\|_1)$  Banach.

Poniamo  $\|x\|_2 = \|L(x)\|_1$ . Notiamo che  $\|\cdot\|_2$  rende  $X$  Banach in quanto  $L : (X, \|\cdot\|_1) \rightarrow (X, \|\cdot\|_2)$  è una isometria. Notiamo dunque che  $\|\cdot\|_1$  e  $\|\cdot\|_2$  sono norme che rendono  $X$  Banach e che non sono equivalenti ( $L$  è discontinua per  $\|\cdot\|_1$  ma continua per  $\|\cdot\|_2$ ).  $\square$

<sup>4</sup>cioè esiste  $S : Y \rightarrow X$  tale che  $T$  è l'inversa destra / sinistra di  $S$ .

<sup>5</sup>cioè esiste  $V \subseteq Y$  tale che  $Y = \text{Imm } T \oplus V$ .

**Esercizio 3.43.**

Siano  $\|\cdot\|_1, \|\cdot\|_2$  norme sullo stesso  $X$  e sia  $\|\cdot\|_3 = \|\cdot\|_1 + \|\cdot\|_2$ . Allora

1. Una successione  $(x_n)$  converge a  $x \in X$  in  $\|\cdot\|_3$  se e solo se converge a  $x$  in  $\|\cdot\|_1$  e  $\|\cdot\|_2$ .
2.  $(x_n)$  è di Cauchy in  $X$  se e solo se è di Cauchy sia per  $\|\cdot\|_1$  che per  $\|\cdot\|_2$ .

**Esercizio 3.44.**

TROVA L'IMBROGLIO:

“**Proposizione.**” Tutte le norme di Banach sullo stesso  $X$  sono equivalenti.

“*Dimostrazione.*”

Siano  $\|\cdot\|_1$  e  $\|\cdot\|_2$  di Banach. Notiamo che  $\|\cdot\|_3$  è più fine delle altre due e che  $(x_n)$  è di Cauchy per  $\|\cdot\|_3$  se e solo se lo è per le altre due, quindi per il punto 1. della proposizione precedente la successione converge in  $\|\cdot\|_3$ . Segue dunque che, poiché  $\|\cdot\|_3$  è più fine allora è confrontabile con le altre due, quindi le tre norme sono equivalenti.  $\square$

### 3.4 SVT I-numerabili e paranorme

**Definizione 3.45** (Paranorma).

Una **paranorma** sull'  $\mathbb{K}$ -spazio vettoriale  $X$  è una funzione  $q : X \rightarrow [0, \infty)$  tale che

1.  $q(x + y) \leq q(x) + q(y)$
2.  $q(\lambda x) \leq q(x)$  per ogni  $x \in X$  e  $\lambda \in \mathbb{K}$  tale che  $|\lambda| \leq 1$
3. Se  $\lambda_k \rightarrow 0$  in  $\mathbb{K}$  allora  $q(\lambda_k x) \rightarrow 0$

Inoltre  $q$  è **definita** se vale

$$q(x) = 0 \iff x = 0.$$

*Osservazione 3.46.*

Dalla proprietà 2. segue che  $q(\lambda x) = q(x)$  se  $|\lambda| = 1$  e che  $q(\lambda x) \leq q(\mu x)$  se  $|\lambda| \leq |\mu|$ . In particolare  $q(x) = q(-x)$ .

Quindi  $d(x, y) = q(x - y)$  è una (semi)distanza su  $X$  (distanza se  $q$  definita).

**Esercizio 3.47.**

Dimostrare che  $(X, d)$  è uno SVT per  $d$  indotta da paranorma  $q$ .

**Esercizio 3.48.**

Sia  $X$  un  $K$ -SVT I-numerabile. Allora la sua topologia proviene da una paranorma (la quale è definita sse  $X$  è  $T_0$ ).

*Dimostrazione.*

TRACCIA

- Sia  $\{U_n\}_{n \geq 0}$  base numerabile di intorni bilanciati di 0 tali che  $U_{n+1} + U_{n+1} \subseteq U_n$ .
- Estendiamo la successione per  $n < 0$  ponendo  $U_k = U_{k+1} + U_{k+1}$  per ogni  $k < 0$ .  
Nota che  $U_{k+1} + U_{k+1} \subseteq U_k$  per ogni  $k \in \mathbb{Z}$  e gli  $\{U_k\}_{k \in \mathbb{Z}}$  sono intorni bilanciati.

- Poniamo

$$q(x) = \inf \left\{ \sum_{i=1}^r 2^{-k_i} \mid r \in \mathbb{N}, (k_1, \dots, k_r) \in \mathbb{Z}^r \text{ t.c. } x \in U_{k_1} + U_{k_2} + \dots + U_{k_r} \right\}$$

Mostra che  $q$  è una paranorma su  $X$ .

- Nota che  $\{q < 2^{-n-1}\} \subseteq U_n \subseteq \{q \leq 2^{-n}\}$  e quindi  $q$  induce la topologia di  $X$ .

□

## Capitolo 4

# Teorema di Hahn-Banach

Il teorema di Hahn-Banach ci permetterà di costruire funzionali lineari continui.

**Funzionali sono i surrogati delle coordinate, che non ci sono in generale, e anche quando ci sono possono essere più complicate di quanto non valga la pena.**

### 4.1 Teorema di Hahn-Banach reale

**Definizione 4.1** (Funzione sublineare).

Una funzione  $p : X \rightarrow \mathbb{R}$  è

- **positivamente omogenea** se per  $t \in \mathbb{R}, t \geq 0$  abbiamo  $p(tu) = tp(u)$ ,
- **subadditiva** se per ogni  $u, v \in X$  vale  $p(u + v) \leq p(u) + p(v)$ ,
- **sublineare** se è subadditiva e positivamente omogenea.

**Pillola filosofica: Teorema di esistenza senza buon criterio per scegliere un candidato spesso chiama l'uso di scelta.**

**Teorema 4.2** (Hahn-Banach).

*Siano  $X$  uno spazio vettoriale reale,  $M \subseteq X$  sottospazio,  $p : X \rightarrow \mathbb{R}$  sublineare,  $f : M \rightarrow \mathbb{R}$  lineare tale che  $f \leq p$  su  $M$ .*

*Allora  $f$  si estende a  $F : X \rightarrow \mathbb{R}$  lineare tale che  $F \leq p$ .*

*Dimostrazione.*

Vogliamo applicare il lemma di Zorn. Sia

$$\mathcal{M} = \{g \in N' \mid g \leq p, M \subseteq N \subseteq X\}$$

Notiamo che  $\mathcal{M}$  è ordinato secondo l'inclusione dei sottografici, cioè

$$g \preceq h \iff \Gamma g \subseteq \Gamma h \iff \begin{cases} \text{dom } g \subseteq \text{dom } h \\ g(x) \leq h(x) \quad \forall x \in \text{dom } g \end{cases}$$

Condizione delle catene vale:

se  $\{g_\alpha\}_{\alpha \in \Lambda}$  catena in  $\mathcal{M}$

allora  $\bigcup_{\alpha} \Gamma g_{\alpha}$  è ancora il grafico di una funzione lineare minore di  $p$ .

Dunque per il lemma di Zorn esiste un elemento massimale in  $\mathcal{M}$ . Per concludere basta mostrare che un massimale di  $\mathcal{M}$  è definito su tutto  $X$ , cioè vogliamo mostrare che se  $g \in \mathcal{M}$  è tale che  $\text{dom } g \neq X$  allora esiste  $g' \in \mathcal{M}$  che estende  $g$ .

Sia dunque per assurdo  $x \in X \setminus N$  dove  $N = \text{dom } g$ . Vogliamo estendere  $g$  a  $h : N \oplus \langle x \rangle \rightarrow \mathbb{R}$  con  $h \leq p$ . In quanto estensione

$$h(u + tx) = h(u) + th(x) = g(u) + th(x),$$

dove  $u$  generico elemento di  $N$ . Sia  $\alpha = h(x)$  e cerchiamo un opportuno  $\alpha$  in modo tale che  $h \leq p$ .

Chiediamo che  $\forall u \in N, \forall t \in \mathbb{R}$

$$g(u + tx) \leq p(u + tx),$$

o equivalentemente per ogni  $t > 0$  chiediamo

$$\begin{cases} h(u + tx) \leq p(u + tx) \\ h(v - tx) \leq p(v - tx) \end{cases}$$

equivalentemente

$$\begin{cases} g(u/t) + \alpha \leq p(u/t + x) \\ g(v/t) - \alpha \leq p(v/t - x) \end{cases}$$

dunque vogliamo

$$-p(v/t - x) + g(v/t) \leq \alpha \leq p(u/t + x) - g(u/t)$$

cioè

$$\sup_{v \in N} -p(v - x) + g(v) = m_* \leq \alpha \leq m^* = \inf_{u \in N} p(u + x) - g(u),$$

dunque un tale  $\alpha$  esiste solo se  $m_* \leq m^*$ . Questo è vero perché

$$g(u) + g(v) = g(u + v) \leq p(u + v) = p(u + x + v - x) \leq p(u + x) + p(v - x).$$

□

*Osservazione 4.3.*

Non serve questo teorema per spazi di dimensione finita o spazi di Hilbert, in quanto in quei casi abbiamo estensioni canoniche (se  $\text{dom } f = N$ , considero la proiezione ortogonale su  $N$  e poi applico  $f$ ).

**Corollario 4.4** (Hahn-Banach per spazi normati).

Se  $(X, \|\cdot\|)$  è spazio normato reale e  $Y$  è sottospazio lineare allora ogni funzione continua su  $Y$  si estende ad una su  $X$  con la stessa norma.

*Dimostrazione.*

Se  $f \in Y^*$ , per la definizione di norma duale si ha

$$f(x) \leq \|f\|_{Y^*} \|x\| \doteq p(x),$$

quindi  $f$  si estende a  $F : X \rightarrow \mathbb{R}$  lineare con  $F(x) \leq \|f\|_{Y^*} \|x\|$ , cioè  $\|F\|_{X^*} \leq \|f\|_{Y^*}$ . Poiché  $F$  estende  $f$  in realtà abbiamo uguaglianza tra le norme<sup>1</sup>. □

<sup>1</sup>consideriamo la stessa successione in  $Y$  che realizza la definizione di  $\|f\|_{Y^*}$



*Osservazione 4.5.*

Se  $X$  è di Hilbert, una estensione di  $f \in Y^*$  è data dal proiettore ortogonale su<sup>2</sup>  $Y$   $P : X \rightarrow \bar{Y}$ . A questo punto definendo  $F = f \circ P$ .

