

Appunti di Geometria 2
anno accademico 2019/2020

Marco Vergamini Alessio Marchetti Luigi Traino

Indice

Introduzione	4
1 Spazi metrici e spazi topologici	5
1.1 Spazi metrici	5
1.2 Continuità in spazi metrici	6
1.3 Spazi topologici	9
1.4 Continuità in spazi topologici	11
1.5 Ordinamento fra topologie, basi e prebasi	13
1.6 Assiomi di numerabilità	15
1.7 Sottospazi topologici	22
2 Prodotti e quozienti topologici	25
2.1 Topologie prodotto	25
2.2 Proprietà delle topologie prodotto	27
2.3 Assiomi di separazione	30
2.4 Quozienti topologici	36
2.5 Quozienti per azioni di gruppi	39
3 Connessioni e compattezza	41
3.1 Ricoprimenti	41
3.2 Connessioni	42
3.3 Compattezza	48
3.4 Compattificazione di Alexandroff ed esaustioni	56
3.5 Compattezza per successioni	57
3.6 Completezza e caratterizzazione dei metrici compatti	58
3.7 Spazi di Baire	62
3.8 Azioni proprie	63
4 Spazi proiettivi e varietà	68
4.1 Spazi proiettivi	68
4.2 Proiettivi complessi	71
5 Topologia algebrica	73
5.1 Omotopie, equivalenze omotopiche e retrazioni	73
5.2 Gruppo fondamentale	75
5.3 Il gruppo fondamentale come funtore	78
5.4 Rivestimenti	79
5.5 Alcuni gruppi fondamentali	83
5.6 Gruppi liberi	85
5.7 Il teorema di Van Kampen	87
5.8 Ancora rivestimenti e gruppo fondamentale	89
5.9 Rivestimento universale e spazi semilocalmente semplicemente connessi	95
5.10 π_1 di grafi finiti (connessi)	97

6	Analisi complessa	99
6.1	Funzioni olomorfe	99
6.2	Serie	103
6.3	Funzioni analitiche	108
6.4	Zeri di funzioni analitiche e prolungamento analitico	111
6.5	1-forme differenziali complesse	113
6.6	Integrali curvilinei	115
6.7	Forme chiuse di classe C^1	122
6.8	Le funzioni olomorfe sono analitiche	123
6.9	Alcuni risultati sulle funzioni olomorfe	130
6.10	Funzioni armoniche	134
6.11	Serie di Laurent	135
6.12	Singolarità	138
6.12.1	Teorema dei Residui	139
7	Di nuovo spazi proiettivi	145
7.1	Mutua posizione	145
7.2	Trasformazioni proiettive	154
7.3	Geometria proiettiva e affine	157
7.4	Spazi proiettivi di dimensione 1	158
	Ringraziamenti	161

Introduzione

Questi appunti sono basati sul corso di Geometria 2 tenuto dai professori Roberto Frigerio e Jacopo Gandini nell'anno accademico 2019/2020. Sono dati per buoni i contenuti dei corsi del primo anno, in particolare Analisi 1 e Geometria 1. Come corequisiti si richiedono nozioni insegnate nei corsi di Analisi 2 e Algebra 1. Verranno omesse o soltanto hintate le dimostrazioni più semplici, ma si consiglia comunque di provare a svolgerle per conto proprio. Ogni tanto sarà commesso qualche abuso di notazione, facendo comunque in modo che il significato sia reso chiaro dal contesto. Inoltre, la notazione verrà alleggerita man mano, per evitare inutili ripetizioni e appesantimenti nella lettura. Si ricorda anche che questi appunti sono scritti a più mani, non sempre subito dopo le lezioni, non sempre con appunti completi, ecc. . . . Spesso saranno rivisti, verranno aggiunte cose che mancavano perché c'era poco tempo (o voglia. . .), potrebbero mancare argomenti più o meno marginali. . . insomma, non è un libro di testo per il corso, ma vuole essere un valido supporto per aiutare gli studenti che seguono il corso. Speriamo di essere riusciti in questo intento.

1 Spazi metrici e spazi topologici

1.1 Spazi metrici

Definizione 1.1.1. Uno SPAZIO METRICO è una coppia (X, d) , X insieme, $d : X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ t.c. per ogni $x, y, z \in X$

- (i) $d(x, y) \geq 0$ e $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$;
- (ii) $d(x, y) = d(y, x)$;
- (iii) $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$ (disuguaglianza triangolare).

In tal caso d si dice DISTANZA o METRICA.

Esempio 1.1.2. Ecco alcuni esempi di distanze:

- La distanza d_1 su \mathbb{R}^n , che alla coppia di elementi $x = (x_1, \dots, x_n), y = (y_1, \dots, y_n)$ associa il numero

$$d_1(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|;$$

- la distanza d_2 (o d_E , distanza euclidea) su \mathbb{R}^n ,

$$d_2(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2};$$

- la distanza d_∞ su \mathbb{R}^n , $d_\infty(x, y) = \sup_{i=1, \dots, n} \{|x_i - y_i|\}$;
- la distanza discreta su un generico insieme X , $d(x, y) = 1$ se $x \neq y$ e 0 altrimenti;
- le distanze d_1, d_2, d_∞ sullo spazio delle funzioni continue da $[0, 1]$ in \mathbb{R} , definite rispettivamente

$$d_1(f, g) = \int_0^1 |f(t) - g(t)| dt,$$

$$d_2(f, g) = \sqrt{\int_0^1 (f(t) - g(t))^2 dt},$$

$$d_\infty(f, g) = \sup_{t \in [0, 1]} |f(t) - g(t)|.$$

Definizione 1.1.3. $f : (X, d) \rightarrow (Y, d')$ viene detto EMBEDDING ISOMETRICO se $d'(f(x_1), f(x_2)) = d(x_1, x_2)$ per ogni $x_1, x_2 \in X$.

Osservazione 1.1.4. Valgono i seguenti fatti:

- l'identità è un embedding isometrico;
- composizione di embedding isometrici è un embedding isometrico;

- se un embedding isometrico f è biiettivo, anche f^{-1} è un embedding isometrico e f si dice ISOMETRIA;
- un embedding isometrico è sempre iniettivo, dunque è un'isometria se e solo se è suriettivo;
- se (X, d) è fissato, l'insieme delle isometrie da X in sé è un gruppo con la composizione, chiamato $\text{Isom}(X, d)$.

Definizione 1.1.5. Sia V uno spazio vettoriale. Una norma su V è una funzione $\|\cdot\| : V \rightarrow [0, \infty)$ che rispetta le seguenti proprietà, per ogni $x, y \in V$, $\lambda \in \mathbb{R}$:

- (i) $\|x\| = 0$ se e solo se $x = 0$;
- (ii) $\|\lambda x\| = |\lambda| \|x\|$;
- (iii) $\|x + y\| \leq \|x\| + \|y\|$.

Ogni norma induce una distanza d sullo spazio definita come $d(x, y) = \|x - y\|$.

Teorema 1.1.6. Le norme su uno spazio vettoriale reale di dimensione finita inducono distanze topologicamente equivalenti.

Dimostrazione. Sia n la dimensione dello spazio. Poichè lo ogni spazio reale di tale dimensione è isomorfo a \mathbb{R}^n , assumo senza perdita di generalità che $V = \mathbb{R}^n$. Sia allora $\{e_1, \dots, e_n\}$ la base canonica. Sia inoltre $M = \max_{i=1, \dots, n} \|e_i\|$. Si ha dunque che

$$\|x\| - \|y\| \leq \|x - y\| \leq M \sum_i |x_i - y_i| = M d_1(x, y)$$

Ho ottenuto allora che $\|\cdot\|$ è Lipschitziana nella distanza d_1 , e dunque è anche continua. Poichè d_1 e d_2 sono equivalenti, la norma è continua anche con d_2 . Allora ammette massimo e minimo sui compatti, e in particolare sulla sfera unitaria. Siano essi rispettivamente M e m . Per ogni vettore v dello spazio, vale allora

$$\|v\| = \left\| \|v\|_2 \frac{v}{\|v\|_2} \right\| = \|v\|_2 \left\| \frac{v}{\|v\|_2} \right\|$$

che porta a

$$m \|v\|_2 \leq \|v\| \leq M \|v\|_2$$

Passando alle distanze indotte si ottiene l'equivalenza desiderata. \square

1.2 Continuità in spazi metrici

Definizione 1.2.1. Dati $p \in X, R > 0$, $B(p, R) := \{x \in X \mid d(p, x) < R\}$ è detta la PALLA APERTA di centro p e raggio R . Se al posto del minore si utilizza il minore o uguale, si ottiene la definizione di PALLA CHIUSA (nelle definizioni seguenti useremo le palle aperte).

Definizione 1.2.2. $f : (X, d) \rightarrow (Y, d')$ è *continua in* x_0 se $\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0$ t.c. $f(B(x_0, \delta)) \subseteq B(f(x_0), \varepsilon)$, cioè $f^{-1}(B(f(x_0), \varepsilon)) \supseteq B(x_0, \delta)$.

Definizione 1.2.3. $f(X, d) \rightarrow (Y, d')$ è detta **CONTINUA** se è continua in ogni $x_0 \in X$.

Osservazione 1.2.4. Gli embedding isometrici sono continui.

Esempio 1.2.5. Siano (X, d) spazio metrico, $E \subseteq X$ e $x_0 \in X$ fissato. Allora la funzione $f : E \rightarrow \mathbb{R}$ definita come $f(x) = d(x, x_0)$ è continua.

Dimostrazione. Sia $x \in E$ e $\varepsilon > 0$. Per avere la continuità, vogliamo trovare un $\delta > 0$ t.c. $f(B(x, \delta)) \subseteq (f(x) - \varepsilon, f(x) + \varepsilon)$, cioè per ogni $y \in E$ t.c. $d(y, x) < \delta$ vogliamo $|f(y) - f(x)| < \varepsilon$. Ma notiamo che $|f(y) - f(x)| = |d(y, x_0) - d(x, x_0)|$ che per la disuguaglianza triangolare (opportunamente rimaneggiata) è minore o uguale di $d(x, y) < \delta$, dunque basta prendere $\delta = \varepsilon$. \square

Definizione 1.2.6. Sia X uno spazio metrico, $A \subseteq X$ è detto **APERTO** se per ogni $x \in A$ esiste $R > 0$ t.c. $B(x, R) \subseteq A$.

Fatto 1.2.7. Le palle aperte sono aperti. Per dimostrarlo, sfruttare la disuguaglianza triangolare.

Teorema 1.2.8. $f(X, d) \rightarrow (Y, d')$ è continua se e solo se per ogni aperto A di Y $f^{-1}(A)$ è aperto di X .

Dimostrazione. Supponiamo f continua. Prendiamo $x \in f^{-1}(A)$, allora si ha che $f(x) \in A$, ma dato che A è aperto esiste una palla aperta B_Y di centro $f(x)$ t.c. $B_Y \subseteq A$, da cui $f^{-1}(B_Y) \subseteq f^{-1}(A)$. Usando la definizione di continuità, detto ε il raggio di B_Y , scegliendo il δ corrispondente come raggio di una palla di centro x , sia essa B_X , si ha che $B_X \subseteq f^{-1}(B_Y) \subseteq f^{-1}(A)$, perciò abbiamo trovato una palla centrata in x tutta contenuta in $f^{-1}(A)$ e questo prova che è un aperto.

Viceversa, supponiamo che le controimmagini di aperti siano a loro volta aperti. Dati $x_0 \in X$ e $\varepsilon > 0$ si ha che $B(f(x_0), \varepsilon)$ è un aperto di Y , perciò la sua controimmagine è un aperto, ma allora per definizione di aperto esiste $\delta > 0$ tale che $B(x_0, \delta) \subseteq f^{-1}(B(f(x_0), \varepsilon))$ e questo prova che f è continua. \square

Osservazione 1.2.9. La continuità di una funzione dipende quindi solo indirettamente dalla metrica, mentre è direttamente collegata agli aperti generati dalla metrica stessa. Segue facilmente che due metriche che generano gli stessi aperti portano anche alla stessa famiglia di funzioni continue. Diamo dunque la seguente definizione.

Definizione 1.2.10. Due distanze d, d' su un insieme X si dicono **TOPOLOGICAMENTE EQUIVALENTI** se inducono la stessa famiglia di aperti.

Lemma 1.2.11. Siano d, d' distanze su X t.c. esiste $k \geq 1$ t.c. per ogni $x, y \in X$ valga $d(x, y)/k \leq d'(x, y) \leq k \cdot d(x, y)$. Allora d e d' sono topologicamente equivalenti.

Dimostrazione. Sia A un aperto indotto da d' e $x_0 \in A$. Per definizione di aperto esiste $R > 0$ tale che $B_{d'}(x_0, R) \subseteq A$. Considero $B_d(x_0, R/k)$. Dato un elemento $x \in B_d(x_0, R/k)$ ho che $d'(x_0, x) \leq k \cdot d(x_0, x) < k \cdot R/k = R$, dunque $x \in B_{d'}(x_0, R)$. Allora $B_d(x_0, R/k) \subseteq B_{d'}(x_0, R) \subseteq A$ e dunque A è anche un aperto indotto da d . Per la simmetria delle disuguaglianze nelle ipotesi si dimostra anche l'opposto, perciò gli aperti di d e d' sono gli stessi, come voluto. \square

Corollario 1.2.12. d_1, d_2, d_∞ sono topologicamente equivalenti su \mathbb{R}^n .



Nell'immagine sono rappresentate, nell'ordine dalla più interna alla più esterna, le palle aperte centrate nell'origine e di raggio 1 rispettivamente nelle metriche d_1, d_2, d_∞ .

Dimostrazione. Per AM-QM si ha che

$$\frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n} \leq \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}},$$

da cui $d_1(x, y) \leq \sqrt{n} \cdot d_2(x, y)$. Stimando tutti i termini con il massimo otteniamo che

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \leq \sqrt{\sum_{i=1}^n \sup_{j=1, \dots, n} \{(x_j - y_j)^2\}} = \sqrt{n} \cdot \sup_{j=1, \dots, n} \{|x_j - y_j|\},$$

da cui $d_2(x, y) \leq \sqrt{n} \cdot d_\infty(x, y)$. Infine è ovvio che

$$\sup_{i=1, \dots, n} |x_i - y_i| \leq \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

, da cui $d_\infty(x, y) \leq d_1(x, y)$. Scegliendo $k = \sqrt{n}$ è ora sufficiente applicare il lemma. \square

Nella dimostrazione del corollario era importante che lo spazio fosse di dimensione finita. Nello spazio delle funzioni continue da $[0, 1]$ a \mathbb{R} le tre distanze non sono topologicamente equivalenti. Dimostriamo ad esempio che due di esse non lo sono.

Proposizione 1.2.13. Nello spazio delle funzioni continue da $[0, 1]$ in \mathbb{R} , d_1 e d_∞ non sono topologicamente equivalenti.

Dimostrazione. Se per assurdo fossero topologicamente equivalenti, l'identità da $C([0, 1])$ in sé sarebbe continua. Sia dunque f_0 la funzione costantemente nulla, consideriamo la palla $B_{d_\infty}(f_0, 1)$ (che equivale alle funzioni continue limitate in modulo da 1), se l'identità fosse continua potremmo trovare un $\delta > 0$ t.c. $B_{d_1}(f_0, \delta) \subseteq B_{d_\infty}(f_0, 1)$. Ma la funzione f definita come segue sta in $B_{d_1}(f_0, \delta)$ ma non in $B_{d_\infty}(f_0, 1)$. Sia dunque $f(x) = 0$ per $x = 0$ o $x \geq \delta/2$, $f(\delta/4) = 2$ e per il resto lineare a tratti. È un semplice esercizio verificare che fa quanto detto. \square

1.3 Spazi topologici

Definizione 1.3.1. Uno SPAZIO TOPOLOGICO è una coppia (X, τ) , $\tau \subseteq \mathcal{P}(X)$, t.c.

- (i) $\emptyset, X \in \tau$;
- (ii) $A_1, A_2 \in \tau \Rightarrow A_1 \cap A_2 \in \tau$;
- (iii) se I è un insieme e $A_i \in \tau \forall i \in I$, allora $\bigcup_{i \in I} A_i \in \tau$.

Allora τ si dice TOPOLOGIA di X e gli elementi della topologia sono detti APERTI di τ .

Proposizione 1.3.2. Se (X, d) è uno spazio metrico, gli aperti rispetto a d definiscono una topologia.

Definizione 1.3.3. Uno spazio topologico (X, τ) è detto METRIZZABILE se τ è indotta da una distanza su X .

Definizione 1.3.4. Sia (X, τ) uno spazio topologico, $C \subseteq X$ è CHIUSO se $X \setminus C$ è aperto.

Osservazione 1.3.5.

- (i) possono esistere insiemi né aperti né chiusi;
- (ii) \emptyset e X sono chiusi;
- (iii) unione finita di chiusi è chiusa;
- (iv) intersezione arbitraria di chiusi è chiusa.

Esempio 1.3.6. Ecco alcuni esempi di spazi topologici:

- (i) tutte le topologie indotte da una metrica;
- (ii) la topologia discreta, cioè $\tau = \mathcal{P}(X)$, indotta dalla distanza discreta;
- (iii) la topologia indiscreta, cioè $\tau = \{\emptyset, X\}$;
- (iv) la topologia cofinita, dove gli aperti sono l'insieme vuoto più tutti e soli gli insiemi il cui complementare è un insieme finito;
- (v) la topologia della semicontinuità (inferiore) su \mathbb{R} , $\tau = \{\emptyset, \mathbb{R}\} \cup \{\mathcal{O}_y | y \in \mathbb{R}\}$ dove $\mathcal{O}_y = \{x \in \mathbb{R} | x > y\}$.

Definizione 1.3.7. Dato uno spazio topologico X e un insieme $B \subseteq X$, si chiama *parte interna* di B , e la si indica con B° , il più grande aperto contenuto in B . Analogamente, la *chiusura* di B , indicata con \overline{B} , è il più piccolo chiuso che contiene B . Definiamo infine la *frontiera* (o *bordo*) di un insieme come l'insieme $\partial B = \overline{B} \setminus B^\circ$.

Notiamo che parte interna e chiusura sono ben definite: per la prima basta prendere l'unione di tutti gli aperti contenuti in B (alla peggio c'è solo il vuoto, che è contenuto in ogni insieme), per la seconda si prende l'intersezione di tutti i chiusi che lo contengono (alla peggio c'è solo X). Per la stabilità degli aperti per unione arbitraria e dei chiusi per intersezione arbitraria, gli insiemi così ottenuti sono ancora un aperto e un chiuso e sono rispettivamente il più grande aperto contenuto e il più piccolo chiuso che contiene per come sono stati costruiti. Infine, è banale mostrare che la parte interna di un aperto è l'aperto stesso e la chiusura di un chiuso è il chiuso stesso.

Fatto 1.3.8. $X = B^\circ \sqcup \partial B \sqcup (X \setminus B)^\circ$ dove con \sqcup si indica l'unione disgiunta.

Dimostrazione. Per definizione $B^\circ \cup \partial B = \overline{B}$ e i due insiemi sono disgiunti. Inoltre, essendo \overline{B} il più piccolo chiuso che contiene B , il suo complementare dev'essere il più grande aperto disgiunto da B , cioè il più grande aperto contenuto in $X \setminus B$, che è la parte interna di quest'ultimo. La tesi segue facilmente. \square

Esercizio 1.3.9. Sono lasciati come semplice esercizio alcuni fatti su parte interna e chiusura:

- (i) $\overline{A \cup B} = \overline{A} \cup \overline{B}$, ma $\bigcup_{q \in \mathbb{Q}} \overline{\{q\}} = \mathbb{Q}$, $\overline{\bigcup_{q \in \mathbb{Q}} \{q\}} = \mathbb{R}$, quindi l'uguaglianza non vale in generale per unioni infinite;
- (ii) $\overline{A \cap B} \subseteq \overline{A} \cap \overline{B}$, ma prendendo $A = \mathbb{Q}$, $B = \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ otteniamo che può non valere l'uguaglianza;
- (iii) gli analoghi per la parte interna (attenzione: unione e intersezione si scambiano);
- (iv) $\left(\overline{A}^\circ\right)^\circ = \overline{A}^\circ$ e $\overline{\overline{A}^\circ} = \overline{A}^\circ$;
- (v) trovare un esempio di X spazio topologico e $A \subseteq X$ t.c.
 $A, \overline{A}, (\overline{A})^\circ, \overline{A}^\circ, A^\circ, \overline{A}^\circ, (\overline{A}^\circ)^\circ$ sono tutti diversi.

Vediamo adesso la caratterizzazione della chiusura in spazi metrici. Premettiamo una definizione.

Definizione 1.3.10. Siano (X, d) spazio metrico e $E \subseteq X$. Diremo che $x_0 \in X$ è *aderente* a E se per ogni $r > 0$ vale che $E \cap B(x_0, r) \neq \emptyset$.

Vale allora la seguente affermazione.

Proposizione 1.3.11. Dato E in uno spazio metrico, \overline{E} è l'insieme dei punti aderenti a E .

Dimostrazione. Sicuramente l'insieme dei punti aderenti contiene E , inoltre è un semplice esercizio verificare che è un insieme chiuso. Dobbiamo adesso dimostrare che è il più piccolo chiuso che contiene E . Sia dunque C un chiuso che contiene E , è ancora una volta un semplice esercizio verificare che il suo complementare è disgiunto dall'insieme dei punti aderenti, che è dunque contenuto in C e per minimalità della chiusura deve essere proprio \overline{E} . \square

1.4 Continuità in spazi topologici

Definizione 1.4.1. $f : (X, \tau) \rightarrow (Y, \tau')$ si dice CONTINUA se $f^{-1}(A) \in \tau, \forall A \in \tau'$, cioè una funzione è continua se la controimmagine di aperti è aperta.

Notiamo che per il teorema 1.2.8, le due definizioni di funzione continua sono equivalenti per uno spazio metrico se si considera la topologia indotta dalla metrica.

Teorema 1.4.2.

- (i) L'identità è una funzione continua;
- (ii) composizione di funzioni continue è una funzione continua.

Definizione 1.4.3. Una funzione $f : X \rightarrow Y$ si dice OMEOMORFISMO se f è continua e esiste una funzione $g : Y \rightarrow X$ continua tale che $f \circ g = Id_Y$ e $g \circ f = Id_X$. Cioè f è continua, bigettiva e con inversa continua.

Osservazione 1.4.4.

- (i) Composizione di omeomorfismi è un omeomorfismo; due spazi legati da un omeomorfismo si dicono OMEOMORFI e essere omeomorfi è una relazione di equivalenza;
- (ii) l'insieme degli omeomorfismi da (X, τ) in sé è un gruppo;
- (iii) se $f : X \rightarrow Y$ è continua e bigettiva non è detto che sia un omeomorfismo, cioè f^{-1} può non essere continua.



Esempio 1.4.5. Siano τ_E la topologia euclidea, τ_C la cofinita, τ_D la discreta e τ_I l'indiscreta. Le seguenti mappe sono dunque continue:

- $Id : (\mathbb{R}, \tau_D) \rightarrow (\mathbb{R}, \tau_E)$,
- $Id : (\mathbb{R}, \tau_E) \rightarrow (\mathbb{R}, \tau_C)$,

– $Id : (\mathbb{R}, \tau_C) \rightarrow (\mathbb{R}, \tau_I)$.

Nessuna delle inverse è però continua. Più in generale, $Id : (X, \tau) \rightarrow (X, \sigma)$ con $\sigma \subsetneq \tau$ è continua ma l'inversa no.

Esercizio 1.4.6. Il seguente esercizio è frutto di una domanda fatta da uno studente a lezione e potrebbe essere più difficile di altri esercizi del corso.



Trovare un esempio (o dimostrare che non esiste) di uno spazio topologico X e una funzione $f : (X, \tau) \rightarrow (X, \tau)$ continua e bigettiva con inversa non continua. Stando a quanto dice Frigerio, probabilmente tale funzione esiste, euristicamente perché non c'è un modo facile di dimostrare il contrario.

Soluzione La seguente soluzione è un esempio mostrato a lezione da Gandini. Vedi te a volte il caso.