**Corollario 4.6** (ricostruire norma tramite funzionali).

Se  $(X, \|\cdot\|)$  è spazio normato reale e  $Y$  è sottospazio lineare e  $x \in X$ , allora la norma di  $x$  si può ricostruire dalla norma duale di  $X^*$ , in particolare<sup>3</sup>

$$\|x\| = \max_{\|f\|_{X^*} \leq 1} \langle f, x \rangle$$

*Dimostrazione.*

Se  $f \in X^*$  e  $\|f\| \leq 1$  allora

$$\langle f, x \rangle \leq \|f\| \|x\| \leq \|x\| \implies \|x\| \leq \max_{\|f\| \leq 1} \langle f, x \rangle.$$

D'altra parte, per il corollario precedente (4.4) nel caso particolare di  $Y = x\mathbb{R}$ , il funzionale lineare continuo

$$\phi : \begin{array}{ccc} x\mathbb{R} & \longrightarrow & \mathbb{R} \\ \lambda x & \longmapsto & \lambda \|x\| \end{array}$$

si estende a tutto  $X$  con la stessa norma. Se  $x = 0$  allora  $\|\phi\| = 0$  per linearità, altrimenti  $\|\phi\| = 1$  su  $x\mathbb{R}$ . In ogni caso  $\|\phi\| \leq 1$ , quindi per ogni  $x \in X$  esiste  $f \in X^*$  tale che  $\|f\| \leq 1$  e  $\langle f, x \rangle = \|x\|$ .  $\square$

**Definizione 4.7** (Operatore aggiunto).

Per  $T : X \rightarrow Y$  lineare continua tra spazi normati, si definisce l'**operatore aggiunto** o **trasposto** di  $T$  come

$$T^* : \begin{array}{ccc} Y^* & \longrightarrow & X^* \\ f & \longmapsto & f \circ T \end{array}$$

**Proposizione 4.8** (Norma dell'aggiunto).

La norma di  $T^*$  coincide con la norma di  $T$ , in particolare  $T^*$  è continuo.

*Dimostrazione.*

Segue dai corollari di Hahn-Banach sopra, infatti

$$\begin{aligned} \|T^*\|_{L(Y^*, X^*)} &= \sup_{f \in Y^*, \|f\| \leq 1} \|T^* f\|_{X^*} = \sup_{f \in Y^*, \|f\| \leq 1} \sup_{\|x\| \leq 1, x \in X} \langle T^* f, x \rangle = \\ &= \sup_{\|f\| \leq 1, \|x\| \leq 1} |f, Tx| = \sup_{\|x\| \leq 1} \sup_{\|f\| \leq 1} |\langle f, Tx \rangle| \stackrel{(4.6)}{=} \\ &= \sup_{\|x\| \leq 1} \|Tx\| = \|T\|_{L(X, Y)}. \end{aligned}$$

$\square$

#### 4.1.1 Inclusione isometrica nel biduale

**Proposizione 4.9** (Inclusione isometrica nel biduale).

Sia  $(X, \|\cdot\|)$  uno spazio normato reale e consideriamo la mappa

$$i_X : \begin{array}{ccc} X & \longrightarrow & X^{**} \\ x & \longmapsto & val_x \end{array}$$

Essa è una inclusione isometrica.

<sup>2</sup>stiamo supponendo  $Y$  chiuso a meno di passare alla chiusura

<sup>3</sup>dove  $\langle f, x \rangle = f(x)$  quando  $f$  è forma lineare, come in questo caso.

*Dimostrazione.*

È immediato vedere che  $i_X$  è lineare e continua<sup>4</sup> Però sappiamo che per ogni  $x \in X$  esiste  $f \in X$  tale che  $\|f\| \leq 1$  e  $\|x\| = \langle f, x \rangle$ , cioè  $\|val_x\| = \|x\|$ , ovvero  $i_X : X \rightarrow X^{**}$  è una inclusione isometrica.  $\square$

**Definizione 4.10** (Spazio riflessivo).

Uno spazio normato  $(X, \|\cdot\|)$  è **riflessivo** se  $i_X : X \rightarrow X^{**}$  è surgettiva, ovvero se  $i_X$  è una isometria.

*Osservazione 4.11.*

Esistono spazi di Banach non riflessivi ma isometrici al loro biduale. Nella definizione chiediamo che la mappa canonica  $i_X$  sia una isometria.

**Esempio 4.12.**

Sia  $c_0 = \{x \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}} \mid x(n) = o_n(1)\}$ . Questo è un sottospazio chiuso di

$$\ell_\infty = \{x \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}} \mid \|x\|_\infty < \infty\}$$

Se  $\widehat{\mathbb{N}}$  è la compattificazione di  $\mathbb{N}$  ad un punto ( $\widehat{\mathbb{N}} = \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ ) allora  $c_0$  sono le funzioni  $\widehat{\mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{R}$  continue che valgono 0 in  $\infty$  ristrette a  $\mathbb{N}$ .

Risulta che l'inclusione  $c_0 \hookrightarrow \ell_\infty$  è l'inclusione nel biduale, infatti  $c_0^*$  si può identificare con

$$\ell_1 = \left\{f \in \mathbb{R}^{\mathbb{N}} \mid \|f\|_1 = \sum |f_n| < \infty\right\}$$

identificando  $f \in \ell_1$  con  $\tilde{f}(x) = \sum f_n x_n$  (che converge perché assolutamente convergente). Risulta che questa identificazione è una isometria.

Con un processo analogo identifichiamo  $\ell_1^*$  con  $\ell_\infty$ .

$$\begin{array}{ccc} c_0 & \xrightarrow{\subseteq} & \ell_\infty \\ & \searrow i_{c_0} & \swarrow \cong \\ & c_0^{**} & \end{array}$$

*Osservazione 4.13.*

Se  $X$  è Hilbert allora  $X \hookrightarrow X^{**}$  è surgettiva tramite l'isomorfismo di Riesz

$$x \mapsto \langle \cdot, x \rangle \mapsto \langle \cdot, \langle \cdot, x \rangle \rangle = val_x$$

*Osservazione 4.14.*

Se  $X$  normato,  $i_X : X \rightarrow X^{**}$  ci permette di costruire un completamento considerando  $i_X(X)$  in  $X^{**}$  in quanto il biduale è completo.

## 4.1.2 Sulle ipotesi del teorema di Hahn-Banach

Il funzionale  $p$  nelle ipotesi è positivamente omogeneo e subadditivo (cioè sublineare).

*Osservazione 4.15.*

Una funzione  $f$  è subadditiva se, detto  $\Gamma$  il grafico di  $f$ ,  $\Gamma + (x, f(x))$  sta sempre sopra  $\Gamma$ .

**Esercizio 4.16.**

Mostra le seguenti implicazioni

---

<sup>4</sup> $\langle val_x, f + \lambda g \rangle = f(x) + \lambda g(x) = \langle val_x, f \rangle + \lambda \langle val_x, g \rangle$  e  $\|val_x\| \leq \|x\|$  in quanto  $|\langle val_x, f \rangle| = |\langle f, x \rangle| \leq \|f\| \|x\|$ .

- Positivamente omogeneo e subadditivo implica convesso
- Positivamente omogeneo e convesso implica subadditivo (e quindi sublineare)
- Subadditivo, convesso e  $p(0) \leq 0$  implica positivamente omogeneo

**Esercizio 4.17.**

Trovare  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  che sia subadditiva, convessa ma non positivamente omogenea.

**Esercizio 4.18.**

Nel teorema di Hahn-Banach si può prendere più in generale  $p$  convesso?

Sì, ma si riconduce al caso standard trovando un nuovo funzionale  $p_0$  che sia sublineare e tale che  $f \leq p_0 \leq p$ .

## 4.2 Estensioni e altre versioni di Hahn-Banach

### 4.2.1 Teorema di Hahn-Banach complesso

**Teorema 4.19** (Hahn-Banach complesso).

Sia  $X$  un  $\mathbb{C}$ -spazio vettoriale normato,  $Y \subseteq X$  un suo sottospazio vettoriale e  $f \in Y^*$ , allora  $f$  si estende ad un funzionale lineare su  $X$  con uguale norma.

*Dimostrazione.*

Sia  $(X_0, \|\cdot\|)$  lo spazio normato reale ottenuto da  $X$  per restrizione degli scalari e sia  $f_0 = \Re f$ . Notiamo che  $f_0$  è un funzionale lineare continuo reale su  $Y$ , che quindi possiamo estendere a  $\tilde{f}_0 \in X^*$  mantenendo la norma. Definiamo

$$\tilde{f}(x) = \tilde{f}_0(x) - i\tilde{f}_0(ix).$$

Notiamo che  $\tilde{f}|_Y = f$ , infatti

$$f(y) = \Re(f(y)) + i\Im(f(y)) = \Re(f(y)) - i\Im(if(iy)) = \Re(f(y)) - i\Re(f(iy)).$$

Si ha anche che  $\tilde{f}$  è  $\mathbb{C}$ -lineare e che  $\|\tilde{f}\|_{X^*} = \|f\|_{Y^*}$

(COMPLETA PER ESERCIZIO)

□

### 4.2.2 Teoremi di separazione dei convessi

**Proposizione 4.20** (Funzionali di Minkowski sono sublineari).

Se  $C$  è convesso e  $0 \in C$  allora  $p_C$  è sublineare.

*Dimostrazione.*

Dimostriamo le due proprietà:

pos.omo. Per ogni  $\lambda > 0$ ,  $x \in X$  si ha che

$$p_C(\lambda x) = \inf \{t > 0 \mid \lambda x \in tC\} = \inf \{\lambda s > 0 \mid \lambda x \in \lambda sC\} = \lambda p_C(x)$$

subadd. Per ogni  $x, y \in X$  siano  $a$  e  $b$  tali che

$$a > p_C(x), \quad b > p_C(y).$$

Se uno tra  $p_C(x)$  e  $p_C(y)$  è infinito allora la tesi vale trivialmente. Supponiamo dunque che questo non sia il caso. Allora  $x \in aC$  e  $y \in bC$ , cioè  $x/a, y/b \in C$ . Notiamo che

$$\frac{x+y}{a+b} = \frac{a}{a+b} \frac{x}{a} + \frac{b}{a+b} \frac{y}{b}$$

dunque  $\frac{x+y}{a+b} \in C$  per convessità, cioè  $x+y \in (a+b)C$  e quindi  $p_C(x+y) \leq a+b$ . Passando all'estremo inferiore per  $a > p_C(x)$  e  $b > p_C(y)$  troviamo

$$p_C(x+y) \leq p_C(x) + p_C(y)$$

□

*Osservazione 4.21.*

Se  $C$  è un disco, cioè è assorbente, bilanciato e convesso allora  $p_C$  è una seminorma.