Mettiamo su \mathbb{Z} la seguente topologia: $A \subseteq \mathbb{Z}$ è aperto se $A = \mathbb{Z}$ o $A \subseteq \mathbb{N}$. È semplice verificare che è una topologia. Allora la funzione $f : \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}$ t.c. $f(n) = n - 1$ è l'esempio cercato. Banalmente è bigettiva, è semplice verificare che è continua ma l'inversa no.

Introduciamo adesso un concetto che permetterà di caratterizzare la continuità in spazi topologici in modo analogo a quanto fatto per gli spazi metrici.

Definizione 1.4.7. Sia (X, τ) uno spazio topologico fissato e $x_0 \in X$. Un insieme $U \subseteq X$ è un INTORNO di x_0 se $x_0 \in U^\circ$, o equivalentemente se esiste V aperto con $x_0 \in V \subseteq U$. L'insieme degli intorni di x_0 si denota con $\mathcal{I}(x_0)$.

Definizione 1.4.8. $f : (X, \tau) \rightarrow (Y, \tau')$ è detta *continua in* x_0 se per ogni intorno U di $f(x_0)$ esiste un intorno V di x_0 t.c. $f(V) \subseteq U$.

Appare dunque intuitivo il seguente risultato.

Teorema 1.4.9. f è continua \Leftrightarrow è continua in ogni $x_0 \in X$.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Supponiamo f continua e $x_0 \in X$, sia inoltre U un intorno di $f(x_0)$. Per definizione di intorno esiste un aperto A con $f(x_0) \in A \subseteq U$, perciò $x_0 \in f^{-1}(A) \subseteq f^{-1}(U)$, ma poiché f è continua abbiamo che $f^{-1}(A)$ è ancora un aperto, perciò ponendo $V = f^{-1}(U)$ abbiamo che V è un intorno di x_0 t.c. $f(V) \subseteq U$, che è quello che volevamo.

(\Leftarrow) Supponiamo f continua in ogni punto di X e sia A un insieme aperto in Y . Per ogni $x \in f^{-1}(A)$, A è un intorno di $f(x)$. Ma dato che f è continua in ogni punto di X , esiste un intorno V_x di x t.c. $x \in V_x \subseteq f^{-1}(A)$. Per definizione di intorno, ciò significa che esiste un aperto A_x di X t.c. $x \in A_x \subseteq V_x \subseteq f^{-1}(A)$.

Dunque dev'essere $f^{-1}(A) = \bigcup_{x \in f^{-1}(A)} A_x$, quindi $f^{-1}(A)$ è un aperto in X per

ogni A aperto in Y , il che equivale a dire che f è continua. \square

1.5 Ordinamento fra topologie, basi e prebasi

Vogliamo mettere un ordinamento parziale sulle topologie di un certo insieme fissato.

Definizione 1.5.1. Dato un insieme X su cui sono definite le topologie τ e τ' , si dice che τ è MENO FINE di τ' se $\tau \subseteq \tau'$, cioè ogni aperto di τ è anche aperto di τ' . τ' si dice PIÙ FINE di τ .

Osservazione 1.5.2. Equivalentemente alla definizione sopra, si può dire che τ è meno fine di τ' se e solo se $Id : (X, \tau') \rightarrow (X, \tau)$ è continua.

Quando τ è meno fine di τ' scriveremo $\tau < \tau'$. Si noti che dalla definizione ogni topologia è meno fine di se stessa, cioè $\tau < \tau' \forall \tau$.

Esempio 1.5.3. $\tau_I < \tau_C < \tau_E < \tau_D$, $\tau_I < \tau < \tau_D \forall \tau$.

Lemma 1.5.4. Intersezione arbitraria di topologie su X è ancora una topologia su X .

Dimostrazione. Siano τ_i , $i \in I$ topologie su X . Verifichiamo che $\tau = \bigcap_{i \in I} \tau_i$ soddisfa gli assiomi di topologia.

- (i) $\emptyset, X \in \tau_i \forall i \in I \Rightarrow \emptyset, X \in \tau$.
- (ii) $A_1, A_2 \in \tau \Rightarrow A_1, A_2 \in \tau_i \forall i \in I \Rightarrow A_1 \cap A_2 \in \tau_i \forall i \in I \Rightarrow A_1 \cap A_2 \in \tau$.
- (iii) Siano $A_j, j \in J$ insiemi che stanno in τ .

$$A_j \in \tau \forall j \in J \Rightarrow A_j \in \tau_i \forall i \in I, j \in J \Rightarrow \bigcup_{j \in J} A_j \in \tau_i \forall i \in I \Rightarrow \bigcup_{j \in J} A_j \in \tau.$$

□

Corollario 1.5.5. Data una famiglia $\tau_i, i \in I$ di topologie su X , esiste la più fine tra le topologie meno fini di ogni τ_i : è $\bigcap_{i \in I} \tau_i$.

Corollario 1.5.6. Sia X un insieme, $S \subseteq \mathcal{P}(X)$, allora esiste la topologia meno fine tra quelle che contengono S . Tale topologia si dice *generata* da S e S si dice PREBASE della topologia. Se $\Omega = \{\tau \text{ topologia} \mid S \in \tau\}$ (che è non vuoto perché contiene almeno la topologia discreta), la topologia cercata è $\bigcap_{\tau \in \Omega} \tau$.

Definizione 1.5.7. sia (X, τ) uno spazio topologico fissato, una BASE di τ è un insieme $\mathcal{B} \subseteq \tau$ t.c. $\forall A \in \tau, \exists B_i \in \mathcal{B}, i \in I$ t.c. $A = \bigcup_{i \in I} B_i$. Ovvero \mathcal{B} è una base se ogni aperto di τ può essere scritto come unione qualunque di elementi di \mathcal{B} .

Esempio 1.5.8. Se X è uno spazio metrico, una base della topologia indotta sono le palle.

Definizione 1.5.9. (X, τ) si dice a *base numerabile* (o che soddisfa il SECONDO ASSIOMA DI NUMERABILITÀ) se ammette una base numerabile.

Proposizione 1.5.10. Sia X un insieme senza topologia, $\mathcal{B} \subseteq \mathcal{P}(X)$ è base di una topologia su $X \Leftrightarrow$ valgono le seguenti:

- (i) $X = \bigcup_{B \in \mathcal{B}} B$;
- (ii) $\forall A, A' \in \mathcal{B}, \exists B_i \in \mathcal{B}, i \in I$ t.c. $A \cap A' = \bigcup_{i \in I} B_i$. Cioè ogni intersezione di una coppia di elementi di \mathcal{B} può essere scritta come unione di elementi di \mathcal{B} .

Dimostrazione. (\Rightarrow) Ovviamente, se \mathcal{B} è la base di una topologia su X , l'insieme X deve essere unione di elementi di \mathcal{B} , inoltre tutti gli elementi di \mathcal{B} devono essere sottoinsiemi di X , da cui discende (i).

$A, A' \in \mathcal{B} \Rightarrow A, A' \in \tau \Rightarrow A \cap A' \in \tau$, per cui $A \cap A'$ deve poter essere esprimibile come unione di elementi di \mathcal{B} , che è l'affermazione (ii).

(\Leftarrow) Dobbiamo mostrare che l'insieme τ di tutte le possibili unioni di elementi di \mathcal{B} soddisfa gli assiomi di topologia.

Chiaramente $\emptyset \in \tau$ come unione di un insieme vuoto di elementi di \mathcal{B} e $X \in \tau$ per (i). Se faccio l'unione arbitraria di insiemi ottenuti come unione di elementi di \mathcal{B} ottengo ovviamente un insieme che è unione di elementi di \mathcal{B} .

Infine, $A, A' \in \tau \Rightarrow A = \bigcup_{i \in I} B_i, A' = \bigcup_{j \in J} B_j$ con $B_i, B_j \in \mathcal{B} \forall i \in I, j \in J$.

Allora $A \cap A' = \left(\bigcup_{i \in I} B_i \right) \cap \left(\bigcup_{j \in J} B_j \right) = \bigcup_{i \in I, j \in J} (B_i \cap B_j)$, ma tutti i B_i e B_j

stanno in \mathcal{B} , dunque per (ii) tutti i $B_i \cap B_j$ sono rappresentabili come unione di elementi di \mathcal{B} , perciò anche la loro unione, che è proprio $A \cap A'$, può essere scritta in quel modo e quindi sta in τ . \square

Proposizione 1.5.11. Siano X un insieme e $S \subseteq \mathcal{P}(X)$ la prebase di una topologia τ su X . Allora:

- (i) le intersezioni finite di elementi di $S \cup \{X\}$ sono una base di τ ;
- (ii) $A \in \tau \Leftrightarrow A$ è unione arbitraria di intersezioni finite di elementi di $S \cup \{X\}$.

Dimostrazione. Sicuramente, poiché τ è generata da S , $S \subseteq \tau$ e quindi anche tutte le intersezioni finite di elementi di S e le unioni arbitrarie di tali intersezioni devono stare in τ . Se mostriamo che sono sufficienti a definire una topologia, abbiamo finito.

Chiaramente il vuoto è l'intersezione di un insieme vuoto di insiemi e X c'è perché lo abbiamo aggiunto a mano.

Unione arbitraria di unioni arbitrarie di elementi di un insieme è ancora unione arbitraria di elementi di tale insieme.

Siano ora $A_1 = \bigcup_{i \in I} B_i$, $A_2 = \bigcup_{j \in J} B_j$ con tutti i B_i , B_j intersezioni finite di elementi di S . Allora

$$A_1 \cap A_2 = \left(\bigcup_{i \in I} B_i \right) \cap \left(\bigcup_{j \in J} B_j \right) = \bigcup_{i \in I, j \in J} (B_i \cap B_j),$$

ma intersezione di due intersezioni finite di elementi di S è ancora un'intersezione finita di elementi di S , perciò $A_1 \cap A_2$ è ancora un'unione di intersezioni finite di elementi di S . Questo basta per dimostrare (i) e (ii) è una semplice riformulazione. \square

Proposizione 1.5.12. Sia $f : (X, \tau) \rightarrow (Y, \tau')$ e S , \mathcal{B} rispettivamente una prebase e una base di τ' . Allora sono equivalenti:

- (i) f è continua;
- (ii) $f^{-1}(A)$ è aperto per ogni $A \in S$;
- (iii) $f^{-1}(A)$ è aperto per ogni $A \in \mathcal{B}$.

Dimostrazione. Poiché ogni base è una prebase, $((i) \Leftrightarrow (ii)) \Rightarrow ((i) \Leftrightarrow (iii))$.

$(i) \Rightarrow (ii)$ è ovvia, perciò resta da dimostrare $(ii) \Rightarrow (i)$.

Sia A un aperto di τ' . Per la proposizione 1.5, A si può scrivere come unione di intersezioni finite di elementi di S . Poiché la controimmagine di un'unione è l'unione delle controimmagini e la controimmagine di un'intersezione è l'intersezione delle controimmagini, la controimmagine di A è unione di intersezioni finite di controimmagini di elementi di S , ma queste controimmagini sono aperte, perciò un'unione di loro intersezioni finite è ancora aperta, perciò $f^{-1}(A)$ è aperto in X per ogni A aperto in Y , e questo equivale a dire che f è continua. \square

1.6 Assiomi di numerabilità

Nella definizione 1.5.9 abbiamo stabilito quando uno spazio topologico soddisfa il secondo assioma di numerabilità. Vediamo gli altri due.

Definizione 1.6.1. $Y \subseteq X$ si dice **DENSO** se $\overline{Y} = X$.

Osservazione 1.6.2. Y è denso $\Leftrightarrow Y \cap A \neq \emptyset$ per ogni A aperto non vuoto.

Definizione 1.6.3. X si dice **SEPARABILE** (o che soddisfa il **TERZO ASSIOMA DI NUMERABILITÀ**) se ammette un sottoinsieme denso numerabile.

Proposizione 1.6.4. Se X è a base numerabile, X è separabile.

Dimostrazione. Sia $\{B_i, i \in \mathbb{N}\}$ la base numerabile di X e scegliamo per ogni $i \in \mathbb{N}$ un elemento $x_i \in B_i$. Vogliamo mostrare che $\{x_i, i \in \mathbb{N}\}$ è un sottoinsieme denso numerabile di X .

Ovviamente è numerabile. Per dimostrare che è denso, mostriamo che interseca ogni aperto non vuoto.

Sia dunque A un aperto non vuoto di X , allora, dato che i B_i formano una base, A è esprimibile come unione di alcuni di essi, in particolare esiste i_0 t.c. $B_{i_0} \subseteq A$ e perciò $x_{i_0} \in B_{i_0} \Rightarrow x_{i_0} \in A$, dunque l'intersezione tra il nostro insieme e un aperto non vuoto non è mai vuota, come voluto. \square

Proposizione 1.6.5. Se (X, τ) è metrizzabile, X è separabile \Leftrightarrow è a base numerabile.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Mostriamo che per ogni aperto A e per ogni $x \in A$, esiste una palla di centro un elemento del sottoinsieme denso numerabile e raggio un razionale positivo tutta contenuta in A . Allora tali palle formano una base numerabile.

Sicuramente esiste una palla di centro x e raggio $R \in \mathbb{R}^+$ tutta contenuta in A . Consideriamo la palla di centro x e raggio $R/3$, che è contenuta nella prima. Questa palla è in particolare un insieme aperto, dunque ha un elemento y in comune con il sottoinsieme denso numerabile. Scegliendo un razionale $R/3 < r < 2 \cdot R/3$ si ottiene che la palla di centro y e raggio r è tutta contenuta nella palla di centro x e raggio R , dunque è tutta contenuta in A , e contiene x , come voluto.

L'altra freccia discende dalla proposizione 1.6.4. \square

Definizione 1.6.6. Un SISTEMA FONDAMENTALE DI INTORNI per x_0 è una famiglia $\mathcal{F} \subseteq \mathcal{I}(x_0)$ t.c. $\forall U \in \mathcal{I}(x_0) \exists V \in \mathcal{F}$ con $V \subseteq U$.

Esempio 1.6.7. Se X è uno spazio metrico, le palle centrate in x_0 di raggio $1/n$ al variare di n intero positivo sono un sistema fondamentale di intorni. In particolare, sono un sistema fondamentale di intorni numerabile.

Definizione 1.6.8. X soddisfa il PRIMO ASSIOMA DI NUMERABILITÀ se ogni $x_0 \in X$ ha un sistema fondamentale di intorni numerabile.

Fatto 1.6.9. Se X è metrizzabile X soddisfa il primo assioma di numerabilità. Ciò discende direttamente dall'esempio 1.6.7.

Proposizione 1.6.10. Il secondo assioma di numerabilità implica il primo e il terzo assioma di numerabilità. Discende dalla proposizione 1.6.5 che in spazi metrici vale anche che il terzo assioma di numerabilità implica il secondo assioma di numerabilità.

Dimostrazione. Supponiamo che X soddisfi il secondo assioma di numerabilità. Per la proposizione 1.6.4 otteniamo subito che soddisfa il terzo. Vogliamo adesso mostrare che soddisfa anche il primo. Sia \mathcal{B} una base numerabile. Dato $x \in X$, consideriamo l'insieme $\{B \in \mathcal{B} \mid x \in B\}$. Essendo un sottoinsieme di \mathcal{B} è sicuramente numerabile e contiene solo insiemi aperti, cioè intorni di x . Mostriamo che è un sistema fondamentale di intorni per x .

Consideriamo un intorno U di x . Questo ha un sottoinsieme aperto $V \subseteq U$ contenente x , dunque V è esprimibile come unione di elementi di \mathcal{B} e ce ne dev'essere uno che contiene x , che sta quindi nel nostro insieme ed è contenuto in V e quindi in U . Dunque, per ogni intorno U di x troviamo un elemento del nostro insieme di intorni di x contenuto in U , che è quello che dovevamo dimostrare. \square

Proposizione 1.6.11.

- (i) $A \subseteq X$ è aperto se e solo se è intorno di ogni suo punto;
- (ii) sia $C \subseteq X$ un insieme generico, allora $x \in \overline{C}$ se e solo se ogni intorno di x interseca C .

Dimostrazione. (i) Sia A un insieme che è intorno di ogni suo punto, cioè per ogni $x \in A$ esiste un aperto $V_x \subseteq A$ che lo contiene. Allora vale che $A = \bigcup_{x \in A} V_x$. Poiché A è unione di aperti è aperto.

Viceversa sia A aperto. Allora ogni suo punto è interno ad esso.

- (ii) Si ha che \overline{C} è il complementare di $(X \setminus C)^\circ$. Dunque x appartiene a \overline{C} se e solo se non è interno a $X \setminus C$, cioè se e solo se ogni suo intorno U non è tutto contenuto nel complementare di C . Questo accade quando ogni intorno di x interseca C in almeno un punto.

\square

Esempio 1.6.12. La retta di Sorgenfrey. Su $X = \mathbb{R}$ consideriamo il seguente insieme:

$$\mathcal{B} = \{[a, b) \mid a < b\}.$$

Allora valgono le seguenti:

- (i) \mathcal{B} è base di una topologia τ ;
- (ii) τ è più fine della topologia euclidea;
- (iii) τ è separabile;
- (iv) τ non è a base numerabile;
- (v) τ non è metrizzabile;
- (vi) τ è primo numerabile.

Dimostrazione. (i) Verifichiamo utilizzando la proposizione 1.5.10. Il primo punto vale in quanto \mathbb{R} è coperto da intervalli del tipo $[-n, n)$ con n naturale. Inoltre dati i due intervalli $[a, b)$ e $[c, d)$, distinguo:

- $b \leq c$. Allora l'intersezione è vuota.
- $c < b$ e $b \leq d$. Allora l'intersezione è $[c, b)$.
- $c < b$ e $b > d$. Allora l'intersezione è $[c, d)$.

In ogni caso vale anche il secondo punto.

- (ii) Voglio mostrare che ogni aperto di τ è anche aperto di τ_E . Sia allora (a, b) un aperto della base degli intervalli aperti della topologia euclidea. Si considerino gli aperti in τ della forma $[a + \frac{1}{n}, b)$ con n naturale positivo. L'unione di tutti questi è allora (a, b) .
- (iii) Si noti che \mathbb{Q} è un denso numerabile.
- (iv) Sia \mathcal{D} una base di τ . Si noti che ogni intervallo del tipo $[x, x + 1)$, con x reale, può essere scritto come unione degli elementi della base solo se in \mathcal{D} c'è un elemento D tale che $x \in D \subseteq [x, x + 1)$, da cui $\inf(D) = x$. Allora la mappa

$$\begin{aligned}\phi : \mathcal{D} &\rightarrow \mathbb{R} \\ D &\mapsto \inf(D)\end{aligned}$$

deve essere surgettiva. Dunque la base scelta non può essere numerabile.

- (v) Semplice conseguenza dei punti precedenti e della proposizione 1.6.5.
- (vi) Basta notare che per ogni $x \in \mathbb{R}$ l'insieme $\{[x - 1/n, x + 1/n) | n \in \mathbb{Z}^+\}$ è una famiglia di intorno numerabile per x .

□

Esempio 1.6.13. Topologia di Zariski. Sia \mathbb{K} un campo. Definiamo una topologia τ_Z in \mathbb{K}^n in cui i chiusi sono tutti e soli gli insiemi i cui elementi si annullano in tutti i polinomi di una famiglia arbitraria (non vuota) $\mathcal{F} \subseteq \mathbb{K}[x_1, \dots, x_n]$ di polinomi a n variabili con coefficienti in \mathbb{K} . Dimostreremo che τ_Z è effettivamente una topologia, che è meno fine di quella euclidea quando $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Inoltre, quando $n = 1$ e per \mathbb{K} generico, τ_Z coincide con la topologia cofinita.

Dimostrazione. Dimostreremo che i chiusi soddisfano le proprietà di topologia (per i chiusi, ovviamente), per passaggio al complementare si può concludere che τ_Z è una topologia.

Ovviamente il vuoto è chiuso perché la proprietà dei suoi elementi di annullarsi in un qualunque insieme di polinomi è sempre vera a vuoto, mentre \mathbb{K}^n è chiuso perché tutti gli elementi si annullano nella famiglia formata dal solo polinomio nullo.

Siano ora C_1, C_2 due chiusi i cui elementi si annullano, per definizione, nei polinomi rispettivamente delle famiglie $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2$. Consideriamo la famiglia $\mathcal{F}_{1,2} = \{f_1 \cdot f_2 | f_1 \in \mathcal{F}_1, f_2 \in \mathcal{F}_2\}$. Mostriamo che l'insieme dei punti che si annullano nei polinomi di $\mathcal{F}_{1,2}$ è proprio $C_1 \cup C_2$. Ovviamente se $x \in C_1 \cup C_2$ possiamo dire senza perdita di generalità che x si annulla in tutti i polinomi in \mathcal{F}_1 , e quindi banalmente anche in tutti i polinomi di $\mathcal{F}_{1,2}$. D'altro canto, se x si annulla in tutti i polinomi di $\mathcal{F}_{1,2}$, si deve annullare almeno o in tutti i polinomi di

\mathcal{F}_1 o in tutti i polinomi di \mathcal{F}_2 . Se per assurdo così non fosse, esisterebbero $f_1 \in \mathcal{F}_1, f_2 \in \mathcal{F}_2$ t.c. $f_1(x) \neq 0 \neq f_2(x)$ e, poiché siamo in un campo, si avrebbe $f_1(x) \cdot f_2(x) = 0$, assurdo. Dunque $x \in C_1 \cup C_2$.

Consideriamo adesso dei chiusi $C_i, i \in I$ definiti dalle famiglie \mathcal{F}_i . Mostriamo che $C = \bigcap_{i \in I} C_i$ è l'insieme dei punti che si annullano nei polinomi di $\mathcal{F}_I = \bigcup_{i \in I} \mathcal{F}_i$.

Se $x \in C$ allora $x \in C_i \forall i \in I$ e dunque si annulla in tutti i polinomi di \mathcal{F}_i per ogni i , quindi si annulla in tutti i polinomi della loro unione, che è proprio \mathcal{F}_I . Viceversa, se x si annulla in tutti i polinomi di \mathcal{F}_I allora si annulla in tutti i polinomi di ogni suo sottoinsieme, in particolare in tutti i polinomi di $\mathcal{F}_i \forall i \in I$, quindi $x \in C_i$ per ogni i da cui $x \in C$.

Poniamo ora $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. Poiché i polinomi in $\mathbb{R}[x_1, \dots, x_n]$ sono funzioni continue per la topologia euclidea, la controimmagine di un aperto è a sua volta un aperto. Per passaggio al complementare la controimmagine di un chiuso è a sua volta un chiuso. Ma allora, sia \mathcal{F} una famiglia di polinomi, ho che, essendo $\{0\}$ chiuso in τ_E di \mathbb{R} , $f^{-1}(0)$ (qui si intende la controimmagine) è chiuso in τ_E di \mathbb{R}^n per ogni $f \in \mathcal{F}$. Ma l'insieme dei punti che si annullano in tutti i polinomi di \mathcal{F} può essere descritto come $\bigcap_{f \in \mathcal{F}} f^{-1}(0)$, che essendo intersezione di chiusi

è chiuso in τ_E , quindi tutti i chiusi di τ_Z sono chiusi in τ_E , per passaggio al complementare la stessa cosa con gli aperti e dunque $\tau_Z < \tau_E$.

Sia adesso \mathbb{K} generico e $n = 1$. Sia p un generico polinomio in $\mathbb{R}[x]$ e $\overline{\mathbb{K}}$ la chiusura algebrica di \mathbb{K} . Per il teorema fondamentale dell'algebra, p ha al più $\deg p$ zeri in $\overline{\mathbb{K}}$, quindi a maggior ragione ne ha al più un numero finito in \mathbb{K} . Dunque i punti che si annullano in tutti i polinomi di una generica famiglia di polinomi sono finiti (limitati dal grado di un qualsiasi polinomio della famiglia), dunque i chiusi sono tutti finiti. Considerando invece un insieme finito $\{x_1, \dots, x_m\} \subseteq \mathbb{K}$, esso si annulla in tutti i polinomi dell'ideale generato da $(x - x_1) \cdot \dots \cdot (x - x_m)$, dunque è vero anche il viceversa, cioè che tutti i finiti sono chiusi, quindi in questo caso τ_Z coincide con la topologia euclidea. \square

Fatto 1.6.14. Se X non è numerabile, la topologia cofinita su X soddisfa solo il terzo assioma di numerabilità.