**Esercizio 4.22.**

Se  $X$  SVT,  $F : X \rightarrow \mathbb{K}$  lineare non continua allora per ogni aperto  $A$  non vuoti si deve avere  $F(A) = \mathbb{K}$ .

**Lemma 4.23.**

*Ogni funzionale lineare non nullo su uno SVT è una mappa aperta*

*Dimostrazione.*

Sia  $F \neq 0$  lineare con  $F : X \rightarrow \mathbb{K}$ . Vogliamo mostrare che  $F$  manda intorno di  $x \in X$  in intorno di  $F(x) \in \mathbb{K}$ . Poiché  $X$  è SVT, basta mostrare che  $F(U)$  è intorno di  $0 \in \mathbb{K}$  per ogni  $U$  intorno di  $0 \in \mathbb{K}$ . In realtà basta prendere una base di intorno di  $0$ , quindi consideriamo gli  $U$  bilanciati. Notiamo che  $F(U)$  è un insieme bilanciato di  $\mathbb{K}$ , infatti se  $\lambda \in \mathbb{K}$  e  $|\lambda| \leq 1$  allora  $\lambda F(U) = F(\lambda U) \subseteq F(U)$ , quindi abbiamo le seguenti possibilità:

- $F(U) = \{0\}$ , ma allora  $F = 0$  assurdo
- $F(U)$  è un disco, dunque è intorno di  $0$  ok.
- $F(U) = \mathbb{K}$  ok.

□

**Corollario 4.24** (Discontinuità per funzionali lineari).

$F : X \rightarrow \mathbb{K}$  lineare è discontinua se e solo se è surgettiva su ogni aperto non vuoto.

*Dimostrazione.*

Se  $F$  non è surgettiva su un aperto non vuoto, a meno di traslazione  $F$  non è surgettiva su un intorno di  $0$ , quindi non è surgettiva su un qualche aperto bilanciato. Quindi esiste un elemento che non è nella immagine, ma allora  $F$  non assume valori di modulo superiore a questo valore non raggiunto. □

**Teorema 4.25** (Separazione di convessi).

*Valgono i seguenti teoremi:*

- Siano  $X$  un  $\mathbb{R}$ -SVT,  $A$  un suo aperto convesso non vuoto e  $B$  un convesso non vuoto disgiunto da  $A$ . Allora esistono  $F \in X^*$  e  $\gamma \in \mathbb{R}$  tali che per ogni  $a \in A$ ,  $b \in B$  si ha

$$\langle F, a \rangle < \gamma \leq \langle F, b \rangle,$$

cioè  $A \subseteq \{F < \gamma\}$  e  $B \subseteq \{F \geq \gamma\}$ .

- Sia  $X$  un  $\mathbb{R}$ -SVTLC<sup>5</sup>,  $K$  convesso compatto e  $C$  convesso chiuso disgiunti. Allora esistono  $F \in X^*$ ,  $\gamma_1, \gamma_2 \in \mathbb{R}$ ,  $\gamma_1 < \gamma_2$  tali che per ogni  $x \in K$  e per ogni  $y \in C$  vale

$$\langle F, x \rangle \leq \gamma_1 < \gamma_2 \leq \langle F, y \rangle$$

ovvero  $K \subseteq \{F \leq \gamma_1\}$  e  $C \subseteq \{F \geq \gamma_2\}$ .

<sup>5</sup>La locale convessità serve, infatti esistono SVT metrizzabili che non hanno funzionali lineari continui e in tal caso la tesi non vale neanche per  $K = \{x\}$  e  $C = \{y\}$ .

*Dimostrazione.*

Diamo le due dimostrazioni

- Sia  $x_0 \in B - A = \{b - a \mid a \in A, b \in B\}$ . Poiché  $A \cap B = \emptyset$ ,  $x_0 \neq 0$ . Sia

$$C = A - B + x_0 = \bigcup_{b \in B} (A - b + x_0).$$

Dalla definizione è evidente che  $C$  è un aperto (unione di traslati di  $A$  che è aperto) e contiene 0.  $C$  è convesso perché la somma algebrica di due convessi è un convesso (quindi  $A - B$  convesso e traslare un convesso lo lascia convesso). Essendo aperto in particolare è assorbente per (2.11).

Quindi il funzionale di Minkowski associato  $p_C$  è un funzionale sublineare  $X \rightarrow \mathbb{R}$  (non raggiunge  $+\infty$  perché assorbente). Sia  $f_0 : \mathbb{R}x_0 \rightarrow \mathbb{R}$  il funzionale lineare definito da  $\langle f_0, x_0 \rangle = 1$ . Poiché  $0 \notin A - B$ ,  $x_0 \notin C$  e quindi<sup>6</sup>  $p_C(x_0) \geq 1$ . Applicando il teorema di Hahn-Banach (4.2)  $f_0$  si estende a  $F : X \rightarrow \mathbb{R}$  con  $F \leq p_C$  in  $X$ . Per ogni  $a \in A$ ,  $b \in B$ , poiché  $a - b + x_0 \in C$ , si ha

$$F(a) - F(b) + 1 = F(a - b + x_0) \leq p_C(a - b + x_0) \leq 1$$

cioè  $F(a) \leq F(b)$ . Ponendo  $\gamma = \sup_A F$  abbiamo le disuguaglianze volute se mostriamo che  $F(a) < \gamma$  per ogni  $a \in A$ . Per il lemma (4.23) si ha che  $F$  è una mappa aperta, quindi  $F(A)$  è un aperto di  $\mathbb{R}$  tale che  $\sup F(A) \leq \gamma$ , ma allora il valore  $\gamma$  non è raggiunto.

Concludiamo notando che  $F$  è continuo<sup>7</sup> perché è limitato superiormente sull'aperto  $A$ .

- Sia  $V$  intorno convesso di 0 tale che  $(K + V) \cap C = \emptyset$ , basta usare (2.16) e poi notare che in questo caso abbiamo una base di intorni convessi. Evidentemente  $K + V$  è aperto e convesso<sup>8</sup>. Per il primo punto esiste  $F \in X^*$  e  $\gamma \in \mathbb{R}$  tale che per ogni  $x \in K + V$  e  $y \in C$

$$\langle F, x \rangle < \gamma \leq \langle F, y \rangle.$$

Sia  $\gamma_1 = \max_{x \in K} \langle F, x \rangle$ , allora  $\gamma_1 < \gamma$  e quindi se  $x \in K$

$$\langle F, x \rangle \leq \gamma_1 < \gamma \leq \langle F, y \rangle$$

che è la tesi a meno di definire  $\gamma_2 = \gamma$ .

□

## 4.3 Parentesi esercizi

**Definizione 4.26** (Misura non atomica).

Uno spazio di misura  $(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è **non-atomico** se per ogni  $A \in \mathcal{Q}$  di misura positiva contiene  $B \in \mathcal{Q}$  di misura positiva strettamente minore.

**Esercizio 4.27** (Sierpinski).

Se  $(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è non-atomico allora è divisibile, cioè per ogni  $A \in \mathcal{Q}$  e per ogni  $\lambda \in [0, \mu(A)]$  esiste  $B \subseteq A$ ,  $B \in \mathcal{Q}$ , tale che  $\mu(B) = \lambda$ .

<sup>6</sup>ricorda che  $\{p_C < 1\} \subseteq C$

<sup>7</sup>volendo anche perché limitato su intorno di 0 o anche perché non è surgettiva sull'aperto  $A$ . Vedi esercizio sopra per l'ultima.

<sup>8</sup>somma di convessi è convessa

Inoltre, vedendo la misura come funzione  $\mu : \mathcal{Q} \rightarrow [0, \mu(X)]$ , esiste una inversa destra monotona crescente per inclusione  $E : [0, \mu(X)] \rightarrow \mathcal{Q}$ , cioè si ha  $\mu \circ E = id$  e per ogni  $t \in [0, \mu(X)]$  abbiamo  $\mu(E_t) = t$  e  $E_t \subseteq E_{t'}$  per ogni  $t \leq t'$ .

*Dimostrazione.*

Vogliamo applicare Zorn all'insieme delle inverse destre monotone parziali, cioè

$$\Gamma = \{E : S \rightarrow \mathcal{Q} \mid S \subseteq [0, \mu(X)], E \text{ monot. cresc. per } \subseteq, \mu(E(t)) = t \forall t \in S\}$$

Chiaramente la condizione sulle catene funziona quindi  $\Gamma$  ha un elemento massimale. Mostriamo poi che il dominio del massimale è chiuso e che è denso, e quindi deve essere tutto. (CONCLUDERE PER ESERCIZIO)  $\square$

**Esercizio 4.28.**

Sia  $(X, \mathcal{Q}, \mu)$  uno spazio di misura e sia  $0 < p \leq 1$ . Definiamo

$$\mathcal{L}^p(X) = \left\{ f : X \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ misurabile, } \int_X |f|^p d\mu < \infty \right\}$$

e sia  $q : \mathcal{L}^p \rightarrow [0, \infty)$  con  $q(f) = \int_X |f|^p d\mu = \|f\|_p^p$ .

Notiamo che  $q(f+g) \leq q(f) + q(g)$ , che  $q(\lambda f) = |\lambda| q(f)$  e che  $q(f) = 0$  se e solo se  $f = 0$  q.o.. Dunque  $q$  definisce una semidistanza  $d_q(f, g) = q(f - g)$ , che induce una distanza sul quoziente

$$L^p(X) = \mathcal{L}^p(X) / \overline{\{0\}}$$

Questa distanza rende  $L^p(X)$  uno SVT metrico completo omeomorfo a  $L^1(X)$ .

Mostrare che se  $(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è non-atomico e  $p < 1$  allora  $L^p(X)$  non ha funzionali lineari continui diversi da 0 e non ha aperti convessi diversi da  $L^p(X)$ .

**Esercizio 4.29.**

Sia  $X = \mathbb{N}$  con la misura di cardinalità. In questo caso  $L^p(\mathbb{N}) = \ell_p$  con la definizione di prima. Questo è uno SVT metrico completo ma la misura è puramente atomica (misura ricostruibile dai singoletti). Mostra che  $(\ell_p)^* = (\ell_1)^*$ .