Dimostrazione. Per la proposizione 1.6.10, se dimostriamo che non soddisfa il primo otteniamo anche che non soddisfa il secondo. Sia dunque per assurdo $x_0 \in X$ e \mathcal{F} un suo sistema fondamentale di intorni numerabile. Notiamo che per ogni $x \in X, x \neq x_0$ l'insieme $X \setminus \{x\}$ è un aperto, dunque esiste un intorno di x_0 tutto contenuto in esso, cioè che non contiene x . Notiamo, per come è definita la topologia cofinita, che gli intorni, essendo sovrainsiemi di insiemi aperti, sono a loro volta aperti, cioè il loro complementare è finito. Ma dato che per ogni $x \in X \setminus \{x_0\}$ esiste un intorno di x_0 che non contiene x , posso scrivere $X \setminus \{x_0\}$, che è ancora un insieme numerabile, come l'unione dei complementari degli insiemi in \mathcal{F} , cioè un'unione numerabile di insiemi finiti, che è numerabile, da cui l'assurdo.

Per dire che soddisfa il terzo assioma, osserviamo che qualunque sottoinsieme infinito di X deve necessariamente intersecare in qualche punto il complementare di un insieme finito, e quindi, se consideriamo un qualunque insieme infinito di cardinalità numerabile, esso ha intersezione non nulla con tutti gli aperti ed è di conseguenza un denso numerabile. \square

Procediamo adesso a caratterizzare, negli insiemi che soddisfano il primo assioma di numerabilità, aperti, chiusi e continuità tramite successioni. Diamo prima una definizione.

Definizione 1.6.15. $l \in X$ è detto *limite* della successione $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ se per ogni intorno U di l esiste $n_0 \in \mathbb{N}$ t.c. per ogni $n \geq n_0$ si ha che $a_n \in U$.

Passiamo dunque alle varie caratterizzazioni. Nei tre enunciati seguenti, X sarà sempre uno spazio topologico primo numerabile.

Proposizione 1.6.16. Un sottoinsieme $A \subseteq X$ è aperto \Leftrightarrow è aperto per successioni (si dice aperto per successioni?), cioè se per ogni successione (a_k) di elementi di x che converge a un limite $l \in A$ esiste k_0 t.c. per ogni $k \geq k_0$ si ha $a_k \in A$.

Dimostrazione. Notiamo prima il seguente fatto: se $U_k, n \in \mathbb{N}$ è un sistema fondamentale di intorni numerabile per x , definiamo $V_k = U_0 \cap U_1 \cap \dots \cap U_k$. Allora $V_k, k \in \mathbb{N}$ è un sistema fondamentale di intorni numerabile tale che $V_{k+1} \subseteq V_k$.

(\Rightarrow) Sia A un aperto e (a_k) una successione avente limite $l \in A$. Poiché A stesso è un intorno di l , si conclude che esiste k_0 t.c. $a_k \in A$ per ogni $k \geq k_0$ dalla definizione di limite.

(\Leftarrow) Sia A un insieme aperto per successioni e prendiamo $x \in A$. Vogliamo mostrare che esiste un intorno U_x di x tutto contenuto in A . Se per assurdo così non fosse, allora ogni intorno di x avrebbe un elemento non contenuto in A . Consideriamo adesso un sistema fondamentale di intorni numerabile $V_k, k \in \mathbb{N}$, e lo prendiamo t.c. $V_{k+1} \subseteq V_k$. Per ciascuno di questi intorni, prendiamo un elemento $a_k \in V_k$ t.c. $a_k \notin A$, che esiste per ipotesi assurda (alcuni elementi possono anche ripetersi, non ha importanza). Allora avremmo, dato che il sistema di intorni è fondamentale e che $V_{k'} \subseteq V_k$ se $k' > k$ (segue da $V_{k+1} \subseteq V_k$), che la successione (a_k) sta definitivamente in ogni intorno di x e dunque ha limite x , ma è tutta fuori da A , assurdo perché A è aperto per successioni. Allora per ogni $x \in A$ esiste un intorno U_x t.c. $U_x \subseteq A$, ma questo ci dice anche che per ogni $x \in A$ esiste un aperto A_x t.c. $x \in A_x \subseteq U_x \subseteq A$, da cui otteniamo che $A = \bigcup_{x \in A} A_x$ è un'unione di aperti e dunque è aperto. \square

Proposizione 1.6.17. Un sottoinsieme $C \subseteq X$ è chiuso \Leftrightarrow è chiuso per successioni, cioè per ogni successione (a_k) di elementi di C che converge a un limite l , anche $l \in C$.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Supponiamo C chiuso e sia (a_k) una successione di elementi di C con limite l . Per assurdo, $l \notin C$. Allora $l \in X \setminus C$, che è un insieme aperto, in particolare $X \setminus C$ è un intorno di l . Esiste dunque, per definizione di limite, un $k_0 \in \mathbb{N}$ t.c. per ogni $k \geq k_0$ si abbia che $a_k \in X \setminus C$, ma $a_k \in C$ per ogni $k \in \mathbb{N}$, assurdo. Questa freccia vale in tutti gli spazi topologici.

(\Leftarrow) Supponiamo adesso che per ogni successione (a_k) di elementi di C avente limite l si abbia $l \in C$. Consideriamo un elemento $x \in X \setminus C$. Vogliamo mostrare che esiste un intorno U_x di x tutto contenuto in $X \setminus C$. Se così non fosse, per ogni intorno di x esisterebbe un elemento di C in esso contenuto. Poiché X è primo numerabile, consideriamo dunque un sistema fondamentale di intorni numerabile di x , sia esso V_k , $k \in \mathbb{N}$, e come nella dimostrazione precedente lo prendiamo t.c. $V_{k+1} \subseteq V_k$. Adesso scegliamo per ogni k un elemento $a_k \in V_k$ t.c. $a_k \in C$, che esiste per l'ipotesi assurda. Notiamo che alcuni di questi elementi possono essere uguali, non ha importanza. Dato che abbiamo preso un sistema di intorni fondamentale, per ogni intorno U di x esiste un k_0 t.c. $V_{k_0} \subseteq U$. Ma poiché $V_k \subseteq V_{k_0}$ per ogni $k \geq k_0$ (facile conseguenza di $V_{k+1} \subseteq V_k$), ho che $a_k \in V_k \subseteq V_{k_0} \subseteq U$ per ogni $k \geq k_0$. Riassumendo, per ogni U intorno di x esiste un k_0 t.c. per ogni $k \geq k_0$ si ha $a_k \in U$, ma questo per definizione significa che x è il limite di (a_k) , assurdo poiché $a_k \in C$ per ogni k mentre $x \in X \setminus C$, contro l'ipotesi iniziale che per tutte le successioni in C aventi limite anche il limite è in C . Dunque per ogni $x \in X \setminus C$ esiste un intorno $U_x \subseteq X \setminus C$, da cui si ha che esiste un aperto A_x con $x \in A_x \subseteq U_x \subseteq X \setminus C$. Ma allora, $X \setminus C = \bigcup_{x \in X \setminus C} A_x$

che un'unione di aperti, perciò $X \setminus C$ è aperto e di conseguenza C è chiuso. \square

Proposizione 1.6.18. Sia Y uno spazio topologico (che non deve necessariamente soddisfare il primo assioma di numerabilità). Una funzione $f : X \rightarrow Y$ è continua in $\bar{x} \Leftrightarrow$ per ogni successione $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ convergente a \bar{x} la successione $(f(x_n))_{n \in \mathbb{N}}$ converge a $f(\bar{x})$.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Supponiamo che f sia continua in \bar{x} e consideriamo una generica successione (x_n) convergente a \bar{x} . Prendiamo un intorno U di $f(\bar{x})$ in Y . Dato che f è continua in \bar{x} , esiste un intorno V di \bar{x} in X t.c. $f(V) \subseteq U$. Prendiamo, per ipotesi di convergenza, $n_0 \in \mathbb{N}$ t.c. $a_n \in V$ per ogni $n \geq n_0$. Allora si ha anche, sempre per ogni $n \geq n_0$, $f(x_n) \in U$, da cui otteniamo che $(f(x_n))$ converge a $f(\bar{x})$. Questa freccia vale per X spazio topologico qualsiasi.

(\Leftarrow) Supponiamo adesso che per ogni successione convergente in X la successione immagine converga all'immagine del limite in Y . Per assurdo, f non è continua in \bar{x} . Allora deve esistere un intorno U di $f(\bar{x})$ t.c. per ogni intorno V di \bar{x} si ha $f(V) \not\subseteq U$. Prendiamo un sistema fondamentale di intorni numerabile di \bar{x} , sia esso V_n , $n \in \mathbb{N}$, e come nella dimostrazione precedente lo prendiamo t.c. $V_{n+1} \subseteq V_n$ per ogni n .

Prendiamo, per ogni n , un elemento $x_n \in V_n$ t.c. $f(x_n) \notin U$, che esiste per l'ipotesi assurda. Allora si mostra, come nella dimostrazione precedente, che

la successione (x_n) tende a \bar{x} , ma le loro immagini $f(x_n)$ sono tutte fuori dallo stesso intorno U di $f(\bar{x})$, dunque la successione $(f(x_n))$ non tende a $f(\bar{x})$, assurdo per ipotesi. \square

1.7 Sottospazi topologici

Definizione 1.7.1. Sia (X, τ) uno spazio topologico, $Y \subseteq X$ un sottoinsieme, cioè esiste una mappa iniettiva $i : Y \hookrightarrow X$ di inclusione. La topologia ristretta su Y da τ è la topologia meno fine che rende i continua.

Osservazione 1.7.2. Per avere i continua, serve che per ogni U aperto di τ , si abbia $i^{-1}(U)$ aperto nella topologia ristretta $\tau|_Y$. Poiché $i^{-1}(U) = U \cap Y$, si ha in effetti che per ogni aperto U di τ , $U \cap Y \in \tau|_Y$.

Siccome $\sigma = \{U \cap Y \mid U \in \tau\}$ è una topologia su Y che rende continua i e $\sigma \subseteq \tau|_Y$, deve valere l'uguaglianza in quanto $\tau|_Y$ è la meno fine con tali proprietà.

Questo ci permette anche di caratterizzare gli aperti (rispettivamente chiusi) di Y come l'intersezione degli aperti (rispettivamente chiusi) di X con Y .

Esercizio 1.7.3. Siano $A \subseteq Y \subseteq X$, allora la chiusura di A in Y con la topologia di sottospazio è $\bar{A} \cap Y$, dove con \bar{A} s'intende la chiusura di A in X .

Osservazione 1.7.4. Vale anche che se \mathcal{B} è base per τ , allora

$$\mathcal{B}' = \{B \cap Y \mid B \in \mathcal{B}\}$$

è una base per $\tau|_Y$. La dimostrazione è analoga a quella fatta per le topologie.

Definizione 1.7.5. Sia (X, d) uno spazio metrico e $Y \subseteq X$ un sottoinsieme generico. La distanza d può essere ristretta a $Y \times Y$. In tal caso $d|_{Y \times Y}$, che verrà indicata anche come $d|_Y$ è una distanza su Y .

Proposizione 1.7.6. Nel setting della definizione precedente, siano τ la topologia indotta da d su X , $\tau|_Y$ la restrizione di τ a Y , e σ la topologia indotta da $d|_Y$ su Y . Allora $\tau|_Y = \sigma$.

Dimostrazione. Siano \mathcal{B} e \mathcal{D} rispettivamente basi per $\tau|_Y$ e σ . Cioè:

$$\begin{aligned} \mathcal{B} &= \{Y \cap \{x \in X \text{ t.c. } d(x, x_0) < r, \quad x_0 \in X, \quad r \in \mathbb{R}^+\}\} \\ &= \{y \in Y \text{ t.c. } d(y, x_0) < r, \quad x_0 \in X, \quad r \in \mathbb{R}^+\} \end{aligned}$$

$$\mathcal{D} = \{y \in Y \text{ t.c. } d(y, y_0) < r, \quad y_0 \in Y, \quad r \in \mathbb{R}^+\}$$

Chiaramente $\mathcal{D} \subseteq \mathcal{B}$, quindi anche $\sigma \subseteq \tau|_Y$.

Inoltre, poiché le palle sono aperte, preso un $B \in \mathcal{B}$, per ogni $y \in B \cap Y$ esiste un $r_y > 0$ tale che $D_y = B(y, r_y)$ sia contenuto in B . per cui si ha che

$$B = \bigcup_{y \in B \cap Y} D_y.$$

Ma ogni D_y è un elemento della base \mathcal{D} , quindi ogni aperto di $\tau|_Y$ è un aperto di σ , concludendo l'ultima inclusione. \square

Definizione 1.7.7. Siano (X, τ) spazio topologico, $Y \subseteq X$. Allora Y si dice discreto in X se $\tau|_Y = \mathcal{P}(Y)$, cioè la topologia ristretta a Y è quella discreta.

Osservazione 1.7.8. Se Y è discreto in X , allora per ogni $y \in Y$ esiste un aperto U di X tale che $U \cap Y = \{y\}$.

Teorema 1.7.9. Proprietà universale delle immersioni. Sia X spazio topologico e $Y \subseteq X$ con $i : Y \hookrightarrow X$ mappa di immersione. Allora per ogni spazio topologico Z e per ogni funzione $f : Z \rightarrow Y$, si ha che f è continua se e solo se $i \circ f$ è continua.

Dimostrazione. Poiché i è continua per la definizione della topologia su Y , e poiché la composizione di continue è continua, si ha che se f è continua, anche $i \circ f$ lo è.

Per l'altra implicazione, supponiamo $i \circ f$ continua e sia A un aperto di Y . Allora esiste U aperto di X tale che $U \cap Y = A$, e vale $i^{-1}(U) = A$. Allora $(i \circ f)^{-1}(U) = f^{-1}(i^{-1}(U)) = f^{-1}(A)$ è aperto in Z . \square

Teorema 1.7.10. Universalità della proprietà universale. La proprietà universale delle immersioni caratterizza in modo unico la topologia ristretta. Cioè dato (X, τ) spazio topologico con $Y \subseteq X$ e immersione $i : Y \hookrightarrow X$, $\tau|_Y$ è l'unica topologia su Y che rispetta la proprietà universale.

Dimostrazione. Sia σ una topologia su Y che rispetta la proprietà universale.

- (i) Prendo come Z lo spazio $(Y, \tau|_Y)$ e come f l'identità su Y . Il diagramma della proprietà universale è allora il seguente:

$$\begin{array}{ccc} (Y, \tau|_Y) & \xrightarrow{\text{id}} & (Y, \sigma) \\ & \searrow g=i & \downarrow i \\ & & (X, \tau) \end{array}$$

Per definizione g è continua, i è continua, quindi id è continua. Allora $\sigma \subseteq \tau|_Y$.

- (ii) Questa volta prendo come Z lo spazio (Y, σ) mantenendo come f l'identità. Il diagramma risulta essere:

$$\begin{array}{ccc}
(Y, \sigma) & \xrightarrow{\text{id}} & (Y, \sigma) \\
& \searrow g=i & \downarrow i \\
& & (X, \tau)
\end{array}$$

Per definizione id è continua, quindi lo è anche $g = i$ per la proprietà universale. Allora σ rende continua i , e dunque vale $\tau|_Y \subseteq \sigma$ per la definizione della restrizione di τ .

□

Definizione 1.7.11. Sia $f : X \rightarrow Y$ una funzione. Essa si dice APERTA se manda aperti in aperti e CHIUSA se manda chiusi in chiusi.

Osservazione 1.7.12. Sia f come sopra continua e bigettiva. Allora essa è un omeomorfismo se e solo se è aperta, e se solo se è chiusa.

Esempio 1.7.13. Si consideri l'insieme \mathbb{Z} con la topologia $\tau = \mathcal{P}(\mathbb{N}) \cup \mathbb{Z}$. Allora $f : n \mapsto n - 1$ è bigettiva, continua, non aperta e non omeomorfismo.

Definizione 1.7.14. Sia $f : X \hookrightarrow Y$ una funzione iniettiva continua. Allora f si dice IMMERSIONE TOPOLOGICA se per ogni $A \subseteq X$ aperto esiste un aperto $U \subseteq Y$ tale che $A = f^{-1}(U)$.

Osservazione 1.7.15. Sia $f : X \rightarrow Y$ continua. Allora f è chiusa e iniettiva se e solo se è un'immersione chiusa, se e solo se f è immersione con $f(X)$ chiuso. Idem con gli aperti.

Osservazione 1.7.16. Sia $Y \subseteq X$ un sottospazio. Allora:

- (i) se X è N1 allora Y è N1;
- (ii) idem con N2;
- (iii) se X è separabile e metrizzabile allora Y è separabile.

Dimostrazione. I primi punti sono ovvi. Per quanto riguarda l'ultimo, se X è metrizzabile e separabile, è N1. Dunque anche Y è metrizzabile e N1, e quindi anche separabile. □

Esempio 1.7.17. Il piano di Sorgenfrey. Si prenda lo spazio \mathbb{R}^2 dotato della topologia generata dai rettangoli del tipo $[a, b) \times [c, d)$. Esso è chiamato il piano di Sorgenfrey. Si consideri il sottospazio della retta $y = -x$. La topologia indotta è la discreta, infatti per ogni punto $(k, -k)$, il rettangolo $[k, k + 1) \times [-k, 1 - k)$ interseca la retta solo nel punto considerato. Dunque si è trovato uno spazio separabile (prendendo per esempio \mathbb{Q}^2 come denso numerabile) che ha un sottospazio non separabile.

2 Prodotti e quozienti topologici

2.1 Topologie prodotto

Definizione 2.1.1. Sia $\{X_\alpha\}_{\alpha \in A}$ una famiglia di spazi topologici. Allora il **PRODOTTO CARTESIANO** della famiglia è:

$$X := \prod_{\alpha \in A} X_\alpha = \{f : A \longrightarrow \bigcup_{\alpha \in A} X_\alpha \mid f(\alpha) \in X_\alpha, \forall \alpha \in A\}$$

Se $A = \{1, \dots, n\}$, allora:

$$\prod_{i=1}^n X_i = X_1 \times \dots \times X_n \ni (x_1, \dots, x_n) \quad x_i := f(i)$$

Definizione 2.1.2. La **TOPOLOGIA PRODOTTO** su $X = \prod_{\alpha \in A} X_\alpha$ è la topologia meno fine su X che rende continue tutte le proiezioni $p_\alpha : X \longrightarrow X_\alpha$.

Osservazione 2.1.3. X viene naturalmente con proiezioni:

$$p_\alpha : X \longrightarrow X_\alpha \quad f \longmapsto f(\alpha) \quad \forall \alpha \in A$$

Inoltre questa topologia è ben definita poiché l'intersezione di topologie è una topologia.

Proposizione 2.1.4. Una base per la topologia prodotto su X è data da:

$$\mathcal{B} = \left\{ \prod_{\alpha \in A} U_\alpha \mid U_\alpha \subset X_\alpha \text{ aperto}, U_\alpha = X_\alpha \text{ tranne al più un numero finito di } \alpha \right\}$$

Dimostrazione. Sia $U_\alpha \subset X_\alpha$ aperto. Allora:

$$p_\alpha^{-1}(U_\alpha) = \prod_{\beta \in A} V_\beta \quad \text{dove} \quad V_\beta = \begin{cases} U_\alpha & \text{se } \beta = \alpha \\ X_\beta & \text{se } \beta \neq \alpha \end{cases}$$

Dunque le proiezioni p_α sono continue se e solo se tutte le preimmagini di tale forma sono aperte nella topologia prodotto. Quindi:

$$p_\alpha^{-1}(U_\alpha) \subset X \text{ aperto} \quad \forall \text{ aperto } U_\alpha \subset X_\alpha$$

Siano $U_{\alpha_1} \subset X_{\alpha_1}, \dots, U_{\alpha_n} \subset X_{\alpha_n}$ aperti, con $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in A$. Allora:

$$X \supset \bigcap_{i=1}^n p_{\alpha_i}^{-1}(U_{\alpha_i}) = \prod_{\alpha \in A} V_\alpha \quad \text{dove} \quad V_\alpha = \begin{cases} U_{\alpha_i} & \text{se } \alpha = \alpha_i \\ X_\alpha & \text{se } \alpha \neq \alpha_i \end{cases}$$

Dunque ogni elemento di \mathcal{B} è aperto nella topologia prodotto su X (infatti l'intersezione di aperti è un aperto). Se \mathcal{B} è base di una topologia abbiamo finito, in quanto per definizione la topologia prodotto è la meno fine che rende continue tutte le p_α . Altrimenti:

$$\left(\prod_{\alpha \in A} U_\alpha\right) \cap \left(\prod_{\alpha \in A} V_\alpha\right) = \prod_{\alpha \in A} (U_\alpha \cap V_\alpha)$$

Dunque le intersezioni di elementi di \mathcal{B} sono ancora in \mathcal{B} , che quindi è chiuso rispetto alle intersezioni finite, e perciò è una base. \square

Osservazione 2.1.5. Supponiamo \mathcal{B}_α base della topologia di X_α . Definiamo:

$$\mathcal{B}' = \left\{ \prod_{\alpha \in A} B_\alpha \mid B_\alpha \in \mathcal{B}_\alpha, B_\alpha = X_\alpha \text{ tranne al più un numero finito di } \alpha \right\}$$

Allora \mathcal{B}' è una base per la topologia prodotto in X .

Corollario 2.1.6. Supponiamo A numerabile e \mathcal{B}_α base numerabile per X_α per ogni α . Allora \mathcal{B}' è una base numerabile per X .

Dimostrazione. Per esercizio. \square

Corollario 2.1.7. (analogo al precedente) Supponiamo A numerabile e che tutti gli X_α siano primo-numerabili. Allora la topologia prodotto è primo-numerabile.

Osservazione 2.1.8. In generale, se A non è numerabile i due corollari sono falsi.

Esempio 2.1.9. Prendiamo \mathbb{R} con la topologia euclidea, e consideriamo:

$$\mathbb{R}^n = \underbrace{\mathbb{R} \times \cdots \times \mathbb{R}}_{n \text{ volte}}$$

Esso eredita una topologia prodotto che coincide con la topologia euclidea su \mathbb{R}^n . In particolare, la topologia euclidea ha per base le palle aperte. La topologia prodotto ha per base i parallelepipedi retti aperti:

$$(a_1, b_1) \times \cdots \times (a_n, b_n)$$

In effetti tali parallelepipedi sono aperti nella topologia euclidea (e viceversa).

2.2 Proprietà delle topologie prodotto

Proposizione 2.2.1. $p_\alpha : X \longrightarrow X_\alpha$ è un'applicazione aperta $\forall \alpha \in A$ (sempre prendendo $X = \prod_{\alpha \in A} X_\alpha$).

Dimostrazione. Sia \mathcal{B} la base di X , allora p_α è aperta se e solo se $p_\alpha(B)$ aperto $\forall B \in \mathcal{B}$. Supponiamo $B = \prod_{\alpha \in A} U_\alpha$ con $U_\alpha \subset X_\alpha$ aperto. Allora $p_\alpha(B) = U_\alpha$ è aperto per definizione. \square

Osservazione 2.2.2. Le proiezioni p_α in generale non sono chiuse.

Esempio 2.2.3. Prendiamo $p_1 : \mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \longrightarrow \mathbb{R}$ e sia Z l'iperbole equilatera, ovvero $Z = \{xy \mid xy = 1\}$. Allora Z è chiuso in quanto $Z = p^{-1}(0)$ con $p = xy - 1$, p continua e $0 \in \mathbb{R}$ è chiuso. Invece, $p_1(\{xy \mid xy = 1\}) = \mathbb{R} \setminus \{0\}$ non è chiuso perché $\{0\}$ non è aperto.

Proposizione 2.2.4. Dato $\alpha \in A$ fissiamo $x_\beta \in X_\beta \forall \beta \neq \alpha$, e definiamo $X \supset X(\alpha) = \{f \in X \mid f(\beta) = x_\beta\}$. Allora la restrizione:

$$p_\alpha|_{X(\alpha)} : X(\alpha) \longrightarrow X_\alpha$$

è un omeomorfismo.

Dimostrazione. (i) $p_\alpha|_{X(\alpha)}$ è continua perché è restrizione di p_α , che è continua.

(ii) $p_\alpha|_{X(\alpha)}$ è bigettiva.

(iii) $p_\alpha|_{X(\alpha)}$ è aperta: gli aperti di $X(\alpha)$ sono:

$$\prod_{\beta \in A} U_\beta \cap X(\alpha)$$

dove

$$\prod_{\beta \in A} U_\beta = U := \{f \in X(\alpha) \mid f(\alpha) \in U_\alpha\}$$

D'altra parte $p_\alpha|_{X(\alpha)}(U) = p_\alpha(U) = U_\alpha$, che è aperto in X_α . \square

Proposizione 2.2.5. (*Proprietà universale della topologia prodotto*)

La topologia prodotto ha la seguente proprietà: dato Z spazio topologico e $f : Z \longrightarrow X$ funzione arbitraria, allora f è continua se e solo se $p_\alpha \circ f$ è continua. Il diagramma risulta essere:

$$\begin{array}{ccc} & & X \\ & \nearrow f & \downarrow p_\alpha \\ Z & \xrightarrow{p_\alpha \circ f} & X_\alpha \end{array}$$

Dimostrazione. (\Rightarrow) La composizione di funzioni continue è una funzione continua.

(\Leftarrow) Sia $U \subset X$ aperto. Vediamo se $f^{-1}(U)$ aperto. Ci basta vederlo per $U \in \mathcal{B}$, quindi:

$$U = \prod_{\alpha \in A} U_\alpha \quad \text{con } U_\alpha \subset X_\alpha \text{ aperto}$$

Inoltre, $\exists A_0 \subset A$ finito tale che $U_\alpha = X_\alpha$ ($\forall \alpha \notin A_0$). D'altra parte:

$$f^{-1}(U) = f^{-1}\left(\prod_{\alpha \in A} U_\alpha\right) = f^{-1}\left(\bigcap_{\alpha \in A} p_\alpha^{-1}(U_\alpha)\right) = \bigcap_{\alpha \in A} (p_\alpha \circ f)^{-1}(U_\alpha)$$

Dunque $f^{-1}(U)$ è un'intersezione finita di aperti. \square

Teorema 2.2.6. La topologia prodotto è univocamente caratterizzata dalla proprietà universale.

Equivalentemente: Se τ_X è una topologia in X con la proprietà:

$\forall Z$ spazio topologico, $f : Z \rightarrow X$, allora f è continua se e solo se $p_\alpha \circ f$ è continua.

Dimostrazione. Abbiamo visto che la topologia prodotto soddisfa la proprietà. Siano τ_X una topologia che soddisfa la proprietà, τ_α la topologia in X_α e τ_{pr} la topologia prodotto su X . Prendiamo $Z = (X, \tau_{pr})$, e otteniamo il diagramma:

$$\begin{array}{ccc} & (X, \tau_X) & \\ \text{id}_X \nearrow & & \searrow p_\alpha \\ (X, \tau_{pr}) & \xrightarrow{p_\alpha} & (X_\alpha, \tau_\alpha) \end{array}$$

Abbiamo mostrato che $p_\alpha : (X, \tau_{pr}) \rightarrow (X_\alpha, \tau_\alpha)$ è continua. Allora per la proprietà è continua anche id_X , quindi $\tau_X \subset \tau_{pr}$, ovvero $\tau_X < \tau_{pr}$. Viceversa, per la minimalità di τ_{pr} , basta vedere che $p_\alpha : (X, \tau_X) \rightarrow (X_\alpha, \tau_\alpha)$ è continua $\forall \alpha \in A$. Prendiamo $Z = (X, \tau_X)$ e $f = \text{id}_X$. Allora otteniamo il diagramma:

$$\begin{array}{ccc} & (X, \tau_X) & \\ \text{id}_X \nearrow & & \downarrow p_\alpha \\ (X, \tau_X) & & (X_\alpha, \tau_\alpha) \\ & \searrow p_\alpha & \end{array}$$

Da cui possiamo osservare che id_X è continua per la proprietà universale, e anche p_α lo è. \square

Diamo adesso alcune informazioni generali che verranno dimostrate più avanti, dopodiché vedremo alcune proprietà dei prodotti topologici nel caso degli spazi metrici.

- (i) Il prodotto di una quantità numerabile di spazi metrici è metrizzabile. In generale, è falso se la quantità non è numerabile.
- (ii) Il prodotto di una quantità al più continua di spazi separabili è separabile.

Proposizione 2.2.7. Sia (X, d) spazio metrico. Allora $\bar{d} : X \times X \longrightarrow \mathbb{R}$ definita come:

$$\bar{d}(x, y) = \min\{d(x, y), 1\}$$

è una distanza topologicamente equivalente a d . Dunque la topologia di uno spazio metrizzabile è indotta da una distanza ≤ 1 .

Dimostrazione. Verifichiamo che \bar{d} è una distanza.

- (i) $\bar{d}(x, y) \geq 0 \quad \forall x, y$ e $\bar{d}(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$ è ovvio dalla definizione.
- (ii) Anche la simmetria di \bar{d} è ovvia dalla definizione
- (iii) Vediamo che $\bar{d}(x, z) \leq \bar{d}(x, y) + \bar{d}(y, z) \quad \forall x, y, z$. Se almeno una tra $\bar{d}(x, y)$ e $\bar{d}(y, z)$ è uguale a 1 la tesi è ovvia ($\bar{d}(x, z) \leq 1$). Altrimenti:

$$\bar{d}(x, z) \leq d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z) = \bar{d}(x, y) + \bar{d}(y, z)$$

Dunque \bar{d} è una distanza. Come base della topologia associata ad una distanza si possono prendere le palle di raggio R , al variare di $R < 1$. Ma $\forall x \in X, \forall R < 1, B_d(x, R) = B_{\bar{d}}(x, R)$, perciò le topologie indotte coincidono. \square

Definizione 2.2.8. $f : (X, d) \longrightarrow (Y, d')$ si dice K -LIPSCHITZ se $\forall K > 0, \forall x_1, x_2 \in X$:

$$d'(f(x_1), f(x_2)) \leq K d(x_1, x_2)$$

Inoltre, poiché $f(B(x, \frac{\varepsilon}{K})) \subseteq B(f(x), \varepsilon)$, una funzione K -Lipschitz è continua.

Teorema 2.2.9. Sia $\{(X_i, d_i)\}_{i \in \mathbb{N}}$ una famiglia di spazi metrici. Allora $X = \prod_{i \in \mathbb{N}} X_i$ è metrizzabile.

Dimostrazione. Costruiamo $d : X \times X \longrightarrow \mathbb{R}$ distanza che induce τ_{pr} (la topologia prodotto). $\forall i \in \mathbb{N}$ posso supporre $d_i \leq 1$. Denotiamo con $(x_i)_{i \in \mathbb{N}}$ i punti di X , dove $x_i \in X_i, \forall i \in \mathbb{N}$. Poniamo:

$$d(x, y) = \sum_{i=0}^{\infty} 2^{-i} \cdot d_i(x_i, y_i)$$

che è $< +\infty$ poiché $d_i \leq 1$. È facile verificare che d è una distanza. Sia ora τ_d la topologia indotta, e mostriamo che $\tau_{pr} = \tau_d$.

Se $\pi_i : X \longrightarrow X_i$ è la proiezione su X_i , allora:

$$d_i(\pi_i(x), \pi_i(y)) = d_i(x_i, y_i) = 2^i(2^{-i} \cdot d_i(x_i, y_i)) \leq 2^i d(x, y)$$

Quindi π_i è 2^i -Lipschitz, dunque è continua. Allora ogni proiezione è continua rispetto a τ_d , quindi $\tau_d \supseteq \tau_{pr}$. Vediamo adesso l'inclusione opposta ($\tau_d \subseteq \tau_{pr}$).

Basta osservare che ogni palla di d è aperta in τ_{pr} . Sia $B = B_d(x, \varepsilon) \subseteq X$ e sia $y \in B$. Allora $\exists \delta > 0$ tale che $B(y, \delta) \subseteq B$. Dobbiamo allora mostrare che $\exists U$ aperto di τ_{pr} con $y \in U \subseteq B_d(y, \delta)$. Sia quindi $n_0 \in \mathbb{N}$ tale che $\sum_{i=n_0+1}^{\infty} 2^{-i} < \delta/2$. Poniamo:

$$U = \bigcap_{i=0}^{n_0} \pi_i^{-1} \left(B \left(y_i, \frac{\delta}{4} \right) \right) = B_{d_0} \left(y_0, \frac{\delta}{4} \right) \times \cdots \times B_{d_n} \left(y_n, \frac{\delta}{4} \right) \times X_{n_0+1} \times \cdots \times X_n \times \cdots$$

Se $z \in U$, $d_i(x_i, y_i) < \frac{\delta}{4} \quad \forall i \leq n_0$, allora:

$$\begin{aligned} d(y, z) &= \sum_{i=0}^{\infty} 2^{-i} d_i(y_i, z_i) = \sum_{i=0}^{n_0} 2^{-i} d_i(y_i, z_i) + \sum_{i=n_0+1}^{\infty} 2^{-i} d_i(y_i, z_i) < \\ &< \frac{\delta}{4} \left(\sum_{i=0}^{n_0} 2^{-i} \right) + \sum_{i=n_0+1}^{\infty} 2^{-i} < \frac{\delta}{4} \cdot 2 + \frac{\delta}{2} = \delta \end{aligned}$$

Dunque $U \subseteq B(y, \delta)$. □

Osservazione 2.2.10. In realtà potevamo usare una qualsiasi serie convergente a termini positivi al posto di $\sum_{i=0}^{\infty} 2^{-i}$.

Osservazione 2.2.11. Genericamente, se il prodotto più che numerabile di spazi metrici non è primo-numerabile allora non è metrizzabile.

Proposizione 2.2.12. (Prodotti finiti) Se (X, d) e (Y, d') sono spazi metrici, allora $X \times Y$ è metrizzabile, e ha topologia indotta da una qualsiasi delle seguenti distanze:

- (i) $d_{\infty}((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \max\{d(x_1, x_2), d'(y_1, y_2)\}$
- (ii) $d_2((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = \sqrt{d(x_1, x_2)^2 + d'(y_1, y_2)^2}$
- (iii) $d_1((x_1, y_1), (x_2, y_2)) = d(x_1, x_2) + d'(y_1, y_2)$

Dimostrazione. Si può verificare che d_1, d_2, d_{∞} sono equivalenti, come già visto su \mathbb{R}^n . Inoltre, è facile vedere che inducono la topologia prodotto. □

2.3 Assiomi di separazione

In un generico spazio topologico, vorremmo usare gli aperti per dire in qualche modo che punti o insiemi (che prenderemo chiusi) disgiunti sono separati anche a livello della topologia. Per questo richiediamo che gli spazi soddisfino alcune condizioni, i cosiddetti ASSIOMI DI SEPARAZIONE. Negli enunciati degli assiomi X è uno spazio topologico con una topologia data. Ecco i primi due.

(T1) $\forall x, y \in X, x \neq y$ esistono aperti $U, V \subseteq X$ con $x \in U \setminus V, y \in V \setminus U$;

(T2) $\forall x, y \in X, x \neq y$ esistono aperti $U, V \subseteq X$ con $U \cap V = \emptyset, x \in U, y \in V$.

Definizione 2.3.1. Se X gode di T2 è detto SPAZIO DI HAUSDORFF, o spazio topologico *separato*.

Chiaramente $T2 \Rightarrow T1$.

Osservazione 2.3.2. In uno spazio T1, ogni punto è uguale all'intersezione di tutti i suoi interni.

Proposizione 2.3.3. Uno spazio topologico X è T1 \Leftrightarrow i punti sono chiusi.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Supponiamo X sia T1 e sia $x \in X$. Per ogni $y \in X, y \neq x$ esistono U_y, V_y aperti che soddisfano le condizioni imposte da T1. Ma allora $x \notin V_y, y \in V_y$, da cui $X \setminus \{x\} = \bigcup_{y \in X, y \neq x} V_y$, essendo unione di aperti è aperto, perciò il suo complementare, $\{x\}$, è chiuso, come voluto.

(\Leftarrow) Supponiamo adesso che i punti di X siano chiusi. Allora, dati $x, y \in X, x \neq y$, scegliendo gli aperti $U = X \setminus \{y\}, V = X \setminus \{x\}$ si ha che questi soddisfano le condizioni di T1. \square

Osservazione 2.3.4. Segue facilmente dalla proposizione sopra che in uno spazio T1 tutti gli insiemi cofiniti sono aperti. D'altra parte, se tutti i cofiniti sono aperti i punti sono chiusi. Dunque, se abbiamo uno spazio topologico generico (X, τ) , possiamo affermare che esso è T1 $\Leftrightarrow \tau$ è più fine della topologia cofinita.

Proposizione 2.3.5. X è di Hausdorff $\Leftrightarrow \Delta_X \subseteq X \times X$ è chiuso, dove $\Delta_x = \{(x, x) | x \in X\}$ è la *diagonale di X* .

Dimostrazione. (\Rightarrow) Sia $(x, y) \in X \times X \setminus \Delta_X$. Allora $x \neq y$, dunque esistono due aperti disgiunti U_x, V_y t.c. $x \in U_x, y \in V_y$, da cui $(x, y) \in U_x \times V_y$, che è un aperto della topologia prodotto. Dunque $X \times X \setminus \Delta_X = \bigcup_{(x, y) \in X \times X \setminus \Delta_X} U_x \times V_y$

è unione di aperti, dunque è aperto e il complementare, Δ_X , è chiuso.

(\Leftarrow) Supponiamo adesso Δ_X chiuso. Dati due punti $x, y \in X, x \neq y$ la coppia (x, y) sta nel complementare di Δ_X , che è aperto. Esiste allora un elemento della base della topologia prodotto su $X \times X$ tutto contenuto in $X \times X \setminus \Delta_X$ che contiene (x, y) . Ma questo è della forma $U \times V$ per qualche U e V aperti con $x \in U, y \in V$ e dato che non interseca Δ_X , significa che non possiamo trovare lo stesso elemento in entrambi gli insiemi, cioè $U \cap V = \emptyset$. Segue allora che X è di Hausdorff. \square

Esempio 2.3.6. Un esempio di spazio di Hausdorff è un qualsiasi spazio metrizzabile. Lasciamo come semplice esercizio la dimostrazione che metrizzabile implica Hausdorff.

Un esempio, invece, di uno spazio T1 ma non T2, è un qualsiasi spazio infinito con la topologia cofinita. Lasciamo anche in questo caso la verifica di quanto appena detto come semplice esercizio.

Proposizione 2.3.7. Sottospazi e prodotti arbitrari di spazi topologici T1 (rispettivamente T2) sono ancora T1 (rispettivamente T2).

Dimostrazione. Per quanto riguarda i sottospazi, basta prendere l'intersezione degli aperti in questione con il sottospazio stesso ed è semplice verificare che rispettano ancora le condizioni, sia per T1 che per T2.

Per quanto riguarda i prodotti, ricordando la loro definizione come insiemi di funzioni, se due funzioni differiscono per almeno un elemento allora basta prendere gli aperti dati dall'assioma del caso (T1 o T2) per lo spazio topologico relativo a quell'elemento e tutto lo spazio per tutti gli altri elementi. \square

Proposizione 2.3.8. Date due topologie, si vede facilmente che se in una abbiamo più aperti che nell'altra, e quest'ultima rispetta uno dei due assiomi, allora di sicuro possiamo trovare anche nella prima aperti che rispettano le condizioni del suddetto assioma, anzi, magari ne troviamo pure più di prima. Sia dunque X un insieme e $\tau_1 < \tau_2$ topologie su X , se τ_1 è T1 (rispettivamente T2), allora anche τ_2 è T1 (rispettivamente T2).

Vediamo ora alcune applicazioni di questi primi due assiomi di separazione.

- (i) $f : X \rightarrow Y$ continua, Y T2, $\Gamma_f = \{(x, f(x)) | x \in X\} \subseteq X \times Y$ (Γ_f è il grafico di f), allora Γ_f è chiuso in $X \times Y$;
- (ii) $f, g : X \rightarrow Y$ continue, Y T2, allora $\{x \in X | f(x) = g(x)\} \subseteq X$ è chiuso in X ;
- (iii) $f : X \rightarrow X$ continua, X T2, allora $Fix(f) = \{x \in X | f(x) = x\} \subseteq X$ è chiuso in X ;
- (iv) $f, g : X \rightarrow Y$ continue, Y T2, $Z \subseteq X$ denso t.c. $f(z) = g(z) \forall z \in Z$, allora $f = g$;
- (v) X T2, $\{x_n\}$ successione convergente, allora il limite è unico.

Dimostrazione. (i) Sia $(x, y) \in X \times Y \setminus \Gamma_f$. Allora $y \neq f(x)$ e poiché Y è T2 si ha che esistono due aperti disgiunti $U_{f(x)}, V_y$ t.c. $f(x) \in U_{f(x)}, y \in V_y$. Per la continuità di f , abbiamo che $U_x = f^{-1}(U_{f(x)})$ è un aperto contenente x t.c. $U_x \times V_y \subseteq X \times Y$ è un aperto della topologia prodotto contenente (x, y) che per quanto detto prima non interseca mai Γ_f . Allora $X \times Y \setminus \Gamma_f = \bigcup_{(x,y) \in X \times Y \setminus \Gamma_f} U_x \times V_y$ è unione di aperti, cioè apertp, e il suo complementare, Γ_f , è chiuso.

- (ii) Sia $X_{|f=g}$ l'insieme che vogliamo mostrare essere chiuso e $x \in X \setminus X_{|f=g}$. Allora $f(x) \neq g(x)$ e dato che Y è T2 esistono due aperti disgiunti U'_x, V'_x t.c. $f(x) \in U'_x, g(x) \in V'_x$. Supponiamo per assurdo $f \neq g$. Allora esiste $x \in X$ t.c. $f(x) \neq g(x)$. Per la continuità di f e g ho che $U_x = f^{-1}(U'_x), V_x = g^{-1}(V'_x)$ sono due aperti di X con intersezione non vuota (c'è almeno x),

sia dunque A_x la loro intersezione. Questo è un intorno aperto di x t.c. per ogni $y \in A_x$ si ha $f(y) \neq g(y)$, per come è stato definito l'aperto. Allora $X \setminus X_{|f=g} = \bigcup_{x \in X \setminus X_{|f=g}} A_x$ è unione di aperti, cioè è aperto, dunque

il suo complementare, $X_{|f=g}$, è chiuso.

- (iii) Segue direttamente dalla precedente ponendo $Y = X$ e $g = id$.
- (iv) Segue ancora una volta dalla seconda affermazione: poiché $Z \subseteq X_{|f=g}$, che è un chiuso, allora $X \subseteq \overline{Z} \subseteq X_{|f=g} \subseteq X \Rightarrow X_{|f=g} = X$.
- (v) Supponiamo per assurdo che il limite non sia unico e siano $x \neq y$ due elementi di X a cui converge la successione. Poiché X è T2, esistono due aperti disgiunti U, V con $x \in U, y \in V$. Ma questi sono rispettivamente intorni di x e y , dunque per definizione di limite la successione deve essere definitivamente contenuta in entrambi gli insiemi, assurdo poiché essi sono disgiunti.

□

Vediamo adesso gli altri due assiomi di separazione.

(T3) Per ogni chiuso $C \subseteq X, x \in X \setminus C$, esistono aperti $U, V \subseteq X$ disgiunti con $x \in U, C \subseteq V$;

(T4) per ogni coppia di chiusi disgiunti $C, D \subseteq X$ esistono aperti $U, V \subseteq X$ disgiunti con $C \subseteq U, D \subseteq V$.

Osservazione 2.3.9. $T4+T1 \Rightarrow T3+T1 \Rightarrow T2 \Rightarrow T1$. La dimostrazione è lasciata come utile esercizio al lettore.

Definizione 2.3.10. X è detto NORMALE se soddisfa T1+T4. X è detto REGOLARE se soddisfa T1+T3.

Osservazione 2.3.11. Possiamo riformulare la condizione T4 come segue: per ogni coppia di chiusi $C, D \subseteq X$ esiste $U \subseteq X$ aperto t.c. $C \subseteq U \subseteq \overline{U} \subseteq X \setminus D$.

Dimostrazione. Chiaramente se esiste un siffatto U possiamo prendere lui e l'aperto $X \setminus \overline{U}$ per soddisfare T4. Viceversa, siano U, V gli aperti dati dalla condizione T4. Poiché $X \setminus V$ è chiuso e contenuto in $X \setminus D$ abbiamo dunque che $C \subseteq U \subseteq \overline{U} \subseteq X \setminus V \subseteq X \setminus D$. □

Proposizione 2.3.12. X s.t. metrizzabile $\Rightarrow X$ normale.

Dimostrazione. Dall'esempio 2.3.6 sappiamo già che X è T2, dunque anche T1. Resta da dimostrare che X è T4.

Siano dunque $C, D \subseteq X$ due chiusi disgiunti e sia d la distanza su X . Definiamo $d_C(x) = \inf_{y \in C} d(x, y)$. Mostriamo che $d_C(x) = 0 \Leftrightarrow x \in C$. Una freccia è banale. Per l'altra, se esistesse $x \in X \setminus C$ t.c. $d_C(x) = 0$ basta prendere le palle di raggio $1/n$ per estrarre una successione in C che tende a $x \notin C$, assurdo per la proposizione 1.6.17. Analogamente definiamo $d_D(x)$ e dimostriamo che $d_D(x) = 0 \Leftrightarrow x \in D$. Queste due funzioni così definite

sono chiaramente continue. Definiamo adesso $f(x) = \frac{3d_C(x)}{d_C(x) + d_D(x)}$, che è chiaramente continua perché ottenuta da funzioni continue con operazioni che conservano la continuità. Inoltre è ben definita, poiché essendo D e C disgiunti non può mai essere che $d_C(x) = d_D(x) = 0$, perciò il denominatore è sempre positivo. Osserviamo ora che $f : X \rightarrow [0, 3]$, $C = f^{-1}(0)$, $D = f^{-1}(3)$. Inoltre, $[0, 3]$ ha la topologia di sottospazio, perciò $[0, 1)$, $(2, 3]$ sono due aperti disgiunti e per la continuità di f anche le loro controimmagini sono aperti disgiunti che contengono rispettivamente C e D , che è quello che serve per soddisfare T4. \square

Proposizione 2.3.13. Sottospazi e prodotti arbitrari di T3 sono T3; sottospazi chiusi di T4 sono T4; in generale, sottospazi arbitrari di T4 o prodotti arbitrari di T4 non sono T4.

Dimostrazione. Sia X T3 e $Y \subseteq X$ un sottoinsieme con la topologia di sottospazio. Siano adesso $C \subseteq Y$ un chiuso e $x \in Y \setminus C$. Per definizione della topologia di sottospazio, $C = Y \cap D$ dove D è un chiuso di X . Ovviamente $x \notin D$, altrimenti, dato che $x \in Y$, avremmo $x \in Y \cap D = C$. Allora esistono due aperti disgiunti U, V di X t.c. $x \in U, D \subseteq V$. Allora $U' = U \cap Y, V' = V \cap Y$ sono due aperti disgiunti di Y che soddisfano le condizioni per avere T3. Per quanto riguarda T4, questa dimostrazione non funziona, dato che due chiusi disgiunti in Y potrebbero non esserlo in X . Se però Y fosse chiuso in X , allora i due chiusi di Y sarebbero definiti a loro volta come intersezione di Y , che è chiuso in X , e un altro chiuso di X , quindi sarebbero a loro volta chiusi in X e potremmo ripetere la dimostrazione come sopra. Serve un esempio per dire che in generale non si può fare: pensateci.