*Dimostrazione.*

Nota che se  $0 < p \leq q \leq \infty$  allora  $\ell_p \subseteq \ell_q$  e l'inclusione è una mappa continua, quindi una mappa lineare su  $\ell_q$  restituisce una mappa lineare su  $\ell_p$ , quindi abbiamo  $(\ell_p)^* \supseteq (\ell_1)^*$ , va mostrato che non ce ne sono altri. (CONCLUDERE PER ESERCIZIO)  $\square$

## Capitolo 5

# Costruzioni su spazi normati

*Osservazione 5.1.*

Se  $Y \subseteq X$  è un sottospazio vettoriale e  $(X, \|\cdot\|)$  è normato allora  $Y$  è (semi)normato con la norma indotta. La topologia indotta è quella di sottospazio

**Definizione 5.2** (Prodotto di spazi (semi)normati).

Se  $(X, \|\cdot\|_X)$  e  $(Y, \|\cdot\|_Y)$  sono spazi (semi)normati, la (semi)norma prodotto è data da

$$\|(x, y)\|_{X \times Y} = \max \{\|x\|_X, \|y\|_Y\}.$$

Questa rende  $X \times Y$  uno spazio (semi)normato e

$$B_{X \times Y}((0, 0), 1) = B_X(0, 1) \times B_Y(0, 1),$$

cioè la topologia indotta è la topologia prodotto.

**Definizione 5.3** (Somma diretta topologica).

Due sottospazi di  $(X, \|\cdot\|)$   $Y$  e  $Z$  sono in **somma diretta algebrica** se  $+|_{Y \times Z} : Y \times Z \rightarrow X$  è bigettiva. Se  $+|_{Y \times Z}$  è anche un omeomorfismo diciamo che  $X$  è la **somma diretta topologica** di  $Y$  e  $Z$ .

*Osservazione 5.4.*

$X$  è la somma diretta topologica di  $Y$  e  $Z$  se  $X$  è isomorfo come spazio normato a  $(Y \times Z, \|\cdot\|_{Y \times Z})$ .

*Osservazione 5.5.*

La mappa  $+|_{Y \times Z}$  è sempre continua, ma in generale non è un omeomorfismo.

**Definizione 5.6** (Proiettore).

Un endomorfismo lineare  $P : X \rightarrow X$  si dice **proiettore** se è idempotente, cioè  $P^2 = P$ .

*Osservazione 5.7.*

Un proiettore definisce una decomposizione in somma diretta algebrica  $X = \ker P \oplus \text{Im } P$ . Viceversa, ad ogni decomposizione in somma diretta algebrica possiamo associare un proiettore

*Osservazione 5.8.*

I proiettori  $P_Y : X \rightarrow Y$  e  $P_Z = id - P_Y : X \rightarrow Z$  sono continui se e solo se la somma è topologica, infatti

$$(+|_{Y \times Z})^{-1} = P_Y \times P_Z.$$

**Definizione 5.9** (Spazio (semi)normato quoziente).

Se  $(X, \|\cdot\|)$  è (semi)normato e  $Y$  è un suo sottospazio allora come spazio vettoriale

$$X/Y = \{x + Y \mid x \in X\}.$$

Su essa definiamo la seguente norma: se  $\xi \in X/Y$  allora<sup>1</sup>

$$\|\xi\|_{X/Y} = \inf_{x \in \xi} \|x\|.$$

**Esercizio 5.10.**

$\|\cdot\|_{X/Y}$  è una seminorma su  $X/Y$  e rende la proiezione  $\pi : X \rightarrow X/Y$  una applicazione aperta e continua. Più precisamente

$$\pi(B_X(0, 1)) = B_{X/Y}(0, 1)$$

*Dimostrazione.*

Continua perché  $\|\pi(x)\|_{X/Y} \leq \|x\|$  per definizione di estremo inferiore, quindi  $\pi$  ha norma come operatore  $\leq 1$ , e quindi è continua.  $\square$

*Osservazione 5.11.*

Notiamo che  $X/Y$  ha effettivamente la topologia quoziente indotta da  $\pi$

**Esercizio 5.12.**

La (semi)norma quoziente è una norma se e solo se  $Y$  è chiuso (a prescindere dal fatto che  $\|\cdot\|_X$  sia una norma o seminorma).

*Osservazione 5.13.*

Se  $Y$  e  $Z$  sono seminormati allora  $Y \cong \frac{Y \times Z}{Z}$  come spazi seminormati.

*Osservazione 5.14.*

Se  $Y \subseteq X$  ed esiste<sup>2</sup>  $Z$  tale che  $X = Y \oplus Z$  allora  $Z \cong X/Y$ .

*Osservazione 5.15.*

In generale  $X$  non è isomorfo a  $Y \times X/Y$ .

*Osservazione 5.16.*

Per quanto riguarda la completezza in queste costruzioni:

- $Y$  sottospazio di  $X$  con  $X$  di Banach è un Banach se e solo se è chiuso
- $(Y \times Z, \|\cdot\|_{Y \times Z})$  è Banach se e solo se lo sono sia  $Y$  che  $Z$
- Se  $(X, \|\cdot\|)$  è normato e  $Y \subseteq X$  è un sottospazio chiuso allora  $(X, \|\cdot\|)$  è completo se e solo se sia  $Y$  che  $X/Y$  sono completi.

Notiamo che l'ultima proprietà implica la seconda, infatti  $Y \cong \frac{Y \times Z}{Z}$

<sup>1</sup>pensando a  $\xi$  come un traslato di  $Y$ , la norma che stiamo definendo è la distanza di questo spazio affine dall'origine.

<sup>2</sup>ci sono casi in cui non esiste, come  $c_0 \subseteq \ell_\infty$



## 5.1 Costruzione di duali

**Proposizione 5.17** (Duale del prodotto).

Dati  $X$  e  $Y$  spazi di Banach, il duale di  $X \times Y$  è isometricamente isomorfo a

$$(X^* \times Y^*, \|\cdot\|)$$

dove  $\|(\xi, \eta)\| = \|\xi\|_{X^*} + \|\eta\|_{Y^*}$  (che è topologicamente equivalente a  $\|\cdot\|_{X^* \times Y^*}$ ).

$$(X^* \times Y^*, \|P_{X^*}(\cdot)\|_{X^*} + \|P_{Y^*}(\cdot)\|_{Y^*}) \cong ((X \times Y)^*, \|\cdot\|_{(X \times Y)^*}).$$

**Proposizione 5.18** (Duale di sottospazi e di un quoziente).

Dato  $Y$  sottospazio chiuso di  $X$  Banach abbiamo le seguenti isometrie lineari:

1.  $Y^* \cong X^*/Y^\perp$
2.  $(X/Y)^* \cong Y^\perp \subseteq X^*$

dove  $Y^\perp = \text{Ann}(Y) = \{f \in X^* \mid f|_Y = 0\} = \{f \in X^* \mid Y \subseteq \ker f\}$ .

*Dimostrazione.*

Data l'inclusione  $j_Y : Y \rightarrow X$  otteniamo  $j_Y^* : X^* \rightarrow Y^*$ . Il nucleo di  $j_Y^*$  sono i funzionali in  $X^*$  che si restringono al funzionale nullo su  $Y^*$ , cioè gli  $f \in X^*$  tali che

$$j_Y^*(f) = f \circ j_Y = f|_Y = 0$$

e quindi  $\ker j_Y^* = \text{Ann}(Y)$ . Per il teorema di Hahn-Banach (4.2),  $j_Y^*$  è surgettiva in quanto ogni funzionale su  $Y$  si estende ad uno su  $X$  perché  $X$  Banach e  $Y$  chiuso. Per il teorema di isomorfismo esiste un'unica mappa  $\phi$  che fa commutare

$$\begin{array}{ccc} X^* & \xrightarrow{j_Y^*} & Y^* \\ \pi \downarrow & \nearrow \phi & \\ X^*/\text{Ann}(Y) & & \end{array}$$

Per questioni di algebra  $\phi$  è lineare e poiché  $j_Y^*$  è continua e  $\pi$  induce la topologia quoziente,  $\phi$  è continua. Verifichiamo che è una isometria.

$$B_{X^*/\text{Ann}(Y)}(0, 1) = \pi(B_{X^*}(0, 1))$$

$$\phi(B_{X^*/\text{Ann}(Y)}(0, 1)) = \phi(\pi(B_{X^*}(0, 1))) = j_Y^*(B_{X^*}(0, 1)) \stackrel{(4.2)}{=} B_{Y^*}(0, 1).$$

dove nell'ultimo passaggio abbiamo usato il fatto che l'estensione data da Hahn-Banach mantiene la norma.

Data la proiezione  $\pi : X \rightarrow X/Y$  otteniamo  $\pi^* : (X/Y)^* \rightarrow X^*$ . Sia  $\varphi \in (X/Y)^*$  e  $f = \pi^*(\varphi) = \varphi \circ \pi$ . Si ha che

$$\varphi(B_{X/Y}) = \varphi(\pi(B_X)) = f(B_X),$$

quindi  $\|\varphi\|_{(X/Y)^*} = \|f\|_{X^*}$ , cioè  $\pi^*$  è una immersione isometrica.

Sia  $f \in X^*$ , si ha che  $f \in \text{Ann}(Y)$  se e solo se  $Y \subseteq \ker f$  che succede se e solo se  $f$  si fattorizza tramite  $\pi$  per proprietà universale. Quindi  $f \in \text{Ann}(Y)$  se e solo se  $f = \varphi \circ \pi = \pi^*(\varphi)$  per qualche  $\varphi : X/Y \rightarrow \mathbb{R}$ , cioè se e solo se  $f \in \pi^*((X/Y)^*)$ . Quindi  $\text{Imm } \pi^* = \text{Ann}(Y)$ .

Restringendo il codominio all'immagine troviamo quanto voluto.  $\square$

## Capitolo 6

# Completezza e duali di qualche spazio

### 6.1 Elenco di spazi completi

**Proposizione 6.1.**

Sia  $S$  insieme e  $E$  Banach, allora lo spazio normato  $(\mathcal{B}(S, E), \|\cdot\|_{\infty, S})$  è completo

*Dimostrazione.*

[PERSO, RIGUARDA POI]

tale che  $\|f(s)\| = \|\sum_k f_k(s)\| \leq \sum_k \|f_k(s)\| \leq \sum \|f\|_{\infty, S}$   
quindi  $\|f\|_{\infty, S}$

□

**Uno degli strumenti dell'analista: aggiungere e togliere, cioè**

*προσθαφαίρεσις*

**Lemma 6.2.**

Se  $(f_k)_{k \in \mathbb{N}} \subseteq \mathcal{B}(S, E)$  con  $f_k$  continua in  $s_0$  per ogni  $k$  e  $f_k \rightarrow f$  uniformemente allora anche  $f$  è continua in  $s_0$

*Dimostrazione.*

Consideriamo

$$\begin{aligned} \|f(s) - f(s_0)\| &\leq \|f(s) - f_k(s)\| + \|f_k(s) - f_k(s_0)\| + \|f_k(s_0) - f(s_0)\| \leq \\ &\leq 2\|f - f_k\|_{\infty, S} + \|f_k(s) - f_k(s_0)\| \end{aligned}$$

Per la convergenza uniforme di  $f_k \rightarrow f$  si ha che per ogni  $\varepsilon > 0$  esiste  $n \in \mathbb{N}$  tale che  $\|f - f_n\|_{\infty, S} \leq \varepsilon/3$ .