Passiamo adesso ai prodotti. Sia $X = \prod_{\alpha \in A} X_\alpha$ dove X_α è T3 per ogni $\alpha \in A$

e siano $C \subseteq X$ un chiuso, $x \in X \setminus C$. Indichiamo con x_α la proiezione di x su X_α . Allora esiste un elemento B della base che contiene x e tutto contenuto in $X \setminus C$, perciò il suo complementare è un chiuso che contiene C . Sia $S \subseteq A$ il sottoinsieme finito per cui, se scriviamo $B = \prod_{\alpha \in A} U_\alpha$, abbiamo che $U_\alpha =$

$X_\alpha \Leftrightarrow \alpha \notin S$. Allora grazie alla proprietà T3 di ogni X_α troviamo, per ogni $\alpha \in S$, due aperti disgiunti V_α, V'_α t.c. $x_\alpha \in V_\alpha, X_\alpha \setminus U_\alpha \subseteq V'_\alpha$. Ponendo dunque $U = \prod_{\alpha \in A} V_\alpha, V = \bigcup_{\alpha \in S} \prod_{\beta \in A} V''_\beta$ (dove $V''_\beta = V'_\beta$ se $\beta = \alpha$, $V''_\beta = X_\beta$ altrimenti) è

facile verificare che questi sono due aperti disgiunti che separano x e C , dunque X è T3. Un esempio di prodotto di T4 non T4 sarà visto tra poco. \square

Riassumendo, metrizzabile $\stackrel{(i)}{\Rightarrow}$ normale $\stackrel{(ii)}{\Rightarrow}$ regolare $\stackrel{(iii)}{\Rightarrow}$ T2. Vediamo dei controesempi che dimostrano che non valgono le implicazioni inverse.

Esempio 2.3.14.

- (i) retta di Sorgenfrey;
- (ii) piano di Sorgenfrey;

- (iii) la topologia su \mathbb{R} generata dagli intervalli (a, b) e dagli insiemi $(a, b) \setminus K$ dove $K = \{1/n | n \in \mathbb{N}, n \neq 0\}$, detta topologia \mathbb{R}_K .

Dimostrazione. Per quanto visto nell'esempio 1.6.12 sappiamo già che la retta di Sorgenfrey non è metrizzabile. Mostriamo adesso che è normale. Essendo più fine della topologia euclidea, sicuramente è T1. Per dire che è T4, siano $C, D \subseteq \mathbb{R}$ due chiusi disgiunti. Ovviamente $C \subseteq \mathbb{R} \setminus D, D \subseteq \mathbb{R} \setminus C$ e questi ultimi sono aperti. Dunque per ogni $c \in C$ esiste un $r_c > 0$ t.c. $[c, c + r_c) \subseteq \mathbb{R} \setminus D$ e analogamente per ogni $d \in D$ esiste un $r_d > 0$ t.c. $[d, d + r_d) \subseteq \mathbb{R} \setminus C$. Siano dunque $U = \bigcup_{c \in C} [c, c + r_c), V = \bigcup_{d \in D} [d, d + r_d)$. Questi sono ovviamente aperti in quanto unioni di aperti e $C \subseteq U, D \subseteq V$. Se per assurdo non fossero disgiunti, allora esisterebbero $c \in C, d \in D$ t.c. $[c, c + r_c) \cap [d, d + r_d) \neq \emptyset$. Senza perdita di generalità $c < d$, allora dev'essere $d \in [c, c + r_c) \subseteq \mathbb{R} \setminus D$, assurdo.

Ancora una volta la topologia è T1 in quanto più fine della topologia euclidea. Inoltre è T3: siano infatti $C \subseteq \mathbb{R}^2$ un chiuso e $x \notin C$. Allora esiste un intorno aperto di x della forma $[a, b) \times [c, d)$ tutto contenuto in $\mathbb{R}^2 \setminus C$. È un semplice esercizio verificare che tale intorno è anche chiuso, quindi ponendo $U = [a, b) \times [c, d)$ e V il suo complementare troviamo due aperti disgiunti t.c. $x \in U, C \subseteq V$. Per mostrare che non è T4, dimostriamo prima un lemma.

Lemma 2.3.15. Siano X T4 e separabile e $D \subseteq X$ chiuso e discreto (cioè t.c. la topologia di sottospazio è quella discreta). Allora $|D| < |\mathbb{R}|$.

Dimostrazione. Sia $Q \subseteq X$ un denso numerabile e sia $S \subseteq D$. S è chiuso in D , ma ciò significa che è intersezione di un chiuso in X e di D , che è chiuso in X , quindi S è chiuso in X , e analogamente $D \setminus S$. Esistono allora due aperti disgiunti U_S, V_S t.c. $S \subseteq U_S, D \setminus S \subseteq V_S$. Definiamo $f: \mathcal{P}(D) \rightarrow \mathcal{P}(Q)$ di modo che $f(S) = Q \cap U_S$. f è iniettiva: siano infatti $S, T \subseteq D$ distinti e supponiamo senza perdita di generalità $S \setminus T \neq \emptyset$. Notiamo che $S \setminus T \subseteq D \setminus T \subseteq V_T$, perciò $S \setminus T \subseteq U_S \cap V_T$, quindi $U_S \cap V_T \neq \emptyset$, ma essendo intersezione di due aperti è un aperto, perciò esiste $x \in Q$ t.c. $x \in U_S \cap V_T \Rightarrow x \in f(S)$, ma allora $x \notin U_T \Rightarrow x \notin Q \cap U_T = f(T)$, il che vuol dire che f è iniettiva. Perciò $|D| < |\mathcal{P}(D)| \leq |\mathcal{P}(Q)| = |\mathbb{R}|$ poiché Q è numerabile. \square

Adesso basta ricordare dall'esempio 1.7.17 che la retta $y = -x$, che ha la cardinalità del continuo, ha come topologia di sottospazio quella discreta. È facile mostrare che il piano di Sorgenfrey è separabile, quindi segue facilmente dal lemma che non è T4.

Osservazione 2.3.16. Il piano di Sorgenfrey è un esempio di prodotto di T4 che non è T4.

Essendo la topologia considerata più fine della topologia euclidea, sappiamo già che è T2. Mostriamo che non è T3. Si verifica facilmente che K è chiuso e $0 \notin K$. Se esistessero due aperti disgiunti che li separano, quello di 0 sarebbe

necessariamente unione di intorni della forma $(a, b) \setminus K$. Sia quindi, senza perdita di generalità, $(-\varepsilon, \varepsilon) \setminus K, \varepsilon > 0$ uno di questi intorni. Consideriamo allora $n \in \mathbb{N} \setminus \{0\}$ t.c. $1/n < \varepsilon$. Allora qualunque intorno contenente $1/n$ interseca banalmente $(-\varepsilon, \varepsilon)$, dunque due aperti disgiunti che separino 0 e K non possono esistere. \square

Teorema 2.3.17. Se X è regolare a base numerabile, allora X è normale.

Dimostrazione. Essendo X regolare, ovviamente è T1. Dobbiamo verificare che sia T4. Siano quindi $C, D \subseteq X$ due chiusi disgiunti e \mathcal{B} una base numerabile. Per ogni $c \in C$ esiste un aperto U_c t.c. $c \in U_c \subseteq \overline{U_c} \subseteq X \setminus D$. Analogamente possiamo scegliere un V_d per ogni $d \in D$ che li separi allo stesso modo da C . Notiamo che possiamo prendere $U_c, V_d \in \mathcal{B}$ per ogni $c \in C, d \in D$. Definiamo adesso $\mathcal{C} \subseteq \mathcal{B}$ come $\{U_c \in \mathcal{B} \mid \overline{U_c} \cap D = \emptyset\}$ e analogamente \mathcal{D} . Per quello che abbiamo detto prima, \mathcal{C} ricopre C e \mathcal{D} ricopre D . Essendo \mathcal{B} numerabile,

possiamo scrivere $\mathcal{C} = \{U_n\}, \mathcal{D} = \{V_n\}$. Siano adesso $A_n = U_n \setminus \bigcup_{j=1}^n \overline{V_j}, B_n =$

$V_n \setminus \bigcup_{j=1}^n \overline{U_j}$. Si può notare facilmente che sono tutti aperti, dunque $A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ e

$B = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} B_n$ sono aperti, inoltre, dato che gli U_n ricoprono C mentre $C \cap \overline{V_n} = \emptyset$

per ogni n , abbiamo $C \subseteq A$ e analogamente $D \subseteq B$. È un semplice esercizio verificare che $A_n \cap B_m = \emptyset$ per ogni $n, m \in \mathbb{N}$, dunque A e B sono due aperti disgiunti contenenti rispettivamente C e D , da cui segue che X è T4. \square

Teorema 2.3.18. Teorema di Urysohn: se X è regolare a base numerabile, allora X è metrizzabile.

Dimostrazione. Non verrà dimostrato in questo corso. \square

2.4 Quozienti topologici

Definizione 2.4.1. Siano X uno spazio topologico e \sim una relazione di equivalenza definita su X . Vengono allora indotti un insieme $Y = X/\sim$ e una proiezione $\pi: X \rightarrow Y$ che manda ogni punto nella sua classe di equivalenza. La topologia quoziente definita su Y è la topologia più fine che rende π continua.

Definizione 2.4.2. Data la proiezione π come sopra, un sottoinsieme $Z \subseteq X$ si dice saturo se è unione di classi di equivalenza per \sim . Cioè $Z = \pi^{-1}\pi(Z)$.

Osservazione 2.4.3. Nel setting di prima, detta τ_Y la topologia quoziente, si ha che

$$A \in \tau_Y \iff \pi^{-1}(A) \text{ aperto} \iff A = \pi(B) \text{ con } B \text{ aperto saturo.}$$

Teorema 2.4.4. *Proprietà universale del quoziente.* Siano X un insieme con una relazione di equivalenza \sim e una proiezione π . Allora la topologia quoziente è l'unica topologia per cui per ogni spazio topologico Z e funzione $f: X/\sim \rightarrow Z$, f è continua se e solo se $f \circ \pi$ è continua.

Dimostrazione. Il seguente diagramma è commutativo.

$$\begin{array}{ccc} X & & \\ \downarrow \pi & \searrow f \circ \pi & \\ X/\sim & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

Come prima cosa verifichiamo che la topologia quoziente ha la proprietà universale. Un'implicazione è facile: se f e π sono continue, anche la loro composizione lo è. Viceversa sia $f \circ \pi$ continua, e si prenda un aperto in Z . Allora $(f \circ \pi)^{-1}(A) = (\pi^{-1} \circ f^{-1})(A)$ è aperto, e dunque anche $f^{-1}(A)$ è aperto. Mostriamo ora che se una certa topologia σ gode della proprietà universale, allora è uguale alla topologia quoziente τ .

Si prenda $Z = (X/\sim, \tau)$ e f l'identità. Allora poiché π è continua con la topologia τ , si ha che

$$\text{id}: X/\sim, \sigma \rightarrow X/\sim, \tau$$

è dunque σ è più fine di τ .

Viceversa, prendendo per Z lo stesso insieme ma dotato della topologia σ e $f = \text{id}$, si ottiene che π è continua anche con σ . Per definizione di topologia quoziente, allora τ è più fine di σ . \square

Definizione 2.4.5. Una funzione $f: X \rightarrow Y$ continua e surgettiva si chiama identificazione quando per ogni $A \subseteq Y$, A è aperto se e solo se $f^{-1}(A)$ è aperto.

Osservazione 2.4.6. Sia f una bigezione continua. Sono equivalenti:

- (i) f è immersione;
- (ii) f è omeomorfismo;
- (iii) f è identificazione.

Osservazione 2.4.7. Sia f continua surgettiva. Allora:

- (i) Se f è aperta, è identificazione.
- (ii) Se f è chiusa, è identificazione.
- (iii) Ogni altra implicazione è abusiva.

Proposizione 2.4.8. Sia $f: X \longrightarrow Y$ un'identificazione. Allora la funzione \bar{f} definita dal seguente diagramma commutativo è un omeomorfismo.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ \pi \downarrow & \nearrow \bar{f} & \\ X/\sim & & \end{array}$$

Dimostrazione. Per come è definita \bar{f} , essa è ben definita e bigettiva. Poiché f è continua, per la proprietà universale, anche \bar{f} è continua. Voglio mostrare che \bar{f} è aperta. Sia allora A un aperto di X/\sim . Si ha che $\bar{f}(A) = (f \circ \pi^{-1})(A)$ è aperto se e solo se $(f^{-1} \circ f \circ \pi^{-1})(A)$ è aperto perché f è identificazione. Poiché π è la proiezione sulla topologia quoziente, A è aperto. \square

Osservazione 2.4.9. Si ha che \bar{f} è un omeomorfismo se e solo se f è un'identificazione.

Definizione 2.4.10. Sia $A \subseteq X$. Si definisce il quoziente

$$X/A = X/\sim$$

dove $x \sim x'$ se e solo se $x = x'$ oppure $x, x' \in A$. Cioè in questo quoziente A “collassa” in un punto.

Esempio 2.4.11. Il disco quozientato sulla sua frontiera è isomorfo alla sfera. Cioè $D^n/\partial D^n \cong S^n$.

Dimostrazione. Basta verificare che la funzione

$$f: D^n/\partial D^n \longrightarrow S^n$$

$$x \longrightarrow (2\|x\|^2 - 1, x\sqrt{1 - \|x\|^2})$$

sia un omeomorfismo. Sicuramente si ha la continuità. Per l'iniettività si noti che il primo termine distingue i vettori con norma diversa, mentre il secondo distingue i vettori con direzione diversa, con l'eccezione dei punti di norma 1, che però sono identificati. Infine la funzione è surgettiva, in quanto l'immagine è composta effettivamente di vettori di lunghezza unitaria. \square

Esempio 2.4.12. Sia

$$X = \{x \geq 0\} \cup \{y = 0\} \subseteq \mathbb{R}^2$$

e sia $\pi: X \longrightarrow \mathbb{R}$ la proiezione sul primo elemento. Allora π è un'identificazione ma non è chiusa né aperta.

Esempio 2.4.13. Sia

$$A = \{(x, 0)\} \subseteq \mathbb{R}^2$$

e sia $X = \mathbb{R}^2/A$. Allora X non è primo numerabile.

2.5 Quozienti per azioni di gruppi

Consideriamo X spazio topologico e G gruppo. Diciamo che G agisce su X tramite omeomorfismi, cioè:

$$G \longrightarrow \text{Homeo}(X)$$

è un omomorfismo di gruppi. Consideriamo allora X/G con la relazione di equivalenza di essere nella stessa orbita, cioè:

$$x \sim y \iff \exists g \in G : g \cdot x = y$$

In altre parole, le classi di equivalenza sono le orbite di G in X .

Esempio 2.5.1. \mathbb{Z} agisce su \mathbb{R} per traslazione:

$$n \cdot x = n + x$$

Più in generale, \mathbb{Q} agisce su \mathbb{R} allo stesso modo.

Osservazione 2.5.2. (*Osservazione notazionale*) Il quoziente \mathbb{R}/\mathbb{Z} può indicare due cose ben distinte:

- (i) $\mathbb{Z} \subset \mathbb{R}$ sottoinsieme $\implies \mathbb{R}/\mathbb{Z}$ bouquet infinito numerabile di circonferenze
- (ii) \mathbb{Z} agisce su \mathbb{R} come nell'esempio sopra $\implies S^1$

Proposizione 2.5.3. \mathbb{Z} agisce su \mathbb{R} come nell'esempio sopra $\implies S^1$

Dimostrazione. Consideriamo:

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R} &\longrightarrow S^1 \\ t &\longmapsto (\cos(2\pi t), \sin(2\pi t)) \end{aligned}$$

Se vediamo f identificazione, allora abbiamo finito in quanto le fibre di f sono proprio le orbite di \mathbb{Z} . Sappiamo inoltre che f è continua e surgettiva, vediamo allora che è aperta. Ci basta guardare $f(I)$ con $I \subset \mathbb{R}$ intervallo aperto. Sia $a \in \mathbb{R}$ e osserviamo che, preso $I = (a, a+1)$ si ha che:

$$f|_{(a, a+1)} : (a, a+1) \longrightarrow S^1 \setminus \{f(a)\}$$

è invertibile con inversa continua. Dunque $f|_I$ è un omeomorfismo. Segue allora che $f|_I$ è aperta per ogni aperto A . Infatti se A è contenuto in un intervallo I di ampiezza 1 allora $f(A)$ è aperto per l'osservazione. Altrimenti, più in generale, possiamo scrivere $A = \bigcup_{j \in J} A_j$ dove A_j è un aperto contenuto in intervalli di ampiezza 1. Allora:

$$f(A) = f\left(\bigcup A_j\right) = \bigcup f(A_j)$$

che è aperto in quanto unione di aperti. □

Proposizione 2.5.4. Sia G gruppo che agisce su X spazio topologico (per omeomorfismi). Allora la proiezione al quoziente $\pi : X \longrightarrow X/G$ è aperta. Inoltre, se G è finito, π è anche chiusa.

Dimostrazione. Se $U \subset X$ è un aperto, allora $\pi(U) = \pi\left(\bigcup_{g \in G} gU\right)$ è un aperto saturo. Inoltre, poiché G agisce tramite omeomorfismi, gU è aperto $\forall g \in G$. Se G è finito, il ragionamento è analogo per i chiusi:

$$C \subset X \text{ chiuso} \implies \pi(C) = \pi\left(\bigcup_{g \in G} gC\right) \implies \pi(C) \text{ chiuso}$$

□

Osservazione 2.5.5. Se G è infinito, in generale non è vero che π è chiusa.

Osservazione 2.5.6. Siano $f_i : X_i \longrightarrow Y_i$ identificazioni per $i = 1, 2$. Allora l'applicazione:

$$f_1 \times f_2 : X_1 \times X_2 \longrightarrow Y_1 \times Y_2$$

è continua e surgettiva, ma in generale non è un'identificazione. Inoltre il prodotto cartesiano di identificazioni aperte è un'identificazione aperta.

Proposizione 2.5.7. Sia X spazio di Hausdorff e G gruppo che agisce su X tramite omeomorfismi. Sia $K = \{(x, gx) \mid x \in X, g \in G\} \subset X \times X$. Allora X/G è di Hausdorff se e solo se K è chiuso in $X \times X$.

Dimostrazione. In altre parole, possiamo riformulare l'enunciato come:

$$X/G \text{ Hausdorff} \iff \Delta_{X/G} \subset X/G \times X/G \text{ chiusa}$$

Sia $\pi : X \longrightarrow X/G$ la proiezione, allora π è un'identificazione aperta. Ma allora $\pi \times \pi$ è a sua volta identificazione aperta. Dunque $\Delta_{X/G}$ è chiusa se e solo se $(\pi \times \pi)^{-1}(\Delta_{X/G}) \subset X \times X$ è chiuso. D'altra parte $(\pi \times \pi)^{-1}(\Delta_{X/G}) = K$. □

3 Connessioni e compattezza

3.1 Ricoprimenti

Sia X spazio topologico e $\mathcal{U} \subset \mathcal{P}(X)$.

Definizione 3.1.1. \mathcal{U} è un RICOPRIMENTO DI X se $X = \bigcup_{U \in \mathcal{U}} U$. Se tutti gli $U \in \mathcal{U}$ sono aperti [chiusi] allora diremo che \mathcal{U} è un RICOPRIMENTO APERTO [RICOPRIMENTO CHIUSO].

Definizione 3.1.2. $\mathcal{U} \subset \mathcal{P}(X)$ è detto FAMIGLIA LOCALMENTE FINITA se $\forall x \in X, \exists V \in \mathcal{I}(x)$ tale che $V \cap U \neq \emptyset$ solamente per un numero finito di $U \in \mathcal{U}$.

Esempio 3.1.3. $\mathbb{R} = \bigcup_{n \in \mathbb{Z}} [n, n+1]$ è un ricoprimento chiuso localmente finito.

Definizione 3.1.4. \mathcal{U} ricoprimento di X è detto FONDAMENTALE se, dato $A \subset X$, allora:

$$\begin{array}{lll} A \text{ aperto in } X \iff A \cap U \text{ aperto in } U & \forall U \in \mathcal{U} \\ \text{(Equivalentemente)} \quad C \text{ chiuso in } X \iff C \cap U \text{ chiuso in } U & \forall U \in \mathcal{U} \end{array}$$

Esempio 3.1.5.

- (i) \mathcal{U} ricoprimento aperto $\implies \mathcal{U}$ ricoprimento fondamentale.
- (ii) $\mathbb{R} = \bigcup_{x \in \mathbb{R}} \{x\}$ è un ricoprimento chiuso. D'altra parte però, $A \cap \{x\}$ è aperto in $\{x\} \forall x \in \mathbb{R}$, quindi il ricoprimento non è fondamentale.

Proposizione 3.1.6. Sia \mathcal{U} ricoprimento fondamentale di X , e sia $f : X \rightarrow Y$ funzione tra spazi topologici. Allora f è continua se e solo se $f|_U$ è continua $\forall U \in \mathcal{U}$.

Dimostrazione. (\implies) È ovvia.

(\impliedby) Sia $B \subseteq Y$ un aperto, allora, dato che \mathcal{U} è un ricoprimento, $f^{-1}(B) = \bigcup_{U \in \mathcal{U}} f|_U^{-1}(B)$, e dato che \mathcal{U} è fondamentale questa è un'unione di aperti, dunque un aperto. □

Enunciamo ora un lemma che ci permetterà di dimostrare un teorema particolarmente importante.

Lemma 3.1.7. Un'unione localmente finita di chiusi è chiusa.

Dimostrazione. Sia $\{C_i\}_{i \in I}$ una famiglia localmente finita di chiusi. $\forall x \in X$, $\exists U_x \subseteq X$ aperto, con $x \in U_x$ che interseca solo un numero finito di C_i . Sia $\mathcal{U} = \{U_x\}_{x \in X}$ il ricoprimento aperto così definito. \mathcal{U} è fondamentale, per cui basta vedere che $(\bigcup_{i \in I} C_i) \cap U_x$ è chiuso in U_x , $\forall x \in X$. Ma, fissato x , esistono i_1, \dots, i_n tali che:

$$U_x \cap \left(\bigcup_{i \in I} C_i \right) = U_x \cap (C_{i_1} \cup \dots \cup C_{i_n})$$

che è chiuso in U_x in quanto $C_{i_1} \cup \dots \cup C_{i_n}$ è unione finita di chiusi. \square

Corollario 3.1.8. In generale, se $\{Y_i\}_{i \in I}$ è una famiglia localmente finita, allora:

$$\overline{\bigcup_{i \in I} Y_i} = \bigcup_{i \in I} \overline{Y_i}$$

Dimostrazione.

$$Y_{i_0} \subseteq \bigcup_{i \in I} Y_i \implies \overline{Y_{i_0}} \subseteq \overline{\bigcup_{i \in I} Y_i} \quad \forall i_0 \implies \bigcup_{i \in I} \overline{Y_i} \subseteq \overline{\bigcup_{i \in I} Y_i}$$

Per il viceversa, si mostra prima che se gli Y_i sono localmente finiti, anche gli $\overline{Y_i}$ lo sono. Dunque, per il lemma appena visto, $\bigcup_{i \in I} \overline{Y_i}$ è un chiuso che contiene $\bigcup_{i \in I} Y_i$. Per cui:

$$\overline{\bigcup_{i \in I} Y_i} \subseteq \bigcup_{i \in I} \overline{Y_i}$$

\square

Possiamo adesso enunciare e dimostrare il seguente teorema:

Teorema 3.1.9. Un ricoprimento chiuso localmente finito è fondamentale.