Per la continuità in  $s_0$  di  $f_n$  esiste un intorno  $U$  di  $s_0$  tale che  $\|f_n(s) - f_n(s_0)\| \leq \varepsilon/3$  per ogni  $s \in U$ . Allora per ogni  $s \in U$  si ha

$$\|f(s) - f(s_0)\| \leq 2\varepsilon/3 + \varepsilon/3 = \varepsilon.$$

□

**Proposizione 6.3.**

Sia  $S$  spazio topologico,  $E$  banach, allora  $\mathcal{BC}(S, E)$  è completo.

*Dimostrazione.*

Basta mostrare che  $\mathcal{BC}(S, E)$  è chiuso in  $\mathcal{B}(S, E)$ . Questo segue dal fatto che la continuità in un punto  $s_0 \in S$  si conserva per convergenza uniforme, che è il lemma precedente.  $\square$

**Esempio 6.4.**

Sia  $S = \mathbb{N} \cup \{\infty\}$  la compattificazione di Alexandrov di  $\mathbb{N}$  e  $E$  un banach, allora

$$c(E) \doteq \{x : \mathbb{N} \rightarrow E, \text{ convergente} \} \cong \mathcal{BC}(S, E)$$

Questo mostra che  $c(E)$  è chiuso (e quindi completo) in  $\ell_\infty(E) = \mathcal{B}(\mathbb{N}, E)$ .

Conseguenze:

**Proposizione 6.5.**

Lo spazio  $(L(X, Y), \|\cdot\|)$  è completo

*Dimostrazione.*

Considerando l'inclusione isometrica

$$R : \begin{array}{ccc} L(X, Y) & \longrightarrow & \mathcal{B}(B_X(0, 1), Y) \\ T & \longmapsto & T|_{B_X(0, 1)} \end{array}$$

basta vedere che  $R(L(X, Y))$  è chiuso.

Se  $(T_n)_{n \in \mathbb{N}} \subseteq L(X, Y)$  è tale che  $R(T_n) \rightarrow f$  uniformemente in  $\mathcal{B}(B_X(0, 1), Y)$  allora mostriamo che  $f$  è la restrizione a  $B_X(0, 1)$  di una qualche lineare  $T$ .

Mostriamo che le  $T_n$  convergono puntualmente per ogni  $x \in X$ : se  $x = 0$  ok, se  $x \neq 0$

$$T_n(x) = \|x\| T_n(x/\|x\|) = \|x\| R(T_n)(x/\|x\|) \rightarrow \|x\| f(x/\|x\|)$$

Sia  $T : X \rightarrow Y$  definita da  $T(x) = \|x\| f(x/\|x\|)$

[MOSTRARE CHE LA CONVERGENZA È UNIFORME, ME LO SONO PERSONO]  $\square$

**Corollario 6.6** (Duale di spazio normato è banach).

Il duale di uno spazio normato è sempre banach.

**Teorema 6.7** (Integrazione per serie).

Sia  $(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è uno spazio di misura e sia  $(f_k)_{k \in \mathbb{N}} \subseteq \mathcal{L}^1(X, \mathcal{Q}, \mu)$  tali che

$$\sum_{k \in \mathbb{N}} \|f_k\|_1 < \infty$$

Allora  $\sum_{k \in \mathbb{N}} f_k$  converge q.o. e in norma 1.

*Dimostrazione.*

Per ogni  $n \in \mathbb{N}$  sia  $g_n : X \rightarrow \mathbb{R}$  data da

$$g_n(x) = \sum_{k=0}^n |f_k(x)|.$$

Notiamo che  $(g_n)$  è una successione di funzioni misurabili non negative crescente. Inoltre  $g_n \rightarrow \sum_{k \in \mathbb{N}} |f_k(x)|$  per definizione di serie.

Per convergenza monotona

$$\sum_{k \in \mathbb{N}} \|f_k\|_1 \leftarrow \sum_{k=0}^n \|f_k\|_1 = \int_X g_n d\mu \rightarrow \int_X g d\mu$$

cioè  $\inf_X g d\mu = \sum_{k \in \mathbb{N}} \|f_k\|_1 < \infty$ , cioè  $g \in \mathcal{L}^1$ .

Inoltre  $s_n = \sum_{k=0}^n f_k$  è una successione dominata da  $g$ :

$$|s_n(x)| \leq \sum_{k=0}^n |f_k(x)| \leq g(x).$$

Quindi la serie  $\sum f_k(x)$  è una serie assolutamente convergente per ogni  $x$  dove  $g < \infty$ . Poiché  $\int g < \infty$  le eccezioni sono trascurabili, quindi quasi ovunque  $\sum f_k(x)$  è assolutamente convergente.

Sia  $f(x) = \sum f_k(x)$  dove la serie converge. Notiamo che

$$|f(x)| \leq \sum_{k \in \mathbb{N}} |f_k(x)| = g(x),$$

quindi  $\|f\|_1 \leq \int g d\mu = \sum_{k \in \mathbb{N}} \|f_k\|_1$ .

Applicando come prima la stima alle code

$$\|f - s_n\|_1 = \left\| \sum_{k=n+1}^{\infty} f_k \right\|_1 \leq \sum_{k>n} \|f_k\|_1 = o(1)$$

dove l'ultimo termine va a 0 perché  $\sum \|f_k\|_1$  è convergente. □

**Corollario 6.8** (Weil).

*Siano  $f_n \in \mathcal{L}^1(X, \mathcal{Q}, \mu)$  convergenti in  $\|\cdot\|_1$ . Allora esiste  $n_k$  successione strettamente crescente di indici tali che  $f_{n_k}$  converge quasi ovunque ed è dominata in  $\mathcal{L}^1$ .*

*Dimostrazione.*

Sia  $f$  il limite in  $\|\cdot\|_1$ . Data questa convergenza consideriamo una sottosuccessione  $n_k$  tale che  $\|f - f_{n_k}\|_1 < 2^{-k}$ . Scrivendo la successione in termini di una somma telescopica

$$f_{n_k} = f_{n_0} + \sum_{j=1}^k (f_{n_j} - f_{n_{j-1}})$$

si ha per il teorema di integrazione per serie<sup>1</sup> (6.7)  $f_{n_k}$  converge quasi ovunque e in  $\mathcal{L}^1$ , inoltre è dominata da

$$g(x) = |f_{n_0}(x)| + \sum_{j=0}^{\infty} |f_{n_j} - f_{n_{j-1}}| \geq |f_{n_k}(x)|$$

con  $g(x) \in \mathcal{L}^1$ . □

**Proposizione 6.9** ( $L^1$  è completo).

*Se  $(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è uno spazio di misura,  $L^1(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è completo.*

*Dimostrazione.*

Segue immediatamente dal teorema di integrazione per serie (6.7). □

*Osservazione 6.10.*

La convergenza quasi ovunque di funzioni  $\mathcal{L}^1(\mathbb{R}, dx)$  è **NON** la convergenza rispetto a una topologia opportuna su  $\mathcal{L}^1(\mathbb{R}, dx)$ .

---

<sup>1</sup>  $\|f_{n_0}\|_1 + \sum_{j=1}^{\infty} \|f_{n_j} - f_{n_{j-1}}\|_1 \leq \|f_{n_0}\|_1 + \sum_{j=1}^{\infty} \|f_{n_j} - f\|_1 + \sum_{j=1}^{\infty} \|f_{n_{j-1}} - f\|_1 < \infty$

**Proposizione 6.11** (Proprietà di Uhrison).

Ogni convergenza topologica in  $X$  insieme ha la seguente proprietà **di Uhrisohn**:  $x_n \rightarrow x$  rispetto alla topologia se e solo se per ogni sottosuccessione  $x_{n_k}$  esiste una sotto-sottosuccessione  $x_{n_{k_j}} \rightarrow x$ .

*Dimostrazione.*

Se  $x_n \rightarrow x$  converge ok. Se non converge allora esiste un intorno  $U$  di  $x$  tale che  $x_n \notin U$  frequentemente, quindi troviamo una sottosuccessione  $x_{n_k}$  che sta sempre fuori da  $U$ , quindi nessuna sua sotto-sottosuccessione può convergere a  $x$ .  $\square$

La convergenza q.o. per successioni in  $\mathcal{L}^1(\mathbb{R})$  non ha la proprietà di Uhrisohn.

**Definizione 6.12** (Operatore di composizione).

Se  $E$  è uno spazio di funzioni con codominio  $\mathbb{R}$  e  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , definiamo l'operatore di composizione per  $f$  come  $E \ni u \mapsto f \circ u$ .

**Lemma 6.13.**

Sia  $u_k$  una successione che converge a  $u$  in  $\|\cdot\|_p$ . A meno di sottosuccessione  $u_k \rightarrow u$  quasi ovunque e dominata in  $\mathcal{L}^p$ .

*Dimostrazione.*

Teorema di Weil (6.8) in  $\mathcal{L}^p$ .  $\square$

**Proposizione 6.14.**

Lo spazio  $L^p(X, \mathcal{Q}, \mu)$  per  $0 \leq p < \infty$  è completo.

*Dimostrazione.*

$L^p$  ed  $L^1$  NON sono isomorfi come spazi di Banach in generale<sup>2</sup>, ma esiste un omeomorfismo localmente Lipschitz e questo basta a mostrare la completezza: se  $u_k$  è una successione di Cauchy in  $L^p$ , se  $\Phi$  è Lipschitz allora  $\Phi(u_k)$  è ancora di Cauchy in  $L^1$  e quindi converge, poi torno indietro con  $\Phi^{-1}$ , che mantiene il limite per continuità.