Dimostrazione. Sia $\{C_i\}_{i \in I}$ un ricoprimento chiuso localmente finito, e sia $Z \subseteq X$ tale che $Z \cap C_i$ sia chiuso in C_i , $\forall i \in I$. Poiché C_i è chiuso, e un chiuso di un chiuso di X è chiuso in X , allora $Z \cap C_i$ è chiuso in X $\forall i \in I$. Dunque la famiglia $\{Z \cap C_i\}_{i \in I}$ è una famiglia localmente finita di chiusi. Allora, per il lemma, $Z = \bigcup_{i \in I} (Z \cap C_i)$ è chiuso in X , da cui la tesi. \square

3.2 Connessioni

Definizione 3.2.1. Uno spazio topologico X si dice **SCONNESSO** se vale una delle seguenti condizioni (equivalenti):

- (i) $X = A \sqcup B$ (cioè $X = A \cup B$ con $A \cap B = \emptyset$) con A, B aperti non vuoti. Allora in particolare A e B sono anche chiusi, in quanto sono uno il complementare dell'altro.

- (ii) $X = A \sqcup B$ con A, B chiusi non vuoti
- (iii) $\exists A \subseteq X, A \neq \emptyset, A \neq X, A$ è sia aperto che chiuso

Definizione 3.2.2. X si dice CONNESSO se non è sconnesso. In altre parole, se: $\forall A \subseteq X, A \neq \emptyset, A$ aperto e chiuso, allora $A = X$.

Esempio 3.2.3. $\mathbb{R} \setminus \{0\}$ è sconnesso in quanto unione degli aperti $(-\infty, 0)$ e $(0, +\infty)$.

Teorema 3.2.4. $[0, 1] \subset \mathbb{R}$ è connesso.

Dimostrazione. Siano A, B aperti non vuoti di $[0, 1]$, con $[0, 1] = A \sqcup B$. Posso supporre $0 \in A$. Dunque, se $t_0 = \inf B$ (esiste poiché B è non vuoto e limitato inferiormente), allora $t_0 \geq \varepsilon > 0$, perché altrimenti avrei $B \cap [0, \varepsilon) \neq \emptyset$, che contraddice le ipotesi. B è chiuso (A e B sono entrambi aperti e chiusi), quindi $t_0 \in B$. Ma B è anche aperto e $t_0 > 0$, per cui $\exists \delta > 0$ con $(t_0 - \delta, t_0] \subseteq B$, e ciò contraddice il fatto che $t_0 = \inf B$. \square

Definizione 3.2.5. X si dice CONNESSO PER ARCHI se $\forall x_0, x_1 \in X$, $\exists \alpha : [0, 1] \rightarrow X$ continua tale che $\alpha(0) = x_0, \alpha(1) = x_1$.

Proposizione 3.2.6. X connesso per archi $\implies X$ connesso.

Dimostrazione. Se X fosse sconnesso, allora $X = A \sqcup B$ aperti non vuoti. Prendo allora $x_0 \in A, x_1 \in B$. Se $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ con $\alpha(0) = x_0, \alpha(1) = x_1$ fosse continua, avrei una partizione $[0, 1] = \alpha^{-1}(A) \sqcup \alpha^{-1}(B)$ di $[0, 1]$ in aperti non vuoti, il che è assurdo. \square

Proposizione 3.2.7. Sia $f : X \rightarrow Y$ continua. Allora:

- (i) Se X è connesso, $f(X)$ è connesso
- (ii) Se X è connesso per archi, $f(X)$ è connesso per archi

Dimostrazione. Se $f(X) = A \sqcup B$, allora $X = f^{-1}(A) \sqcup f^{-1}(B)$, quindi X è sconnesso (abbiamo dimostrato la contronominale della (i)).

Dati $y_0, y_1 \in f(X)$, $\exists x_0, x_1 \in X$ con $f(x_0) = y_0, f(x_1) = y_1$, esiste $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ con $\alpha(0) = x_0, \alpha(1) = x_1$. Allora $f \circ \alpha : [0, 1] \rightarrow Y$ è un arco continuo che connette y_0 a y_1 . \square

Lemma 3.2.8. Siano X spazio topologico, $Y \subseteq X$ connesso e $Z \subseteq X$ tale che $Y \subseteq Z \subseteq \bar{Y}$. Allora Z è connesso.

Dimostrazione. Osserviamo innanzitutto che Y è denso in Z , in quanto la chiusura di Y in Z è $Y \cap Z = Z$ poiché $Z \subseteq \bar{Y}$. Sia $A \neq \emptyset$ un aperto e chiuso di Z . Allora $A \cap Y$ è aperto e chiuso in Y (per definizione di topologia di sottospazi), e $A \cap Y \neq \emptyset$ in quanto Y è denso in Z e A è aperto in Z . Allora, per connessione di Y , si ha che $A \cap Y = Y$, cioè $Y \subseteq A$. Ma Y è denso in Z , per cui anche A lo è. Ma A è anche chiuso in Z , per cui $A = Z$. \square

Lemma 3.2.9. Siano $\{Y_i\}_{i \in I}$ sottospazi connessi di X , e sia $x_0 \in X$ tale che $x_0 \in Y_i, \forall i \in I$ (cioè $x_0 \in \bigcup_{i \in I} Y_i \neq \emptyset$). Allora $\bigcup_{i \in I} Y_i$ è connesso.

Dimostrazione. Sia $A \neq \emptyset$ aperto e chiuso di $Y = \bigcup Y_i$. A meno di sostituire A con il suo complementare $Y \setminus A$, posso supporre $x_0 \in A$. $\forall i \in I, A \cap Y_i$ è aperto e chiuso in Y_i , e non è vuoto perché contiene x_0 . Per cui, Y_i connesso implica che $A \cap Y_i = Y_i$, cioè $Y_i \subseteq A$. Ma allora $Y \subseteq A$, cioè $Y = A$, da cui la tesi. \square

Definizione 3.2.10. Sia $x_0 \in X$. Allora esiste il più grande sottospazio connesso di X che contiene x_0 . Lo indicheremo con $C(x_0)$ e lo chiameremo COMPONENTE CONNESSA di x_0 .

Dimostrazione. (Esistenza di $C(x_0)$)

Pongo $C(x_0) = \bigcup \{Y \mid Y \subseteq X, Y \text{ connesso}, x_0 \in Y\}$. Per il lemma appena visto, $C(x_0)$ è connesso, e contiene per costruzione qualsiasi connesso che contiene x_0 , perciò è anche il più grande sottospazio connesso contenente x_0 . \square

Proposizione 3.2.11. Le componenti connesse realizzano una partizione dello spazio in chiusi.

Dimostrazione. $\forall x_0, x_1 \in X, x_0 \in C(x_0)$ poiché $\{x_0\}$ è connesso. Se $C(x_0) \cap C(x_1) \neq \emptyset$, per il lemma precedente $C(x_0) \cup C(x_1)$ è connesso $\implies C(x_0) \cup C(x_1) \subseteq C(x_0)$ e $C(x_0) \cup C(x_1) \subseteq C(x_1) \implies C(x_0) = C(x_1)$. Infine, $C(x_0)$ è connesso per un lemma precedente e contiene x_0 , dunque $\overline{C(x_0)} \subseteq C(x_0)$, per cui $C(x_0) = \overline{C(x_0)}$, ovvero $C(x_0)$ è chiuso. \square

Osservazione 3.2.12. $A \subseteq X$ aperto, chiuso e connesso $\implies A$ è una componente connessa. Infatti, se $B \supseteq A$ è connesso, A è aperto e chiuso in B e non vuoto, allora $A = B$, per cui A è un connesso massimale, ovvero è una componente connessa.

Osservazione 3.2.13. Le componenti connesse di \mathbb{Q} sono i punti, cioè $C(x_0) = \{x_0\}, \forall x_0 \in \mathbb{Q}$. Si dice allora che \mathbb{Q} è TOTALMENTE SCONNESSO. Infatti, supponiamo per assurdo che esista una componente connessa C che contiene due punti $x_0, x_1 \in \mathbb{Q}$, con $x_0 < x_1$, e sia $y \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ con $x_0 < y < x_1$. Allora $(C \cap (-\infty, y)) \sqcup (C \cap (y, +\infty))$ è una partizione non banale di C in aperti. Ma allora C è sconnesso, il che contraddice l'ipotesi iniziale.

Dunque, in generale, le componenti connesse non sono aperte.

Studiamo adesso i connessi di \mathbb{R} :
 $A \subset \mathbb{R}$ è convesso se $\forall x, y \in A$ vale:

$$tx + (1 - t)y \in A \quad \forall t \in [0, 1]$$

Osservazione 3.2.14.

$$\begin{aligned} A \subset \mathbb{R} \text{ convesso} &\implies A \text{ connesso per archi} \\ &\implies A \text{ connesso} \end{aligned}$$

Proposizione 3.2.15. Se $I \subset \mathbb{R}$, sono equivalenti:

- (i) I è convesso (I è un intervallo)
- (ii) I è connesso per archi
- (iii) I è connesso

Dimostrazione. (i) \implies (ii) \implies (iii) lo sappiamo già per l'osservazione precedente.

Vediamo allora (iii) \implies (i). Supponiamo I non convesso. Allora $\exists a < b < c$ tali che $a, c \in I, b \notin I$. Allora:

$$I = ((-\infty, b) \cap I) \cup ((b, +\infty) \cap I)$$

che è assurdo per ipotesi. □

Esempio 3.2.16. $(0, 1)$ non è omeomorfo a $[0, 1]$. Sia infatti $f : [0, 1] \longrightarrow (0, 1)$ omeomorfismo. Allora:

$[0, 1] \setminus \{0\}$ è connesso

$(0, 1) \setminus \{f(0)\}$ non è connesso.

Esempio 3.2.17. (*Connesso $\not\Rightarrow$ connesso per archi*)

Sia $Y = \{(x, \sin \frac{1}{x}) \mid x > 0\} \subset \mathbb{R}^2$. Poiché $Y = F(0, +\infty)$ con:

$$\begin{aligned} F : (0, +\infty) &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ x &\longmapsto \left(x, \sin \frac{1}{x}\right) \end{aligned}$$

allora Y è connesso per archi. Sia:

$$X = \overline{Y} = Y \cup \{(0, t) \mid |t| \leq 1\}$$

che è connesso in quanto chiusura di un connesso. Vediamo allora che non è connesso per archi. Supponiamo che esista il cammino α definito come:

$$\alpha : [0, 1] \longrightarrow X \quad \text{con} \quad \alpha(0) = (0, 0) \text{ e } \alpha(1) \in Y$$

Consideriamo allora:

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= (x(t), y(t)) \\ x : [0, 1] &\longrightarrow [0, +\infty] \\ y : [0, 1] &\longrightarrow [-1, 1]\end{aligned}$$

Sia $\Omega = \{t \in [0, 1] \mid x(t) = 0\}$ chiuso, e sia $t_0 = \max \Omega, t_0 < 1$ per ipotesi. Supponiamo $y(t_0) \geq 0$ (l'altro caso è analogo). Per continuità:

$$\exists \delta > 0 : y(t) \geq -\frac{1}{2} \quad \forall t \in [t_0, t_0 + \delta]$$

Vediamo che $x([t_0, t_0 + \delta]) \subset [0, +\infty)$ è un connesso contenente $0 = x(t_0)$. Allora $\exists \varepsilon > 0$ tale che $[0, \varepsilon] \subset x([t_0, t_0 + \delta])$. Cerchiamo allora $\lambda \in [0, \varepsilon]$ con $\sin \frac{1}{\lambda} = -1$:

$$\lambda = \frac{1}{-\frac{\pi}{2} + 2k\pi} \quad \text{con } k \gg 0$$

Allora $\sin \frac{1}{\lambda} = -1$, vale a dire che se $x(t) = \lambda$, allora $y(t) = \sin \frac{1}{\lambda} = -1$.

Torniamo adesso ad un discorso generale sulle connessioni.

Definizione 3.2.18. Dato $x \in X$, la COMPONENTE CONNESSA PER ARCHI di x è il più grande connesso per archi che contiene x .

Equivalentemente: Dato $x \in X$, la sua componente connessa per archi $C_a(x)$ è:

$$C_a(x) = \{y \in X \mid \exists \alpha : [0, 1] \longrightarrow X \text{ con } \alpha(0) = x, \alpha(1) = y\}$$

Definiamo una relazione \sim su X :

$$x \sim y \text{ se } \exists \alpha : [0, 1] \longrightarrow X \text{ con } \alpha(0) = x, \alpha(1) = y$$

Vediamo che \sim è una relazione di equivalenza, dunque $C_a(x) = [x]$:

(i) \sim è riflessiva. Sia:

$$\begin{aligned}\alpha : [0, 1] &\longrightarrow X \\ t &\longmapsto x\end{aligned}$$

Allora $x \sim x$.

(ii) \sim è simmetrica. Sia $\alpha : [0, 1] \longrightarrow X$ continua con $\alpha(0) = x, \alpha(1) = y$. Definiamo allora $\beta : [0, 1] \longrightarrow X$ tale che $\beta(t) = \alpha(1 - t)$, e osserviamo che è continua in quanto composizione di funzioni continue. Allora, poiché $\beta(0) = y, \beta(1) = x$, si ha che $y \sim x$.

(iii) \sim è transitiva. Siano $\alpha, \beta : [0, 1] \longrightarrow X$ continue con $\alpha(0) = x, \alpha(1) = \beta(0) = y, \beta(1) = z$. Definiamo allora la GIUNZIONE di α e β nel seguente modo:

$$(\alpha * \beta)(t) = \begin{cases} \alpha(2t) & \text{se } t \in [0, 1/2] \\ \beta(2t - 1) & \text{se } t \in [1/2, 1] \end{cases}$$

Allora abbiamo che:

$$\begin{aligned} (\alpha * \beta)(0) &= \alpha(0) = x \\ (\alpha * \beta)\left(\frac{1}{2}\right) &= \alpha(1) = \beta(0) = y \\ (\alpha * \beta)(1) &= \beta(1) = z \end{aligned}$$

Allora $[0, 1] = [0, 1/2] \cup [1/2, 1]$ è un ricoprimento chiuso localmente finito, di conseguenza è fondamentale, e quindi $\alpha * \beta$ è continua in quanto le sue restrizioni sono continue.

Esempio 3.2.19. $X = X_1 \cup X_2$ dove:

$$X_1 = \{(0, t) \mid |t| \leq 1\} \quad X_2 = \left\{ \left(x, \sin \frac{1}{x} \right) \mid x > 0 \right\}$$

X ha due componenti connesse per archi: X_1 e X_2 . Infatti:

$$\begin{aligned} X_2 &= X \cap \{x > 0\} && \text{aperta, non chiusa} \\ X_1 &= X \cap \{x = 0\} && \text{chiusa, non aperta} \end{aligned}$$

Dunque in generale le componenti connesse per archi non sono né aperte né chiuse.

Proposizione 3.2.20. Supponiamo che ogni punto abbia un intorno connesso. Allora le componenti connesse sono aperte.

Dimostrazione. Sia $x \in X$, con $C(x)$ la sua componente connessa. Sia $y \in C(x)$, e sia $U \in I(y)$ intorno connesso. Allora $C(x) \cup U$ è unione di due connessi che si intersecano in y , e quindi $U \subset C(x)$. \square

Proposizione 3.2.21. Supponiamo che ogni punto abbia un intorno connesso per archi. Allora le componenti connesse per archi sono aperte, e coincidono con le componenti connesse.

Dimostrazione. Sia $x \in X$, con $C_a(x)$ la sua componente connessa per archi. Sia $y \in C_a(x)$, e sia $U \in I(y)$ intorno componente connessa per archi. Allora

$C_a(x) \cup U$ è connesso per archi, e quindi $U \subset C_a(x)$. Vediamo adesso che $C_a(x) = C(x)$. Chiaramente, $C_a(x) \subset C(x)$ aperto, infatti:

$$C(x) = \bigsqcup_{y \in C(x)} C_a(y)$$

Allora $C(x) \setminus C_a(x)$ è aperto e $C(x)$ è connesso, quindi $C_a(x) = C(x)$. \square

Definizione 3.2.22. X è detto LOCALMENTE CONNESSO se ogni punto ammette un sistema fondamentale di intorno connessi.

Definizione 3.2.23. X è detto LOCALMENTE CONNESSO PER ARCHI se ogni punto ammette un sistema fondamentale di intorno connessi per archi.

Esempio 3.2.24. $(\mathbb{R} \times \{0\}) \cup (\mathbb{Q} \times \mathbb{R})$ è uno spazio connesso per archi non localmente connesso.

3.3 Compattezza

Definizione 3.3.1. Uno spazio topologico X è COMPATTO se ogni suo ricoprimento aperto ammette un sottoricoprimento finito, cioè se dato $\mathcal{U} = \{U_i\}_{i \in I}$ t.c. $X = \bigcup_{i \in I} U_i$ esistono i_0, \dots, i_n t.c. $X = U_{i_0} \cup \dots \cup U_{i_n}$. Un sottospazio $Y \subseteq X$ è compatto se lo è con la topologia di sottospazio.

Definizione 3.3.2. Uno spazio metrico X è LIMITATO se esistono $X_0 \in X$ e $R > 0$ t.c. $X = B(x_0, R)$ o equivalentemente se $\text{diam}(X) = \sup \{d(x, y), x, y \in X\} < +\infty$.

Lemma 3.3.3. Se X è metrico compatto, allora X è limitato.

Dimostrazione. Scelto $x_0 \in X$, $U_n = B(x_0, n), n \in \mathbb{N}$ è un ricoprimento aperto di X . Esistono allora i_0, \dots, i_n t.c. $X = U_{i_0} \cup \dots \cup U_{i_n}$. Poniamo allora $R = \max\{i_0, \dots, i_n\}$ e otteniamo $X = B(x_0, R)$. \square

Corollario 3.3.4. \mathbb{R} non è compatto.

Osservazione 3.3.5. La compattezza è invariante per omeomorfismo, dunque $(-1, 1)$ non è compatto in quanto omeomorfo a \mathbb{R} tramite $x \mapsto \tan \frac{\pi}{2}x$, con inversa $y \mapsto \frac{2}{\pi} \tan^{-1} y$. Segue, per omeomorfismo affine con $(-1, 1)$, che nessun intervallo aperto (a, b) è compatto.

Corollario 3.3.6. Metrico e limitato non implica compatto.

Teorema 3.3.7. $[0, 1]$ è compatto.

Dimostrazione. Sia $\mathcal{U} = \{U_i\}_{i \in I}$ un ricoprimento aperto di $[0, 1]$ e consideriamo $t_0 = \sup A$ dove $A = \{t \in [0, 1] \text{ t.c. } c' \text{ è un sottoricoprimento finito che ricopre } [0, t]\}$. Chiaramente l'insieme è non vuoto e contiene elementi maggiori di 0, infatti c'è un aperto U_{i_0} che contiene 0 e dunque contiene un intervallo della forma $[0, \varepsilon)$, $\varepsilon > 0$: qualunque numero maggiore di 0 e minore di ε sta dunque in A . Il sup di A è anche un massimo: infatti esiste un aperto $U_{i_{t_0}}$ che contiene t_0 , dunque contiene un intorno della forma $(t_0 - \delta, t_0]$. Prendendo allora un sottoricoprimento finito che ricopre $[0, t_0 - \delta/2]$ è aggiungendoci $U_{i_{t_0}}$ otteniamo un sottoricoprimento finito che ricopre $[0, t_0]$, da cui $t_0 \in A$ e dunque è un massimo. Supponiamo per assurdo che $t_0 \neq 1$, cioè $0 < t_0 < 1$, allora sempre in $U_{i_{t_0}}$ c'è un intorno della forma $[t_0, t_1)$ con $t_0 < t_1 < 1$, quindi tutti i punti in (t_0, t_1) stanno in A , contro la massimalità di t_0 , assurdo. \square

Teorema 3.3.8. $f : X \rightarrow Y$ continua, X compatto $\Rightarrow f(X)$ compatto.

Dimostrazione. Sia $\{U_i\}$ un ricoprimento aperto di $f(X)$ con gli U_i aperti di $f(X)$, allora esistono $\{V_i\}$ aperti di Y t.c. $U_i = f(X) \cap V_i$. Allora $\{f^{-1}(U_i)\}$ è un ricoprimento di X e $f^{-1}(U_i) = f^{-1}(f(X) \cap V_i) = f^{-1}(f(X)) \cap f^{-1}(V_i) = X \cap f^{-1}(V_i)$ (il penultimo uguale è vero perché $f^{-1}(V_i) \subseteq f^{-1}(f(X))$), dunque per la continuità di f è un'intersezione di un aperto con tutto, cioè è aperto, dunque $\{f^{-1}(U_i)\}$ è un ricoprimento aperto di X , ne estraiamo un sottoricoprimento, prendiamo le immagini degli aperti così trovati e questi sono un sottoricoprimento finito di $f(X)$ estratto da $\{U_i\}$. \square

Fatto 3.3.9. I seguenti sono fatti banali:

- (i) ogni spazio finito è compatto;
- (ii) unione finita di spazi compatti è compatta.

Teorema 3.3.10. X compatto, $Y \subseteq X$ chiuso $\Rightarrow Y$ compatto.

Dimostrazione. Sia $\{U_i\}$ un ricoprimento di Y con gli U_i aperti di Y , allora per ogni i esiste un V_i aperto di X t.c. $U_i = Y \cap V_i$ e $\{V_i\}$ è ancora un ricoprimento di Y . Notiamo che anche $W = X \setminus Y$ è un aperto e dunque $\{V_i\} \cup \{W\}$ è un ricoprimento aperto di X . Allora, essendo X compatto, esiste un sottoricoprimento finito $W, V_{i_0}, \dots, V_{i_n}$ (a priori, W potrebbe non essere necessario, ma aggiungerlo non cambia niente). Essendo $W \cap Y = \emptyset$ dev'essere che V_{i_0}, \dots, V_{i_n} ricoprono Y , dunque i rispettivi U_{i_0}, \dots, U_{i_n} sono il sottoricoprimento finito cercato. \square

Osservazione 3.3.11. Abbiamo visto (e useremo ancora) che $Y \subseteq X$ è compatto se e solo se per ogni famiglia $\{U_i\}_{i \in I}$ di aperti di X t.c. $Y \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i$ esiste

$\mathcal{I} \subseteq I$ finito con $Y \subseteq \bigcup_{i \in \mathcal{I}} U_i$.

Esempio 3.3.12. Sia X un insieme con la topologia cofinita, allora ogni sottoinsieme di X è compatto. Infatti, sia $Y \subseteq X$ e supponiamo $Y \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i$, U_i aperti di X . Se $Y = \emptyset$ allora è compatto, altrimenti esiste $y_0 \in Y$ e $y_0 \in U_{i_0}$ per qualche $i_0 \in I$. Poiché $X \setminus U_{i_0}$ è finito, anche $Y \setminus U_{i_0}$ è finito, diciamo $Y \setminus U_{i_0} = \{y_1, \dots, y_n\}$, allora per ogni $j = 1, \dots, n$ esiste i_j con $y_j \in U_{i_j}$ e dunque $Y \subseteq U_{i_0} \cup U_{i_1} \dots \cup U_{i_n}$. Ad esempio, se $X = \mathbb{Z}$ con la topologia cofinita, $\mathbb{N} \subseteq \mathbb{Z}$ è compatto ma non chiuso.

Teorema 3.3.13. Sia X spazio topologico T2, $Y \subseteq X$, Y compatto. Allora Y è chiuso.

Dimostrazione. Dimostriamo che $X \setminus Y$ è aperto. Sia $x \in X \setminus Y$. Dato che X è T2, per ogni $y \in Y$ esistono due aperti disgiunti U_y, V_y t.c. $x \in U_y, y \in V_y$. $\{V_y\}_{y \in Y}$ è un ricoprimento aperto di Y , che è compatto, dunque esiste un sottoricoprimento finito V_{y_1}, \dots, V_{y_n} . Notiamo allora che $V = V_{y_1} \cup \dots \cup V_{y_n}$, $U = U_{y_1} \cap \dots \cap U_{y_n}$ sono aperti disgiunti t.c. $Y \subseteq V, x \in U$. In particolare, U è un intorno aperto di x disgiunto da Y e, dato che lo possiamo trovare per ogni $x \in X \setminus Y$, possiamo concludere che $X \setminus Y$ è aperto e dunque Y è chiuso. \square

Lemma 3.3.14. X compatto T2 $\Rightarrow X$ regolare.

Dimostrazione. T2 \Rightarrow T1, dobbiamo dimostrare T3. Siano $Y \subseteq X$ chiuso, $x_0 \in X \setminus Y$. Dal teorema 3.3.10 Y è compatto, prendendo gli aperti U, V della dimostrazione del teorema 3.3.13 abbiamo esattamente quello che ci serve per soddisfare T3. \square

Teorema 3.3.15. X compatto T2 $\Rightarrow X$ normale.

Dimostrazione. T2 \Rightarrow T1, dobbiamo dimostrare T4. Siano C e D due chiusi disgiunti in X . Dal lemma 3.3.14 sappiamo che X è regolare, dunque per ogni $x \in C$ esistono U_x, V_x aperti disgiunti $x \in U_x, D \subseteq V_x$. $\{U_x\}_{x \in C}$ è un ricoprimento aperto di C , che per il teorema 3.3.10 è compatto, dunque esiste un sottoricoprimento finito U_{x_1}, \dots, U_{x_n} . Allora prendendo $U = U_{x_1} \cup \dots \cup U_{x_n}$, $V = V_{x_1} \cap \dots \cap V_{x_n}$ abbiamo che sono due aperti disgiunti t.c. $C \subseteq U, D \subseteq V$, che è esattamente quello che ci serve per dimostrare T4. \square

Proposizione 3.3.16. X T2, $C, D \subseteq X$ compatti e disgiunti, allora esistono U, V aperti disgiunti con $C \subseteq U, D \subseteq V$.


Dimostrazione. Dato che sfrutta le stesse idee delle dimostrazioni precedenti, è lasciata come esercizio al lettore. \square

Teorema 3.3.17. X spazio topologico, $Y_i, i \in I$ famiglia di sottoinsiemi chiusi con Y_{i_0} compatto per qualche $i_0 \in I$. Se per ogni $J \subseteq I$ finito vale che $\bigcap_{i \in J} Y_i \neq \emptyset$

(PROPRIETÀ DELL'INTERSEZIONE FINITA), allora $\bigcap_{i \in I} Y_i \neq \emptyset$.

Dimostrazione. Per ogni $i \in I, i \neq i_0$, sia $Z_i = Y_{i_0} \cap Y_i$. Z_i è un chiuso di Y_{i_0} , dunque $W_i = Y_{i_0} \setminus Z_i = Y_{i_0} \setminus Y_i$ è un aperto di Y_{i_0} . Quindi, se per assurdo $\bigcap_{i \in I} Y_i = \emptyset$, avremmo che $\{W_i, i \in I\}$ sarebbe un ricoprimento aperto di Y_{i_0} .

Allora, per compattezza di Y_{i_0} , esiste un sottoricoprimento finito W_{i_1}, \dots, W_{i_n} , cioè $Y_{i_0} = W_{i_1} \cup \dots \cup W_{i_n} = (Y_{i_0} \setminus Y_{i_1}) \cup \dots \cup (Y_{i_0} \setminus Y_{i_n}) = Y_{i_0} \setminus (Y_{i_1} \cap \dots \cap Y_{i_n}) \Rightarrow \Rightarrow Y_{i_0} \cap Y_{i_1} \cap \dots \cap Y_{i_n} = \emptyset$, assurdo. \square

Esempio 3.3.18. Serve un Y_i compatto: $X = \mathbb{R}, Y_n = [n, +\infty)$ è un controesempio. 

Corollario 3.3.19. Se $Y_n, n \in \mathbb{N}$ è una famiglia di sottoinsiemi non vuoti di X con Y_0 compatto, Y_i chiuso per ogni $i \in \mathbb{N}$, $Y_{n+1} \subseteq Y_n$ per ogni $n \in \mathbb{N}$, allora $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} Y_n \neq \emptyset$.

Lemma 3.3.20. Sia X spazio topologico e \mathcal{B} una base di X . Se ogni ricoprimento di X con aperti di \mathcal{B} ammette un sottoricoprimento finito, allora X è compatto.

Dimostrazione. Sia $\mathcal{U} = \{U_i\}_{i \in I}$ un qualsiasi ricoprimento aperto di X . Per definizione di ricoprimento si ha che per ogni $x \in X$ esiste $i(x) \in I$ t.c. $x \in U_{i(x)}$ e per definizione di base esiste $B_x \in \mathcal{B}$ t.c. $x \in B_x \subseteq U_{i(x)}$. $\{B_x\}_{x \in X}$ è un ricoprimento di X con aperti di \mathcal{B} (si dice che $\{B_x\}_{x \in X}$ è un *raffinamento* di \mathcal{U}). Per ipotesi esistono allora x_1, \dots, x_n t.c. $X = B_{x_1} \cup \dots \cup B_{x_n} \subseteq U_{i(x_1)} \cup \dots \cup U_{i(x_n)}$, da cui la tesi. \square

Teorema 3.3.21. X, Y compatti $\Rightarrow X \times Y$ compatto.

Dimostrazione. Per il lemma 3.5, possiamo partire da un ricoprimento $\mathcal{U} = \{U_i \times V_i\}_{i \in I}$ dove U_i è aperto in X , V_i è aperto in Y per ogni $i \in I$. Per ogni $x \in X$ il sottoinsieme $\{x\} \times Y \subseteq X \times Y$ è compatto in quanto omeomorfo a Y , per cui esiste $J_x \subseteq I$ finito t.c. $\{x\} \times Y \subseteq \bigcup_{i \in J_x} (U_i \times V_i)$. Poniamo $U_x = \bigcap_{i \in J_x} U_i$, è aperto

in quanto intersezione finita di aperti e per costruzione $U_x \times Y \subseteq \bigcup_{i \in J_x} (U_i \times V_i)$.

Per compattezza di X e poiché $\{U_x\}_{x \in X}$ è un ricoprimento aperto, abbiamo che

$X = U_{x_1} \cup \dots \cup U_{x_n}$ per qualche x_1, \dots, x_n . Allora $X \times Y = \bigcup_{k=1}^n (U_{x_k} \times Y) \subseteq \bigcup_{k=1}^n \bigcup_{i \in J_{x_k}} (U_i \times V_i)$, da cui la tesi. \square

Osservazione 3.3.22. Se $A \subseteq X, B \subseteq Y$, la topologia prodotto di $A \times B$, ciascuno dotato della topologia di sottospazio, coincide con la topologia di sottospazio di $X \times Y$. Dunque, per il teorema 3.3.21, se A, B sono sottospazi compatti, $A \times B$ è un sottospazio compatto di $X \times Y$.

Proposizione 3.3.23. $C \subseteq \mathbb{R}^n$ è compatto \Leftrightarrow è chiuso e limitato.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Segue dal fatto che \mathbb{R}^n è un metrico T2, dal lemma 3.3.3 e dal teorema 3.3.13.

(\Leftarrow) Se C è limitato, esiste $R > 0$ t.c. $C \subseteq [-R, R]^n \subseteq \mathbb{R}^n$, e $[-R, R]^n$ è compatto in quanto prodotto finito di copie del compatto $[-R, R]$ (che è compatto perché isomorfo a $[0, 1]$), quindi C , essendo chiuso in un compatto, è compatto per il teorema 3.3.10. \square

Teorema 3.3.24. $f : X \rightarrow Y$ continua, X compatto, Y T2, allora f è chiusa.

Dimostrazione. Se $C \subseteq X$ è chiuso, allora è chiuso in un compatto, dunque per il teorema 3.3.10 è compatto, quindi per il teorema 3.3.8 $f(C)$ è compatto in Y , allora è compatto in un T2, dunque per il teorema 3.3.13 è chiuso. \square

Definizione 3.3.25. X spazio topologico si dice COMPATTAMENTE GENERATO se i compatti di X formano un ricoprimento fondamentale.

Lemma 3.3.26. Se ogni $x \in X$ ha un intorno compatto, X è compattamente generato.

Dimostrazione. Basta far vedere che se $A \subseteq X$ è t.c. $A \cap K$ è aperto in K per ogni compatto $K \subseteq X$, allora A è aperto in X . Sia $p \in A$, basta mostrare che $p \in A^\circ$. Per ipotesi esiste un intorno compatto K di p , cioè $p \in K^\circ \subseteq K$. Ora, $A \cap K^\circ$ è aperto in K° , ed è perciò aperto in X in quanto aperti di aperti sono aperti, dunque $p \in A \cap K^\circ \subseteq A$, ma $A \cap K^\circ$ è un aperto, da cui $p \in A^\circ$ come voluto. \square

Definizione 3.3.27. $f : X \rightarrow Y$ continua è PROPRIA se $f^{-1}(K)$ è un compatto di X per ogni $K \subseteq Y$ compatto.

Esempio 3.3.28. $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ continua è propria se e solo se per ogni successione $\{x_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ con $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|x_n\| = +\infty$ si ha che $\lim_{n \rightarrow +\infty} \|f(x_n)\| = +\infty$. La dimostrazione è lasciata per esercizio al lettore.

Teorema 3.3.29. $f : X \rightarrow Y$ continua e propria. Se Y è T2 e compattamente generato, allora f è chiusa.

Dimostrazione. Sia $C \subseteq X$ chiuso. Poiché Y è compattamente generato, basta vedere che $f(C) \cap K$ è chiuso in K per ogni $K \subseteq Y$ compatto. Ora $f(C) \cap K = f(C \cap f^{-1}(K))$. Poiché f è propria, $f^{-1}(K)$ è compatto, per cui $C \cap f^{-1}(K)$ è chiuso in compatto, perciò è compatto per il lemma 3.3.10, dunque $f(C \cap f^{-1}(K))$ è compatto in Y che è T2, che è chiuso per il lemma 3.3.13, da cui la tesi. \square

Esempio 3.3.30. Ogni punto di \mathbb{R}^n ha un intorno compatto $\Rightarrow \mathbb{R}^n$ è compattamente generato, dunque se $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ è propria, è chiusa. Se invece consideriamo $\pi : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ t.c. $\pi(x, y) = x$, non è propria poiché $\pi^{-1}(\{0\}) = \{0\} \times \mathbb{R}$, che non è compatto, e infatti non è neanche chiusa (si consideri ad esempio l'iperbole).

Esempio 3.3.31. Nessun $p \in \mathbb{Q}$ ammette un intorno compatto (in \mathbb{Q}). Infatti se $U \subseteq \mathbb{Q}$ è un intorno di p in \mathbb{Q} , esiste $V \subseteq \mathbb{Q}$ aperto di \mathbb{Q} con $p \in V \subseteq U$, perciò esiste $\varepsilon > 0$ t.c. $p \in ((p - \varepsilon, p + \varepsilon) \cap \mathbb{Q}) \subseteq U$. Se U fosse compatto sarebbe compatto anche in \mathbb{R} (ad esempio perché immagine della sua immersione, che è una funzione continua), dunque sarebbe chiuso in \mathbb{R} , per cui avremmo $\overline{(p - \varepsilon, p + \varepsilon) \cap \mathbb{Q}} = [p - \varepsilon, p + \varepsilon] \subseteq U \subseteq \mathbb{Q}$ (dove la chiusura è in \mathbb{R}), assurdo.

Teorema 3.3.32. Sia X uno spazio compatto e $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ continua. Allora $f(X)$ ha massimo e minimo.

Dimostrazione. Si ha che $f(X)$ è un compatto di \mathbb{R} , dunque chiuso e limitato. Dalla limitatezza si ha che il *sup* e l'*inf* esistono finiti, mentre dalla chiusura si ottiene che appartengono anche all'immagine. \square

Definizione 3.3.33. Un insieme A si dice (*parzialmente*) *ordinato* se esiste su di esso una relazione d'ordine \leq tale che sia:

- (i) riflessiva, cioè $a \leq a$ per ogni $a \in A$;
- (ii) antisimmetrica, cioè $a \leq b \wedge b \leq a \Rightarrow a = b$;
- (iii) transitiva, cioè $a \leq b \wedge b \leq c \Rightarrow a \leq c$.

Talvolta, per indicare $a \leq b$, scriveremo anche $b \geq a$. Un insieme ordinato A si dice *totalmente ordinato* se per ogni $a, b \in A$ vale $a \leq b$ o $b \leq a$.

Definizione 3.3.34. Sia A un insieme parzialmente ordinato, un sottoinsieme $C \subseteq A$ è detto *catena* se C è un insieme totalmente ordinato con la relazione d'ordine indotta da A .

Definizione 3.3.35. Sia $B \subseteq A$, un elemento $m \in A$ si dice *maggiorante* di B se $b \leq m$ per ogni $b \in B$.

Definizione 3.3.36. Sia A un insieme parzialmente ordinato. Un elemento $m \in A$ si dice *massimale* se, per ogni $a \in A$, $m \leq a \Rightarrow a = m$.

Teorema 3.3.37. (Lemma di Zorn). Dato un insieme A parzialmente ordinato non vuoto, se ogni catena di A ammette maggiorante, allora A ammette almeno un elemento massimale.

Osservazione 3.3.38. Il lemma di Zorn è equivalente all'assioma della scelta, e la sua dimostrazione è ben al di fuori dagli scopi del corso.

Teorema 3.3.39. (di Alexander). Sia X uno spazio topologico e sia \mathcal{P} una sua prebase. Se da ogni ricoprimento di X con elementi di \mathcal{P} si può estrarre un sottoricoprimento finito, allora X è compatto.

Dimostrazione. Per assurdo, sia X non compatto. Definiamo

$$\Omega = \{\mathcal{F} \text{ ricoprimento di } X \text{ da cui non si può estrarre un sottoricoprimento finito}\}$$

Ordiniamo Ω con l'inclusione tra insiemi. Voglio applicare il lemma di Zorn a Ω per dire che contiene un massimale. Per l'ipotesi dell'assurdo Ω non è vuoto. Sia allora C una catena,

$$C = \{U_i\}_{i \in I}$$

con tutti gli U_i ricoprimenti aperti. Definisco

$$U = \bigcup_{i \in I} U_i$$

Chiaramente U è un maggiorante di C . Voglio far vedere che $U \subseteq \Omega$. Allora per assurdo siano A_1, \dots, A_n aperti di U che ricoprono X . Ogni A_j appartiene ad un certo U_{i_j} . Poiché C è una catena, tutti gli U_{i_j} sono "inscatolati", e quindi vi è un U_s fra questi che contiene tutti gli A_j . Ma questo non è possibile perché gli U erano scelti tali che non si poteva estrarre un sottoricoprimento finito. Quindi posso effettivamente applicare Zorn e ottenere un ricoprimento Z massimale.

Se mostro che $\mathcal{P} \cap Z$ è ricoprimento di X ho l'assurdo che cercavo perché da quella intesezione non posso estrarre alcun sottoricoprimento finito (per come è costruito Z).

Sia $x \in X$, $Z = \{Z_i\}_{i \in I}$. Allora esiste i per cui $x \in Z_i$. Dunque esiste un B nella base associata a \mathcal{P} per cui $x \in B \subseteq Z_i$. Posso quindi prendere P_1, \dots, P_n in \mathcal{P} tali che la loro intersezione sia B . Vorrei trovare un P_j che sta anche in Z . Per assurdo supponiamo che nessun P_j sia in Z . Allora considero $\{P_j\} \cup Z$, che per massimalità di Z non appartiene a Ω . Allora potrei scegliere un ricoprimento finito $P_j, V_{j,1}, \dots, V_{j,m}$, con i $V_{j,i}$ in Z . Ma quindi avrei

$$X = \left(\bigcap_{j=1}^n P_j \right) \cup \bigcup_{j=1}^n \bigcup_{s=1}^m V_{j,s} \subseteq Z_i \cup \bigcup_{j=1}^n \bigcup_{s=1}^m V_{j,s} = X.$$

Questo è assurdo in quanto ho appena trovato un sottoricoprimento finito di Z . Quindi ho finito, osservando che $P_j \in \mathcal{P} \cap Z$. \square

Teorema 3.3.40. (di Tychonoff). Siano X_i con $i \in I$ spazi compatti. allora

$$X = \prod_{i \in I} X_i$$

è compatto.

Dimostrazione. Per il teorema di Alexander, possiamo restringerci a un ricoprimento \mathcal{U} fatto con aperti della prebase. Scegliamo la prebase canonica, allora si ha $\mathcal{U} = \bigcup_{i \in I} \mathcal{A}_i$, $\mathcal{A}_i = \{\pi_i^{-1}(D), D \in \mathcal{D}_i\}$ dove \mathcal{D}_i è una famiglia di aperti di X_i per ogni $i \in I$ e π_i sono le proiezioni. Mostriamo che esiste $i_0 \in I$ per cui \mathcal{D}_{i_0} è un ricoprimento di X_{i_0} . Se per assurdo così non fosse, per ogni $i \in I$ esisterebbe $x_i \in X_i$ t.c. $x_i \notin \bigcup_{D \in \mathcal{D}_i} D$, allora l'elemento $(x_i)_{i \in I}$ non apparterebbe ad alcun elemento di \mathcal{U} , assurdo. Ma allora, dato che X_{i_0} è compatto, \mathcal{D}_{i_0} ammette, in quanto ricoprimento aperto, un sottoricoprimento finito D_1, \dots, D_n e $\{\pi_{i_0}^{-1}(D_1), \dots, \pi_{i_0}^{-1}(D_n)\}$ è il sottoricoprimento finito di \mathcal{U} cercato. \square

Esempio 3.3.41. Sia X un insieme, $A \subseteq \mathbb{R}$, $Fun(X, A) = \{f : X \rightarrow A\} = A^X$. Dotando A^X della topologia prodotto (A ha la topologia euclidea) si ottiene la topologia detta della convergenza puntuale.

Lemma 3.3.42. Siano $A \subseteq \mathbb{R}$, $\{f_n\}_{n \in \mathbb{N}}$, $f_n : X \rightarrow A$, allora $f_n \rightarrow f$ puntualmente $\Leftrightarrow f_n \rightarrow f$ in A^X .

Dimostrazione. La dimostrazione è molto semplice, ma per comprenderla al volo è necessaria un po' dimestichezza con basi, prebasi, topologia prodotto e "traduzioni in matematiche". Sono tutti dei se e solo se e i vari statement sono ridotti il più possibile a stringhe di simboli, quindi se non capite bene un enunciato o un passaggio non disperatevi: è tutto scritto in modo poco comprensibile, prendetelo come un buon esercizio per applicare ciò che avete imparato. Scusate.

$f_n \rightarrow f$ puntualmente $\Leftrightarrow \forall x \in X, f_n(x) \rightarrow f(x) \Leftrightarrow \forall x \in X \forall \varepsilon > 0, \exists n_{x,\varepsilon} | \forall n \geq n_{x,\varepsilon}, |f_n(x) - f(x)| < \varepsilon \Leftrightarrow \forall x \in X, B \in \mathcal{B}$ base della topologia euclidea su A t.c. $f \in \pi_x^{-1}(B), \exists n_{x,B} | \forall n \geq n_{x,B}, f_n \in \pi_x^{-1}(B) \Leftrightarrow \forall x \in X, B \subseteq A$ aperto t.c. $f \in \pi_x^{-1}(B), \exists n_{x,B} | \forall n \geq n_{x,B}, f_n \in \pi_x^{-1}(B) \Leftrightarrow \forall P \in \mathcal{P}$ prebase della topologia prodotto sua A^X t.c. $f \in P, \exists n_P | \forall n \geq n_P, f_n \in P \Leftrightarrow \forall U \subseteq A^X | f \in U^\circ, \exists n_U | \forall n \geq n_U, f_n \in U \Leftrightarrow f_n \rightarrow f$ in A^X . \square

3.4 Compattificazione di Alexandroff ed esaustioni

Esempio 3.4.1. Sia $p = (1, 0, \dots, 0)$ un punto di S^n . Voglio far vedere che $S^n \setminus \{p\}$ è isomorfo a \mathbb{R}^n . In effetti la proiezione stereografica mi fornisce la mappa

$$f: (x_0, \dots, x_n) \mapsto \left(\frac{x_1}{1-x_0}, \dots, \frac{x_n}{1-x_0} \right)$$

che è un isomorfismo.

Si ha anche che aggiungendo p allo spazio di partenza si ha un compatto che contiene isomorficamente \mathbb{R}^n . Lo scopo della sezione è quello di generalizzare questa idea. Cioè ottenere un compatto che contiene uno spazio dato aggiungendo un punto.

Definizione 3.4.2. Sia (X, τ) uno spazio topologico. Sia anche $\hat{X} = X \cup \{\infty\}$. Definisco

$$\hat{\tau} = \tau \cup \{\hat{X} \setminus K \mid K \subseteq X \text{ chiuso e compatto}\}$$

Allora $(\hat{X}, \hat{\tau})$ è detta COMPATTIFICAZIONE DI ALEXANDROFF.

Osservazione 3.4.3. $(\hat{X}, \hat{\tau})$ è uno spazio topologico compatto e vi è una naturale immersione aperta da X a \hat{X} .

Definizione 3.4.4. Uno spazio topologico si dice LOCALMENTE COMPATTO se ogni suo punto ammette un intorno compatto.

Proposizione 3.4.5. La compactificazione di uno spazio X è T2 se e solo se X è T2 e localmente compatto.

Dimostrazione. Hint: la dimostrazione, come molte di quelle che riguardano la compactificazione, si fa distinguendo il caso in cui si prende un punto di X e quello in cui si prende il punto ∞ . \square

Proposizione 3.4.6. Sia $f: X \rightarrow Y$ un'immersione aperta tra spazi T2. Si definisca $g: Y \rightarrow \hat{X}$ con

$$g(y) = \begin{cases} x & \text{se } f^{-1}(y) = \{x\} \\ \infty & \text{se } f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases}$$

Allora g è continua.

Dimostrazione. Hint: si prende un aperto nello spazio compactificato e si cerca di dire che la sua controimmagine è aperta. Per farlo si distingue il caso in cui l'infinito è nell'aperto da quello in cui non è nell'aperto. \square

Corollario 3.4.7. Dato uno spazio X T2 compatto, esso è isomorfo alla compattificazione di X privato di un punto.

Proposizione 3.4.8. Sia $f: X \rightarrow Y$ continua con Y T2. Si prenda $\hat{f}: \hat{X} \rightarrow \hat{Y}$ che manda x in $f(x)$ e l'infinito nell'infinito. Allora \hat{f} è continua se e solo se f è propria.

Definizione 3.4.9. Sia X uno spazio topologico. Un'ESAUSTIONE IN COMPATTI di X è una famiglia $\{K_n\}_{n \in \mathbb{N}}$ di compatti di X tali che $K_n \subseteq K_{n+1}^\circ$ e $\bigcup_n K_n = X$.

Proposizione 3.4.10. Sia K_n un'esaustione in compatti e H un compatto. Allora H è contenuto in K_i per qualche i .

Dimostrazione. Poiché $H \subseteq \bigcup_n K_n^\circ$, H è contenuto in un'unione finita di K_i , allora è contenuto nel più grande di questi. \square

Esempio 3.4.11. $\mathbb{R} \times (0, 1)$ non è isomorfo a $\mathbb{R} \times [0, 1]$.

Dimostrazione. Si ha che $K_n = [-n, n] \times [\frac{1}{n}, 1 - \frac{1}{n}]$ è un esaustione in compatti di $\mathbb{R} \times (0, 1)$, mentre $H = \{0\} \times [0, 1]$ è un compatto dell'altro spazio. Però l'immagine isomorfa di H non è contenuta in alcun K . Quindi si ha un assurdo. \square

Definizione 3.4.12. Dato X spazio topologico, $\pi_0(X)$ è l'insieme delle componenti connesse per archi di X .

Esempio 3.4.13. \mathbb{R}^n privato di s punti non è isomorfo a \mathbb{R}^n privato di t punti per $s \neq t$.

Dimostrazione. L'idea di base è quella di prendere esaustioni in compatti dei due spazi. Allora i compatti delle esaustioni (almeno definitivamente) avranno un buco per ogni punto tolto. Per ottenere un assurdo, basta contare le componenti connesse delle esaustioni. \square

3.5 Compattezza per successioni

Sia $\{a_n\}$ una successione a valori in X spazio topologico, allora una sottosuccessione di $\{a_n\}$ è una sottofamiglia $\{a_{n_i}\}$, dove $n_i, i = 1, 2, \dots$ è una successione strettamente crescente in \mathbb{N} (si tratta di una successione indicizzata da i).