Consideriamo

$$\Phi : \begin{array}{ccc} \mathcal{L}^p & \longrightarrow & \mathcal{L}^1 \\ u & \longmapsto & |u|^p \operatorname{sgn}(u) \end{array}$$

Chiaramente è invertibile mandando  $v \in L^1$  in  $|v|^{1/p} \operatorname{sgn} v$ . La mappa  $\Phi$  è l'operatore di composizione con la funzione  $f(t) = |t|^p \operatorname{sgn} t$ . La continuità degli operatori di composizione è un fatto generale. Se  $u_k \rightarrow u$  converge in  $\|\cdot\|_p$  allora per il lemma a meno di sottosuccessione converge q.o. e dominata, quindi componendo con  $f$  abbiamo ancora convergenza quasi ovunque per continuità ( $f(u_k) \rightarrow f(u)$  q.o.). Se  $|u_k| \leq g$  in  $\mathcal{L}^p$  allora  $|u_k|^p \leq g^p$  in  $\mathcal{L}^1$ , similmente per  $\Phi^{-1}$ , quindi effettivamente  $\Phi$  è un omeomorfismo.

Mostriamo ora che  $\Phi$  è localmente lipschitz: siano  $u, v \in \mathcal{L}^p(X)$

$$|\Phi(u) - \Phi(v)|_1 = \int_X |f(u(x)) - f(v(x))| d\mu(x)$$

---

<sup>2</sup>cursiosità non banale da vedere

ma se  $t < s$  allora  $|f(t) - f(s)| \leq \sup_{t \leq \xi \leq s} |f'(\xi)| |t - s|$  e  $|f'(xi)| = p |xi|^{p-1} \leq p(\max\{|t|, |s|\})^p$ , quindi

$$\begin{aligned} |\Phi(u) - \Phi(v)|_1 &\leq p \int_X \max\{|u(x)|^{p-1}, |v(x)|^{p-1}\} |u(x) - v(x)| d\mu \leq \\ &\leq p \int_X (|u(x)|^{p-1} + |v(x)|^{p-1}) |u(x) - v(x)| d\mu \stackrel{\text{Hölder}}{\leq} \\ &\leq p \left( \left( \int_X |u|^{(p-1)q} \right)^{1/q} + \left( \int_X |v|^{(p-1)q} \right)^{1/q} \right) \left( \int_X |u - v|^p \right)^{1/p} = \\ &\stackrel{p-1=p/q}{=} p(\|u\|_p^{p-1} + \|v\|_p^{p-1}) \|u - v\|_p \end{aligned}$$

quindi  $\Phi$  è Lipschitz di costante  $2pR^{p-1}$  sulla palla  $B_{L^p}(0, R) \subseteq L^p$  □

### Proposizione 6.15.

Lo spazio  $L^\infty(X, \mathcal{Q}, \mu)$  è completo

*Dimostrazione.*

[NON HO VISTO, RIGUARDA I PDF] □

$\|f\|_{C^1} = \|f\|_{\infty, \Omega} + \sum_{i=1}^n \|\partial_i f\|_{\infty, \Omega}$ . Questa norma rende continua l'immersione  $C_b^1 \rightarrow (C_b^0)^{n+1}$  data da  $f \mapsto (f, \partial_1 f, \dots, \partial_n f)$

### Proposizione 6.16.

Sia  $\Omega \subseteq \mathbb{R}^n$  aperto. Lo spazio

$$C_b^k(\Omega) = \{f : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \mid \text{di classe } C^k \text{ con derivate limitate su } \Omega \text{ fino all'ordine } k\}$$

è completo.

*Dimostrazione.*

Il caso  $k = 1$  è una conseguenza del teorema di limite sotto il segno di derivata, infatti se  $f_k : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ,  $\partial_i f_k : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$  è tale che  $\partial_i f_k \rightarrow g_i$  uniformemente in  $\Omega$  e  $f_k \rightarrow f$  puntualmente in  $\Omega$  allora esiste  $\partial_i f$  e vale  $g_i$ . Se poi  $f_k \in C^1(\Omega)$  allora la  $g_i$  è continua perché limite uniforme di  $\partial_i f_k$  continue, quindi per il teorema del differenziale totale la  $f$  è anche  $C^1$ .

Per il teorema di limite sotto il segno di derivata, l'immersione  $C_b^1 \rightarrow (C_b^0)^{n+1}$  ha immagine chiusa, infatti una successione  $(f_k, \partial_1 f_k, \dots, \partial_n f_k)$  nell'immagine convergente a  $(f, g_1, \dots, g_n)$  è proprio una delle ipotesi del teorema di convergenza sotto segno di derivata, quindi  $f_k \rightarrow f$  in  $C^1$  □

## 6.2 Duali di spazi concreti

### 6.2.1 Spazi $\ell_p$

**Definizione 6.17** (Norma estesa).

Sia  $\sigma : \mathbb{K}^{\mathbb{N}} \rightarrow [0, \infty]$  una **norma estesa**, cioè

1.  $\sigma(x + y) \leq \sigma(x) + \sigma(y)$
2.  $\sigma(\lambda x) = |\lambda| \sigma(x)$
3.  $\sigma(x) = 0 \iff x = 0$

Inoltre supponiamo che

4. per ogni  $n \in \mathbb{N}$  esista  $C_n$  tale che per ogni  $x \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$  si abbia  $|x(n)| \leq C_n \sigma(x)$

5.  $\sigma$  è LSC<sup>3</sup> rispetto alla convergenza puntuale, cioè

$$x^\nu \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}, \forall i \ x^\nu(i) \rightarrow x(i) \implies \sigma(x) \leq \liminf_{\nu \rightarrow +\infty} \sigma(x^\nu)$$

**Esempio 6.18.**

La funzione  $\sigma(x) = (\sum |x_i|^p)^{1/p}$  è una norma estesa su  $\mathbb{K}^{\mathbb{N}}$  che ha proprietà indicate. Anche  $\sigma(x) = \|x\|_\infty$  ha queste proprietà.

*Osservazione 6.19.*

Le proprietà 4. e 5. sono equivalenti a dire che  $\{\sigma \leq 1\}$  è compatto in  $\mathbb{K}^{\mathbb{N}}$ , infatti

$$4. \iff \{\sigma \leq 1\} \subseteq \prod_n \overline{B(0, C_n)} \subseteq \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$$

e 5. equivale a chiedere  $\{\sigma \leq 1\}$  chiuso, quindi insieme dicono che  $\{\sigma \leq 1\}$  è un chiuso in un compatto ( $\prod_n \overline{B(0, C_n)}$  è prodotto di compatti).

**Definizione 6.20** (Dominio di finitezza).

Definiamo il **dominio di finitezza** della norma estesa  $\sigma$  come

$$\ell_\sigma = \{x \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}} \mid \sigma < +\infty\}$$

**Esercizio 6.21.**

Il dominio di finitezza  $\ell_\sigma$  è uno spazio di Banach e  $\sigma$  induce la norma.

*Dimostrazione.*

Traccia:

- Verificare che  $\ell_\sigma$  è uno spazio vettoriale
- $\sigma$  è una norma
- Verificare la completezza:
  - Sia  $(x^\nu)_\nu \subseteq \ell_\sigma$  di Cauchy per  $\sigma$ . Allora per ogni  $n \in \mathbb{N}$

$$(x^\nu(n))_\nu \subseteq \mathbb{K}$$

è una successione di Cauchy in  $\mathbb{K}$ , quindi esiste  $x \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$  tale che  $x^\nu \rightarrow x$  puntualmente.

- Verificare che  $x \in \ell_\sigma$ : essendo di Cauchy,  $x^\nu$  è limitata, cioè  $\sigma(x^\nu) \leq R$  per qualche  $R \in \mathbb{R}$ , dunque  $\sigma(x) \leq R$  perché  $\{\sigma \leq R\}$  è chiuso.
- Verificare che  $\sigma(x^\nu - x) \rightarrow 0$ : Per ogni  $\varepsilon > 0$  esiste  $n \in \mathbb{N}$  tale che per ogni  $p, q \geq n$  vale  $\sigma(x^p - x^q) \leq \varepsilon$ . Notiamo che  $x^p - x^n \rightarrow x - x^n$  puntualmente, quindi per la semicontinuità si ha che per ogni  $\varepsilon > 0$  esiste  $n \in \mathbb{N}$  tale che per ogni  $q \geq n$  vale

$$\sigma(x - x^q) \leq \liminf_{p \rightarrow +\infty} \sigma(x^p - x^q) \leq \varepsilon$$

cioè  $\sigma(x - x^q) \rightarrow 0$  in norma  $\sigma$ .

---

<sup>3</sup>semicontinua inferiormente

□

*Osservazione 6.22.*

Questa è una seconda dimostrazione della completezza di  $\ell_p$  per  $1 \leq p \leq \infty$ .

*Osservazione 6.23.*

Funziona anche l'analogo per paranorme, quindi in realtà segue anche la completezza di  $\ell_p$  per  $0 < p \leq 1$ .

**Proposizione 6.24** (Duali di  $\ell_p$ ).

Se  $p$  e  $q$  sono esponenti coniugati ( $\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = 1$ ,  $\frac{1}{\infty} \doteq 0$ ) allora vale l'isometria  $(\ell_p)^* \cong \ell_q$ .

*Dimostrazione.*

Esiste una inclusione lineare isometrica data da

$$\Phi : \begin{array}{ccc} \ell_q & \longrightarrow & (\ell_p)^* \\ y & \longmapsto & \Phi_y : x \mapsto \sum_{i=0}^{\infty} y_i x_i \end{array} ,$$

dove la serie in esame converge assolutamente per la disuguaglianza di Hölder:

$$\sum |x_i y_i| \leq \|x\|_p \|y\|_q .$$

Effettivamente  $\Phi_y : \ell_p \rightarrow \mathbb{K}$  è lineare e continua per  $\|\cdot\|_{(\ell_p)^*}$ , infatti

$$\|\Phi_y\|_{(\ell_p)^*} = \sup_{\|x\|_p \leq 1} \left| \sum_{i=0}^{\infty} x_i y_i \right| \leq \sup_{\|x\|_p \leq 1} \|x\|_p \|y\|_q = \|y\|_q .$$

La stessa disuguaglianza mostra che  $\Phi$  stessa è un elemento di  $L(\ell_q, (\ell_p)^*)$  di norma minore o uguale a 1.

Resta da mostrare che  $\Phi$  è isometrica e surgettiva.

$1 < p < \infty$  Per mostrare che  $\|\Phi_y\|_{\ell_p^*} = \|y\|_q$  per ogni  $y \in \ell_q$  consideriamo  $x \in \mathbb{K}^{\mathbb{N}}$  dato da  $x_i = \overline{\text{sgn } y_i} |y_i|^{q-1}$ . Con questa scelta si ha che

$$x_i y_i = \overline{\text{sgn } y_i} \text{sgn } y_i |y_i|^q = |y_i|^q ,$$

inoltre

$$\|x\|_p^p = \sum_{i=0}^{\infty} |x(i)|^p = \sum_{i=0}^{\infty} |y_i|^{(q-1)p} = \sum_{i=0}^{\infty} |y_i|^q = \|y\|_q^q ,$$

cioè  $x \in \ell_p$  e

$$\|\Phi_y\|_{\ell_p^*} \geq \frac{\Phi_y(x)}{\|x\|_p} = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} |y_i|^q}{(\|y\|_q^q)^{1/p}} = \|y\|_q^{q-q/p} = \|y\|_q ,$$

d'altronde sappiamo che vale anche l'altra disuguaglianza in generale, quindi abbiamo  $\|\Phi_y\|_{\ell_p^*} = \|y\|_q$  come voluto.

$p = \infty, q = 1$  Sia  $x_i = \overline{\text{sgn } y_i}$ . Segue che  $\|x\|_{\infty} \leq 1$  quindi è un elemento valido e

$$\Phi_y(x) = \|y\|_1 ,$$

da cui segue  $\|\Phi_y\|_{\ell_{\infty}^*} \geq \|y\|_1$  come voluto.



$p = 1, q = \infty$  In generale  $\|\Phi_y\|_{\ell_1^*}$  non è raggiunto come  $\Phi_y(x)$  per qualche  $x$ <sup>4</sup>. La conclusione però vale comunque.

Mostriamo ora che l'inclusione è surgettiva per  $1 \leq p < \infty$ . Per ogni  $\varphi \in \ell_p^*$  cerchiamo  $y \in \ell_q$  tale che  $\varphi = \Phi_y$ . C'è un solo  $y$  possibile, basta valutare  $\varphi$  negli  $e_i = (\delta_{ij})_j$ . Per ogni  $m \in \mathbb{N}$  sia  $P_m : \mathbb{K}^{\mathbb{N}} \rightarrow \mathbb{K}^m$  il proiettore sulle prime  $m$ -entrate. Considerando  $P_m$  come operatore  $P_m : \ell_p \rightarrow \mathbb{K}^m \subseteq \ell_p$  restringendo il dominio, definiamo  $\varphi_m = \varphi \circ P_m = P_m^* \varphi$ . Infine, sia

$$y_m = P_m y = (y(0), y(1), \dots, y(m-1), 0, 0, \dots) = \sum_{i=0}^{m-1} y_i e_i,$$

e notiamo che

$$\varphi_m = \Phi_{y_m}$$

infatti sono entrambi elementi di  $\ell_p^*$  e

$$\begin{aligned} \varphi_m(e_k) &= \varphi(P_m(e_k)) = \begin{cases} \varphi(e_k) & \text{se } k < m \\ 0 & \text{se } k \geq m \end{cases} \\ \Phi_{y_m}(e_k) &= \sum_{i=0}^{\infty} y_m(i) e_k(i) = y_m(i) = \begin{cases} \varphi(e_k) & \text{se } k < m \\ 0 & \text{se } k \geq m \end{cases} \end{aligned}$$

quindi  $\varphi_m$  e  $\Phi_{y_m}$  coincidono su  $(e_k)$ , quindi sullo span di questi e quindi sulla chiusura di questo span, che è  $\ell_p$  se  $p < \infty$ .

Essendo  $\Phi$  isometrica

$$\|y_m\|_q = \|\Phi_{y_m}\|_{\ell_p^*} = \|\varphi_m\|_{\ell_p^*} \leq \|\varphi\|_{\ell_p^*}$$

quindi  $\sum_{i=0}^{m-1} |y(i)|^q \leq \|\varphi\|_{\ell_p^*}^q$  per ogni  $m$ , dunque passando al sup in  $m$

$$\|y\|_q \leq \|\varphi\|_{\ell_p^*}$$

e quindi  $y$  era un elemento valido di  $\ell_q$ . □

### Proposizione 6.25.

Si ha che  $\ell_1 \cong c_0^*$

*Dimostrazione.*

Consideriamo

$$\Phi : \begin{array}{ccc} \ell_1 & \longrightarrow & c_0^* \\ y & \longmapsto & x \mapsto \sum_{i=0}^{\infty} x_i y_i \end{array}$$

Allora  $\Phi$  è lineare e  $|\Phi_y(x)| \leq \|x\|_{\infty} \|y\|_1$ .  $\Phi$  è isometrica

$$\|\Phi_y\|_{c_0^*} = \sup_{\|x\|_{\infty} \leq 1, x \in c_0} \sum x_i y_i = \|y\|_1,$$

infatti l'estremo superiore si realizza con la successione  $x^n = \overline{\text{sgn } y} \chi_{[0,n]}$  ( $\Phi_y(x^n) = \sum_{i=0}^n |y_i|$  e passando al limite in  $n$  troviamo proprio  $\|y\|_1$ ). Inoltre  $\Phi$  è surgettiva infatti  $(e_k)_k \in \mathbb{N} \subseteq c_0$  genera un sottospazio denso. □

<sup>4</sup>per esempio  $y_i = 1 - 2^{-i}$  perché in tal caso  $\Phi_y(x) = \sum (1 - 2^{-i}) x_i < \sum |x_i| = \|x\|_1$

**Definizione 6.26** (Finita additività).

Una funzione  $\mu : \mathcal{P}(S) \rightarrow \mathbb{K}$  è **finitamente additiva** se per ogni  $A, B \subseteq S$  disgiunti,  $\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B)$ .

**Lemma 6.27** (Duale è addendo diretto nel triduale).

$X^*$  è sempre un addendo diretto se visto come sottospazio di  $X^{***}$ .

*Dimostrazione.*

Ricordiamo che ogni Banach ammette un'immersione isometrica  $X \hookrightarrow X^{**}$ , quindi  $X^* \hookrightarrow X^{***}$ . Consideriamo allora la composizione

$$X^* \xrightarrow{\iota_{X^*}} X^{***} \xrightarrow{(\iota_X)^*} X^*$$

e mostriamo che è l'identità: per ogni  $f \in X^*$  e per ogni  $x \in X$

$$\langle f, x \rangle = \langle \iota_X(x), f \rangle = \langle \iota_{X^*}(f), \iota_X(x) \rangle = \langle (\iota_X)^*(\iota_{X^*}(f)), x \rangle.$$

Dunque  $\iota_{X^*}$  e  $(\iota_X)^*$  sono una coppia inversa destra e inversa sinistra, quindi

$$X^{***} = \iota_{X^*}(X^*) \oplus \ker((\iota_X)^*).$$

□

*Osservazione 6.28.*

Domanda:  $c_0$  è un duale? Cioè, esiste  $X$  Banach tale che  $X^*$  è linearmente omeomorfo a  $c_0$ ?

NO! Perché  $c_0$  non è complementato in  $\ell_\infty$  (difficile da mostrare).

**Lemma 6.29.**

Se  $X$  è un sottospazio  $\infty$ -dimensionale di  $\ell_1$  allora esiste una successione  $(x_k) \subseteq X$  e una successione di naturali  $(T_k) \subseteq \mathbb{N}$  strettamente crescente tali che

$$\begin{cases} \|x_k\|_1 = 1 \\ \|x_k\|_{1,[0,T_k]} = \sum_{i=0}^{T_k} |x_k(i)| \geq 3/4 \\ x_{k+1}|_{[0,T_k]} = 0 \end{cases}$$

*Dimostrazione.*

Scegliamo  $x_0 \in X$  di norma 1 e  $T_0 \in \mathbb{N}$  che abbia la seconda proprietà. Supponiamo ora di aver definito  $x_0, \dots, x_k$  e di avere  $T_0 < \dots, T_k$ , allora

$$X \cap \left\{ x \in \ell_1 \mid x|_{[0,T_k]} = 0 \right\} \neq \emptyset$$

in quanto intersezione fra un sottospazio di dimensione infinita e dei sottospazi di codimensione finita, infatti quell'intersezione si può scrivere come

$$\bigcap_{0 \leq i \leq T_k} \{x \in X \mid x(i) = 0\}.$$

Prendendo un elemento  $x_{k+1}$  normalizzato in questa intersezione abbiamo esteso la successione. Per scegliere  $T_{k+1}$  basta prenderlo maggiore di  $T_k$  e tale che

$$\|x_{k+1}\|_{1,[0,T_{k+1}]} \geq 3/4.$$

□

**Proposizione 6.30.**

Se  $Y \subseteq \ell_1$  è un sottospazio chiuso di dimensione infinita allora  $Y$  contiene una copia di  $\ell_1$ .

*Se guardi a lungo dentro  $\ell_1$ ,  $\ell_1$  guarda dentro di te.*

*Dimostrazione.*

Sia  $X$  sottospazio chiuso di dimensione infinita di  $\ell_1$  e siano  $(x_k) \subseteq \ell_1$  e  $(T_k) \subseteq \mathbb{N}$  come nel lemma (6.29) Definiamo l'operatore lineare

$$L : \begin{array}{ccc} \ell_1 & \longrightarrow & X \\ \lambda & \longmapsto & \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k x_k \end{array}$$

$L$  è ben definita perché la serie è assolutamente convergente rispetto a  $\|\cdot\|_1$

$$\left\| \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k x_k \right\|_1 \leq \sum_{k=0}^{\infty} |\lambda_k| \|x_k\|_1 \leq \|\lambda\|_1.$$

Notiamo anche che  $X$  chiuso e quindi  $L$  continuo di norma  $\|L\| \leq 1$ .

Sia  $I_k = [0, T_k]$  e notiamo che

$$\begin{aligned} \|L\lambda\| &= \left\| \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k x_k \right\| \geq \left\| \sum_{k=0}^{\infty} \lambda_k x_k|_{I_k} \right\| - \sum_{k=0}^{\infty} \left\| \lambda_k x_k|_{I_k^c} \right\| = \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} |\lambda_k| \|x_k|_{I_k}\|_1 - \sum_{k=0}^{\infty} |\lambda_k| \|x_k|_{I_k^c}\|_1 \geq \\ &\geq \frac{3}{4} \|\lambda\|_1 - \frac{1}{4} \|\lambda\|_1 = \frac{1}{2} \|\lambda\|_1 \end{aligned}$$

dunque  $L : \ell_1 \rightarrow X$  è fortemente iniettivo e quindi è un isomorfismo con l'immagine in quanto questa è chiusa.  $\square$

**Esercizio 6.31.**

$c_0$  non è un duale.

*Dimostrazione.*

Segue dalla proposizione (6.30): se esistesse  $X$  tale che  $X^* \cong c_0$  allora  $\iota_X : X \hookrightarrow X^{**} \cong \ell_1$  e quindi per la proposizione  $X$  contiene un sottospazio  $Y$  isomorfo a  $\ell_1$ , ma allora da  $Y \subseteq X$  segue

$$\ell_\infty \cong \ell_1^* \cong Y^* \cong X^* / \text{Ann}(Y) \cong c_0 / \text{Ann } Y$$

ma  $\ell_\infty$  non è separabile mentre  $c_0$  è separabile e ogni quoziente di un separabile deve essere separabile.  $\square$

**Proposizione 6.32.**

Si ha che  $\ell_1 \hookrightarrow \ell_\infty^*$  è una immersione isometrica NON surgettiva.

*Dimostrazione.*

L'iniezione è chiara. Consideriamo le funzioni che hanno limite (le costanti a meno di una infinitesima)

$$c = \left\{ x \in \ell_\infty \mid \exists \lim_{i \rightarrow \infty} x_i \right\} \cong c_0 \oplus \mathbb{R}$$

Esiste un funzionale su  $c$  dato da

$$\lambda: \begin{array}{ccc} c & \longrightarrow & \mathbb{K} \\ y & \longmapsto & \lim y_i \end{array}.$$

Questo è continuo perché  $\|\lambda\| \leq 1$  (perché  $|\lim y_i| \leq \|y\|_\infty$ ). Per il teorema di Hahn-Banach (4.4) si estende ad un funzionale continuo in  $\ell_\infty$ .

Consideriamo

$$ba = \{\mu: \mathcal{P}(\mathbb{N}) \rightarrow \mathbb{K} \mid \text{limitate e finitamente additive.}\} \subseteq (\mathcal{B}(\mathcal{P}(\mathbb{N}), \mathbb{K}), \|\cdot\|_\infty)$$

e la mappa

$$\Psi: \begin{array}{ccc} \ell_\infty^* & \longrightarrow & ba \\ y & \longmapsto & A \mapsto y(\chi_A) \end{array}$$

Notiamo che  $\Psi$  è surgettiva: se  $\mu \in ba$  e definiamo una funzione lineare su  $\ell_\infty$  come segue

- Se  $x \in \ell_\infty$  è della forma  $x = \sum c_i \chi_{A_i}$ , cioè  $x(\mathbb{N}) \subseteq \{\sum_{i \in J} c_i \mid J \subseteq \{0, \dots, n\}\}$  è finito, quindi

$$x = \sum_{c \in \mathbb{K}} c \chi_{\{x=0\}} \text{ è una somma finita}$$

Sia  $S$  il sottoinsieme di  $\ell_\infty$  delle successioni di questa forma. Mostriamo che  $\overline{S} = \ell_\infty$  dove la chiusura è presa rispetto a  $\|\cdot\|_\infty$ . Per ogni  $x \in \ell_\infty$  con  $x: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}$  si ha che

$$x - 2^{-n} \leq x^n = \frac{\lfloor 2^n x \rfloor}{2^n} \leq x$$

- Per  $x \in S$  dato da  $x = \sum_{i=1}^n c_i \chi_{A_i}$  poniamo  $\langle \mu, x \rangle = \sum_{i=1}^n c_i \mu(A_i)$ . Chiaramente abbiamo linearità e la buona definizione segue dal fatto che questa espressione coincide con  $\sum_{c \in \mathbb{K}} c \mu(\{x=c\})$  per finita additività, ma questa forma è univocamente determinata da  $x$ .
- Vale che  $|\langle \mu, x \rangle| \leq \|x\|_\infty (\sum_{c \in \mathbb{K}} |\mu(\{x=c\})|)$  infatti per ogni  $c$ , se  $\mu(\{x=c\}) \neq 0$  allora  $|c| \leq \|x\|_\infty$  per definizione.
- Per ogni  $\mu$  esiste  $C$  tale che per ogni  $x \in S$  si ha

$$|\langle \mu, x \rangle| \leq C \|x\|_\infty$$

(VERIFICARE!)

- Quindi  $\mu$  si estende alla chiusura di  $S$ , che è tutto  $\ell_\infty$ .

Notiamo che  $ba = \ell_\infty^* = \ell_1^{**} = c_0^{***}$ , quindi  $\ell_1 \hookrightarrow \ell_1^{**} = ba$  è complementato per il lemma (6.27).  $\square$

**Proposizione 6.33** (Convergenza forte e debole coincidono su  $\ell_1$ ).

*La convergenza debole e la convergenza in norma per  $\ell_1$  sono la stessa cosa.*

*Dimostrazione.*

Poiché la topologia debole è meno fine della topologia forte basta mostrare che convergenza debole implica convergenza in  $\|\cdot\|_1$ .

Sia  $f_n \rightarrow f$  in  $w\text{-}\ell_1$ , cioè per ogni funzionale  $\phi$  lineare continuo su  $\ell_1$  si ha che  $\langle \phi, f_n \rangle \rightarrow \langle \phi, f \rangle$ . Dunque, ricordando (6.24) che  $\ell_\infty = \ell_1^*$ , per ogni  $\varphi \in \ell_\infty$  si ha

$$\sum_i \varphi(i) f_n(i) \rightarrow \sum_i \varphi(i) f(i).$$

Notiamo che, portando  $f$  al primo membro possiamo supporre senza perdita di generalità  $f = 0$ . Per la proprietà di Uhrison (6.11) basta provare che esiste una sottosuccessione di  $f_n$  che converge a 0 infatti  $f_n \rightarrow 0$  se e solo se per ogni sottosuccessione  $f_{n_k}$  esiste una sotto-sottosuccessione  $f_{h_{k_j}} \rightarrow 0$ .

Nel caso particolare di successioni  $f_n$  a supporto disgiunto la tesi è facile: Se siamo in questo caso scegliamo  $\varphi \in \ell_\infty$  data da

$$\varphi = \sum \overline{\operatorname{sgn} f_i} \text{ dove } (\operatorname{sgn} f_i)(x) = \operatorname{sgn}(f_i(x)) = \begin{cases} f_i(x)/|f_i(x)| & f_i(x) \neq 0 \\ 0 & f_i(x) = 0 \end{cases}$$

in modo tale che  $\langle \varphi, f_n \rangle = \langle \overline{\operatorname{sgn}(f_n)}, f_n \rangle = \|f_n\|_1$  e stesso per  $f$ , quindi in questo caso è chiaro che convergenza debole implica convergenza in  $\|\cdot\|_1$ .

Assumiamo dunque che  $f_n \rightarrow 0$  debolmente (e quindi puntualmente guardando i funzionali che estraggono la  $n$ -esima entrata). Basta provare che esiste una successione  $(g_j)_{j \geq 0} \subseteq \ell_1$  e una sottosuccessione  $f_{n_j}$  tale che  $\|f_{n_j} - g_j\|_1 \rightarrow 0$  e  $g_j$  hanno supporto disgiunto.

Costruiamo le  $g_j$  per induzione. Notiamo che

- per ogni  $f_n$  si ha che  $\|f_n \chi_{\mathbb{N} \setminus [0, T]}\|_1 \rightarrow 0$  per  $T \rightarrow \infty$
- per ogni  $T$  si ha  $\|f_n \chi_{[0, T]}\|_1 \rightarrow 0$  per  $n \rightarrow \infty$

quindi per costruire le  $g_j$  basta alternare questi fatti prendendo opportuni limiti (credo?).  $\square$

*Osservazione 6.34.*

Questo è un esempio dove due topologie diverse hanno “le stesse successioni convergenti”.

# Appendice A

## Topologia

**Proposizione A.1** (Topologia iniziale).

Sia  $X$  un insieme e  $\mathcal{F}$  una famiglia di mappe a valori in uno spazio topologici.

Notazione:

$$\mathcal{F} = \{f_j : X \rightarrow (Y_j, \tau_j)\}_{j \in I}.$$

Allora esiste la topologia meno fine su  $X$  che rende continue le mappe  $f_j$ . Una prebase di questa topologia è data da

$$\{f_j^{-1}(A) \mid j \in I, A \in \tau_j\}.$$

In realtà basterebbe prendere una prebase per  $\tau_j$  al posto di tutta la topologia.

Questa topologia è detta **topologia iniziale della famiglia  $\mathcal{F}$**  e si denota  $\tau_{\mathcal{F}}$ .

**Osservazione A.2** (Proprietà universale della topologia iniziale).

Data una mappa  $\varphi : (Z, \tau_Z) \rightarrow (X, \tau_{\mathcal{F}})$  essa è continua se e solo se  $f \circ \varphi$  è continua per ogni  $f \in \mathcal{F}$ .

*Dimostrazione.*

Se  $\varphi$  è continua allora  $f \circ \varphi$  è composizione di continue. Se sappiamo che  $f \circ \varphi$  è continua per ogni  $f \in \mathcal{F}$  allora, se  $A$  è un aperto di  $X$  per continuità di  $f \circ \varphi$  abbiamo

$$\tau_Z \ni (f \circ \varphi)^{-1}(A) = \varphi^{-1}(f^{-1}(A))$$

cioè le preimmagini tramite  $\varphi$  di aperti di prebase sono aperti di  $Z$ , quindi  $\varphi$  è continua.  $\square$

**Proposizione A.3** (Transitività della topologia iniziale).

Supponiamo di avere una famiglia di mappe  $\mathcal{F}' = \{f_i : X \rightarrow Y_i\}_{i \in I}$  e per ogni  $i \in I$  sia  $\mathcal{G}_i = \{g_{ij} : Y_i \rightarrow Z_{ij}\}_{j \in J_i}$  una famiglia di mappe. Su ogni  $Y_i$  consideriamo la topologia iniziale determinata da  $\mathcal{G}_i$ . Allora la topologia iniziale data da  $\mathcal{F}'$  su  $X$  coincide con la topologia iniziale su  $X$  definita da  $\mathcal{F} = \{g_{ij} \circ f_i \mid i \in I, j \in J_i\}$ .

*Dimostrazione.*

Entrambe le topologie in esame sono generate dagli insiemi  $(g_{ij} \circ f_i)^{-1}(A)$  al variare di  $i \in I, j \in J_i$  e  $A \in \tau_{Z_{ij}}$ , infatti

$$\text{prebase per } \mathcal{F} \rightarrow (g_{ij} \circ f_i)^{-1}(A) = f_i^{-1}(g_{ij}^{-1}(A)) \leftarrow \text{prebase per } \mathcal{F}'.$$

$\square$