Definizione 3.5.1. Uno spazio topologico X si dice COMPATTO PER SUCCESSIONI se ogni successione in X ammette una sottosuccessione convergente.

Proposizione 3.5.2. Sia X spazio topologico primo numerabile. Se X è compatto, allora è anche compatto per successioni.

Dimostrazione. Sia $\{x_n\} \subseteq X$ una successione. Per ogni $m \in \mathbb{N}$ sia $C_m = \{x_n, n \geq m\}$. Per ogni m , C_m è chiuso e $C_{m+1} \subseteq C_m$. Per il teorema 3.3.17, $\bigcap_{m \in \mathbb{N}} C_m \neq \emptyset$. Sia $\bar{x} \in \bigcap_{m \in \mathbb{N}} C_m$ cerchiamo una sottosuccessione che tende a \bar{x} . Sia $\{U_i\}_{i \in \mathbb{N}}$ un sistema fondamentale numerabile di intorno di \bar{x} e supponiamo senza perdita di generalità $U_{i+1} \subseteq U_i$ per ogni $i \in \mathbb{N}$. Costruiamo la sottosuccessione per induzione: $\bar{x} \in C_0 = \{x_n\} \Rightarrow$ esiste n_0 t.c. $x_{n_0} \in U_0$. Per ogni $i \geq 0$, $\bar{x} \in C_{n_i+1} = \{x_n, n \geq n_i + 1\} \Rightarrow$ esiste $n_{i+1} > n_i$ t.c. $x_{n_{i+1}} \in U_{i+1}$. È un semplice esercizio verificare che $\{x_{n_i}\}$ funziona. \square

Teorema 3.5.3. Sia X a base numerabile. Allora X è compatto \Leftrightarrow è compatto per successioni.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Per la proposizione 3.5.2 e il teorema 1.6.10 abbiamo immediatamente quest'implicazione.

(\Leftarrow) Mostriamo la contronominale. Sia X non compatto e sia \mathcal{U} un ricoprimento aperto di X che non ammette sottoricoprimenti finiti. X a base numerabile $\Rightarrow \mathcal{U}$ ammette un raffinamento numerabile, dunque un sottoricoprimento numerabile. In alternativa, per il lemma potevamo dire che esiste un ricoprimento con aperti di base che non ammette sottoricoprimenti finiti, ed essendo X a base numerabile potevamo scegliere quello come \mathcal{U} . Dunque senza perdita di generalità $\mathcal{U} = \{U_i\}_{i \in \mathbb{N}}$. Sia $x_i \in X \setminus (U_0 \cup U_1 \cup \dots \cup U_i)$, che è ben definita in quanto \mathcal{U} non ammette sottoricoprimenti finiti. Per assurdo, sia \bar{x} il limite di una sottosuccessione di $\{x_i\}$. Poiché $X = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} U_i$, $\bar{x} \in U_{i_0}$ per qualche $i_0 \in \mathbb{N}$. U_{i_0} aperto \Rightarrow è intorno di $\bar{x} \Rightarrow |\{i \in \mathbb{N} | x_i \in U_{i_0}\}| = |\mathbb{N}|$, dove l'ultima implicazione segue dal fatto che \bar{x} è il limite di una sottosuccessione, ma $x_i \notin U_{i_0}$ per ogni $i \geq i_0$ per definizione, assurdo. \square

Esempio 3.5.4.

Fatto 3.5.5. $Fun([0, 1], [0, 1])$ con la topologia della convergenza puntuale è compatto ma non compatto per successioni.

Dimostrazione. È compatto per il teorema di Tychonoff 3.3.40.

Siano $f_n : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ definite da $f_n(x) = 10^n x - \lfloor 10^n x \rfloor$. Allora $\{f_n\}$ non ha sottosuccessioni puntualmente convergenti. \square

3.6 Completezza e caratterizzazione dei metrici compatti

All'interno di tutto questo paragrafo, (X, d) indica uno spazio metrico.

Definizione 3.6.1. $\{x_n\} \subseteq X$ è di CAUCHY se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste n_0 t.c. $d(x_n, x_m) \leq \varepsilon$ per ogni $n, m \geq n_0$.

Lemma 3.6.2. Se $\{x_n\}$ è convergente, allora è di Cauchy.

Dimostrazione. Sia $x \in X$ il limite a cui converge $\{x_n\}$ e sia $\varepsilon > 0$, allora esiste n_0 t.c. per ogni $n \geq n_0$ $d(x_n, x) < \varepsilon/2$. Allora per la disuguaglianza triangolare si ha che per ogni $m, n \geq n_0$ vale che $d(x_n, x_m) \leq d(x_n, x) + d(x, x_m) < \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = \varepsilon$, da cui la tesi. \square

Definizione 3.6.3. (X, d) è **COMPLETO** se ogni successione di Cauchy in X converge.

Esempio 3.6.4. \mathbb{R}^n è completo.

Esempio 3.6.5. \mathbb{Q} non è completo.

Lemma 3.6.6. Sia $\{x_n\}$ di Cauchy, se ha una sottosuccessione convergente allora è convergente.

Dimostrazione. Sia $\{x_{n_i}\}$ la sottosuccessione che converge al limite $x \in X$ e sia $\varepsilon > 0$. Allora esiste i_0 t.c. per ogni $i \geq i_0$ $d(x_{n_i}, x) < \varepsilon/2$. Inoltre, esiste \bar{n} t.c. per ogni $n, m \geq \bar{n}$ $d(x_n, x_m) \leq \varepsilon/2$. Poniamo $n^* = \max\{n_{\bar{n}}, n_{i_0}\}$ dove abbiamo usato $n_{\bar{n}} \geq \bar{n}$ al posto di \bar{n} stesso per assicurarci che n^* faccia parte degli indici della sottosuccessione convergente. Si ha allora che per ogni $n \geq n^*$ $d(x_n, x) \leq d(x_n, x_{n^*}) + d(x_{n^*}, x) < \varepsilon/2 + \varepsilon/2 = \varepsilon$, da cui la tesi. \square

Corollario 3.6.7. (X, d) compatto per successioni $\Rightarrow (X, d)$ completo.

Lemma 3.6.8. Siano (X, d) spazio metrico completo, $Y \subseteq X$ con la metrica indotta, allora Y è completo $\Leftrightarrow Y$ è chiuso in X .

Dimostrazione. Per il fatto 1.6.9 e la proposizione 1.6.17, possiamo fare la dimostrazione supponendo o dimostrando (a seconda della freccia) Y chiuso per successioni.

(\Rightarrow) Sia $\{y_n\}$ una successione in Y convergente a un elemento di X . Per il lemma 3.6.2 sappiamo che $\{y_n\}$ è di Cauchy, ma stiamo supponendo Y completo, dunque $\{y_n\}$ converge in Y , dunque Y è chiuso per successioni. Notiamo che per quest'implicazione non era necessaria l'ipotesi (X, d) completo.

(\Leftarrow) Sia $\{y_n\}$ una successione di Cauchy in Y . Dato che X è completo, questa converge a un elemento di X , ma Y è chiuso per successioni, dunque l'elemento appartiene anche a Y e la successione converge in Y . \square

Definizione 3.6.9. (X, d) è **TOTALMENTE LIMITATO** se per ogni $\varepsilon > 0$ esiste un ricoprimento finito di X fatto con palle di raggio ε .

Lemma 3.6.10. (X, d) totalmente limitato implica (X, d) limitato.

Dimostrazione. Prendiamo $\varepsilon = 1$, fissiamo il centro x_0 di una delle palle e sia D la massima distanza tra x_0 e uno qualsiasi degli altri centri, che esiste perché le palle, dunque anche i loro centri, sono in numero finito. Allora è una banale applicazione della disuguaglianza triangolare verificare che la palla di centro x_0 e raggio $D + 1$ ricopre tutto X . \square

Esempio 3.6.11. Consideriamo su \mathbb{R} la distanza $d(x, y) = \min\{|x - y|, 1\}$, allora (\mathbb{R}, d) è limitato ma non totalmente limitato.

Proposizione 3.6.12. (X, d) totalmente limitato implica (X, d) a base numerabile.

Dimostrazione. Per la proposizione 1.6.5 basta vedere che X è separabile. Per la totale limitatezza, per ogni $n \geq 1$ esiste $F_n \subseteq X$ finito con $X = \bigcup_{p \in F_n} B(p, 1/n)$.

Allora $\bigcup_{n \geq 1} F_n$ è numerabile, mostriamo dunque che è denso. Sia dunque $U \subseteq X$ aperto non vuoto, allora esiste $n_0 \geq 1, z \in U$ con $B(z, 1/n_0) \subseteq U$. Abbiamo che $z \in B(p, 1/n_0)$ per qualche $p \in F_{n_0} \Rightarrow d(p, z) < 1/n_0 \Rightarrow p \in B(z, 1/n_0) \Rightarrow p \in U$, da cui la tesi. \square

Teorema 3.6.13. Sia (X, d) uno spazio metrico. Allora le seguenti sono equivalenti:

- (i) X è compatto;
- (ii) X è compatto per successioni;
- (iii) X è totalmente limitato e completo.

Dimostrazione. ((i) \Rightarrow (ii)) (X, d) è metrico, dunque per il fatto 1.6.9 è primo numerabile, allora per la proposizione 3.5.2 otteniamo che (i) \Rightarrow (ii).

((ii) \Rightarrow (iii)) Per il corollario 3.6.7 abbiamo che X è completo. Supponiamo per assurdo che non sia totalmente limitato. Allora esiste $\varepsilon > 0$ tale che non è possibile ricoprire X con un numero finito di palle di raggio ε . Fissiamo $x_0 \in X$ e definiamo $\{x_n\}$ induttivamente fissando $x_{n+1} \in X \setminus (B(x_0, \varepsilon) \cup B(x_1, \varepsilon) \cup \dots \cup B(x_n, \varepsilon))$, che esiste per l'ipotesi assurda. Allora dati due naturali qualsiasi $m \neq n$ abbiamo che $d(x_n, x_m) \geq \varepsilon$, quindi non si possono estrarre da $\{x_n\}$ sottosuccessioni di Cauchy, in particolare non si possono estrarre sottosuccessioni convergenti, assurdo perché siamo sotto l'ipotesi (ii).

((iii) \Rightarrow (i)) Per la proposizione 3.6.12 e per il teorema 3.5.3, sotto l'ipotesi (iii) abbiamo che (i) \Leftrightarrow (ii). Dimostriamo allora (ii). Sia $\{x_n\}$ una successione in X . X è completo per ipotesi, quindi basta trovare una sottosuccessione di Cauchy. Per totale limitatezza esiste un ricoprimento con un numero finito di palle di raggio 2^{-0} . Allora esiste una di queste palle che contiene infiniti $\{x_n\}$. Fissiamo n_0 come il minimo indice tale che x_{n_0} sta in questa palla e procediamo induttivamente. Abbiamo x_{n_i} che appartiene a una palla di raggio

2^{-i} contenente infiniti x_n (in particolare, infiniti di indice maggiore di n_i). Ricopriamo X con un numero finito di palle di raggio $2^{-(i+1)}$. Allora ce ne dev'essere una che contiene infiniti di quegli x_n che stavano nella palla di raggio 2^{-i} contenete x_{n_i} . Prendiamo dunque n_{i+1} come il minimo indice maggiore di n_i tale che $x_{n_{i+1}}$ sta nella palla di raggio $2^{-(i+1)}$ trovata. È una semplice verifica dimostrare che la sottosuccessione $\{x_{n_i}\}$ è di Cauchy. \square

Teorema 3.6.14. (*del numero di Lebesgue*) Sia (X, d) spazio metrico compatto, e sia \mathcal{U} ricoprimento aperto di X . Allora esiste $\varepsilon > 0$ tale che $\forall x \in X, \exists U \in \mathcal{U}$, con $B(x, \varepsilon) \subset U$.

Dimostrazione. Sia $X_n = \{x \in X \mid \exists U \in \mathcal{U} \text{ con } B(x, 2^{-n}) \subset U\}$. Vogliamo mostrare che esiste n tale che $X = X_n$. Vediamo le proprietà degli X_n :

$$(i) \quad X = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} X_n$$

$$(ii) \quad X_n \subset X_{n+1}$$

Vediamo che vale che $X_n \subset \overset{\circ}{X}_{n+1}$:

$$X = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \overset{\circ}{X}_n \implies X = \overset{\circ}{X}_n \text{ se } n \gg 0 \text{ in quanto per compattezza posso estrarre}$$

un sottoricoprimento finito. Sia $x \in X_n$, dunque $\exists U \in \mathcal{U}$ tale che $B(x, 2^{-n}) \subset U$. Vediamo allora che $B(x, 2^{-(n+1)}) \subset X_{n+1} \implies X_n \subset \overset{\circ}{X}_{n+1}$. Sia $y \in B(x, 2^{-(n+1)})$, allora mostro che $B(y, 2^{-(n+1)}) \subset U$ (e che dunque $y \in X_{n+1}$ per definizione): data

$$d(y, x) < \frac{1}{2^{n+1}}$$

prendiamo $z \in B(y, 2^{-(n+1)})$. Allora:

$$d(z, y) < \frac{1}{2^{n+1}} \quad d(z, x) < \frac{2}{2^{n+1}} = \frac{1}{2^n} \implies z \in B(x, 2^{-n}) \subset U$$

\square

Definizione 3.6.15. Dati (X, d_X) , (Y, d_Y) spazi metrici e $f : X \longrightarrow Y$, allora f è UNIFORMEMENTE CONTINUA se $\forall \varepsilon > 0$ esiste $\delta > 0$ tale che $d_Y(f(x), f(x')) < \varepsilon$ se $d_X(x, x') < \delta$.

Osservazione 3.6.16. Uniformemente continua \implies continua.

Teorema 3.6.17. (*di Heine-Cantor*) Siano (X, d_X) e (Y, d_Y) spazi metrici con X compatto. Allora se $f : X \longrightarrow Y$ è continua, è anche uniformemente continua.

Dimostrazione. Sia $\varepsilon > 0$. Cerchiamo δ tale che $f(B(x, \delta)) \subset B(f(x), \varepsilon)$ per ogni $x \in X$. Vale a dire che $B(x, \delta) \subset f^{-1}(B(f(x), \varepsilon))$. Applichiamo il teorema del numero di Lebesgue al ricoprimento aperto

$$\mathcal{U} = \{f^{-1}(B(f(x), \varepsilon))\}$$

Quindi $\exists \delta > 0$ tale che $\exists U \in \mathcal{U} : B(x, \delta) \subset U$. Dunque $\forall x \in X, \exists x' \in X$ con $B(x, \delta) \subset f^{-1}(B(f(x'), \varepsilon))$. Sia $y \in B(x, \delta)$, allora

$$f(y) \in B(f(x'), \varepsilon) \ni f(x) \implies d_Y(f(x), f(y)) < 2\varepsilon$$

□

Vediamo quindi alcuni esempi di spazi metrici completi.

Esempio 3.6.18. Sia X insieme arbitrario e Y spazio metrico completo, e sia:

$$\mathcal{B}(X, Y) = \{f : X \longrightarrow Y \mid f \text{ è limitata}\}$$

Allora $\mathcal{B}(X, Y)$ è uno spazio metrico completo con la distanza

$$d_\infty(f, g) = \sup_{x \in X} d_Y(f(x), g(x))$$

Vediamo quindi che $(\mathcal{B}(X, Y), d_\infty)$ è completo.

Sia $\{f_n\} \subset \mathcal{B}(X, Y)$ di Cauchy, allora $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n = f \in \mathcal{B}(X, Y)$. Definiamo $f(x)$ per ogni $x \in X$. Abbiamo che $\{f_n\}_N \in \mathbb{N}$ di Cauchy in $\mathcal{B}(X, Y)$ implica che $\forall x \in X, \{f_n(x)\} \subset Y \implies f_n(x)$ ammette limite in Y (infatti Y è completo), e definiamo allora $f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$. Rimane da vedere che:

- (i) f è limitata
- (ii) $f_n \longrightarrow f$ nella distanza d_∞
- i) $d_Y(f(x), f(x')) \leq d_Y(f(x), f_n(x)) + d_Y(f_n(x), f_n(x')) + d_Y(f_n(x'), f(x'))$
- ii) $d_Y(f(x), f_n(x)) = d_Y(\lim_{m \rightarrow \infty} f_m(x), f_n(x)) = \lim_{m \rightarrow \infty} d_Y(f_m(x), f_n(x)) < \varepsilon$

Esempio 3.6.19. Supponiamo adesso X spazio topologico, e poniamo:

$$\mathcal{C}_\mathcal{B}(X, Y) = \{f \in \mathcal{B}(X, Y) \mid f \text{ è continua}\} \subset \mathcal{B}(X, Y)$$

Vediamo che $\mathcal{C}_\mathcal{B}(X, Y) \subset \mathcal{B}(X, Y)$ è chiuso, dunque $\mathcal{C}_\mathcal{B}(X, Y)$ è completo con d_∞ .

3.7 Spazi di Baire

Definizione 3.7.1. Un sottoinsieme di uno spazio topologico è raro se l'apertura della chiusura è vuota. Un sottoinsieme si dice magro se è unione numerabile di rari. Uno spazio si dice di Baire se le aperture dei magri sono vuote.

Proposizione 3.7.2. Sono equivalenti:

- (i) X è di Baire
- (ii) Unione numerabile di chiusi rari ha parte interna vuota
- (iii) Intersezione numerabile di aperti densi è densa

Dimostrazione. Le ultime due sono equivalenti per passaggio al complementare. La seconda è la definizione dell'essere di Baire. Per fare vedere che la seconda implica la prima, sia $Y \subseteq X$ magro, $Y = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} Y_n$ con gli Y_n rari. Allora

$$\overset{\circ}{Y} = \left(\bigcup Y_n \right) \subseteq \bigcup \overset{\circ}{Y_n} = \emptyset$$

□

Teorema 3.7.3. (Versione debole del teorema di Baire) Ogni X metrico completo è di Baire.

Dimostrazione. La dimostrazione è uguale uguale a quella fatta da Manetti a pagina 115. □

Definizione 3.7.4. Un sottoinsieme di uno spazio si dice perfetto se è chiuso e privo di punti isolati.

Proposizione 3.7.5. Un sottoinsieme $Y \subseteq \mathbb{R}$ perfetto è più che numerabile

Dimostrazione. Y è completo, quindi di Baire. Allora scrivendo per assurdo $Y = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{y_n\}$ e $\overset{\circ}{Y} = \emptyset$, non posso avere $\{\overset{\circ}{y_n}\} = \{y_n\} = \emptyset$ □

3.8 Azioni proprie

Sia G gruppo che agisce tramite omeomorfismi su X spazio topologico. Sia quindi ϕ definita come:

$$\begin{aligned} \phi : G \times X &\longrightarrow X \times X \\ (g, x) &\longmapsto (x, g \cdot x) \end{aligned}$$

Dotiamo allora G della topologia discreta, e osserviamo che ϕ è continua se e solo se, date ϕ_1 e ϕ_2 come:

$$\begin{aligned} \phi_1 : G \times X &\longrightarrow X & \phi_2 : G \times X &\longrightarrow X \\ (g, x) &\longmapsto x & (g, x) &\longmapsto g \cdot x \end{aligned}$$

sono entrambe continue. In particolare:

- ϕ_1 è continua perché proiezione
- $\phi_2^{-1}(U) = \{(g, x) \mid g \cdot x \in U\} = \bigcup_{g \in G} \{g\} \times g^{-1}U$ aperto se $U \subset X$ aperto

Indichiamo che G agisce su X con $G \curvearrowright X$.

Definizione 3.8.1. L'azione $G \curvearrowright X$ è PROPRIA se ϕ è un'applicazione propria (cioè per cui $\phi^{-1}(K)$ è compatto se $K \subset X \times X$ è compatto).

Definizione 3.8.2. Sia $G \curvearrowright X$. Dati $Z, Y \subset X$, il TRASPORTATORE di Y in Z è:

$$(Y|Z)_G = \{g \in G \mid gY \cap Z \neq \emptyset\}$$

Teorema 3.8.3. Sia $G \curvearrowright X$ tramite omeomorfismi con X spazio di Hausdorff localmente compatto. Allora sono equivalenti:

- (i) L'azione è propria
- (ii) $(K|K)_G$ è finito $\forall K \subset X$ compatto
- (iii) $\forall x, y \in X, \exists U \in I(x), V \in I(y)$ tali che $(U|V)_G$ è finito

Dimostrazione. (i) \implies (ii): Sia $K \subset X$ compatto. Allora:

$$K \times K \subset X \times X \text{ compatto} \implies \phi^{-1}(K \times K) \subseteq G \times X \text{ compatto}$$

Dove $\phi^{-1}(K \times K) = \{(g, x) \mid x \in K, gx \in K\}$. Allora $p_1(\phi^{-1}(K \times K)) = (K|K)_G$ (ricordando che p_1 è la proiezione $G \times X \rightarrow G$) è compatto in quanto immagine di compatto. G discreto $\implies (K|K)_G$ compatto e discreto $\implies (K|K)_G$ finito.

(ii) \implies (iii): Siano $x, y \in X$ e $U \in I(x), V \in I(y)$ intorni compatti $\implies U \cup V$ compatto $\implies (U \cup V|U \cup V)_G \supset (U|V)_G$ è finito.

(iii) \implies (i): Manca □

Esempio 3.8.4. $\mathbb{Z}^2 \curvearrowright \mathbb{R}^2$ per traslazione con:

$$(a, b) \cdot (x, y) = (x + a, y + b)$$

L'azione è propria. Vediamo ora (ii). Sia $D_{a,b} = [a, a+1] \times [b, b+1]$. Allora $(a, b) \cdot D_{0,0}$, e inoltre

$$\mathbb{R}^2 = \bigcup_{a,b \in \mathbb{Z}} D_{a,b}$$

In generale, $\exists! g \in \mathbb{Z}^2 \mid gD_{a,b} = D_{n,m}$ dati $a, b, m, n \in \mathbb{Z}$. Sia $K \subset \mathbb{R}^2$ compatto, allora esistono finiti $D_{a,b}$ tali che $K \cap D_{a,b} \neq \emptyset$. Siano $D_{a_1,b_1}, \dots, D_{a_n,b_n}$, e sia $gK \cap K \neq \emptyset$ tale che $g \in G$ permuta i D_{a_i,b_i} . Allora $\exists i$ tale che $gD_{a_i,b_i} = D_{a_j,b_j}$, ma questo determina unicamente g , e quindi $(K|K)_G$ è finito.

Esercizio 3.8.5. Seguendo la stessa strada dell'esempio, si mostri che $\mathbb{Z}^n \curvearrowright \mathbb{R}^n$ per traslazione è un'azione propria.

Definizione 3.8.6. L'azione $G \curvearrowright X$ (con X Hausdorff e localmente compatto) è detta VAGANTE se $\forall x \in X, \exists U \in I(x)$ tale che $(U|U)_G$ è finito.

Definizione 3.8.7. L'azione $G \curvearrowright X$, nelle solite ipotesi, si dice **PROPRIAMENTE DISCONTINUA** se $\forall x \in X, \exists U \in I(x)$ tale che $(U|U)_G = \{1\}$.

Definizione 3.8.8. L'azione $G \curvearrowright X$, nelle solite ipotesi, si dice **LIBERA** se $\forall g \in G, g \neq 1, \forall x \in X$ vale che $gx \neq x$.

Proposizione 3.8.9. Sempre nelle stesse ipotesi:

- (i) Le azioni proprie sono vaganti
- (ii) Un'azione è propriamente discontinua se e solo se è vagante e libera

Dimostrazione. (i): Per quanto visto precedentemente, $\forall K \subseteq X$ compatto, $(K|K)_G$ è finito, e quindi abbiamo finito poiché X è localmente compatto.

(ii): Propriamente discontinua \implies vagante e libera.

Supponiamo $gx = x$. Allora $\forall U \in I(x), g \in (U|U)_G \implies g = 1$.

(\Leftarrow) Per esercizio. □

Osservazione 3.8.10. Abbiamo dunque mostrato che propria \implies vagante, propriamente discontinua \implies vagante.

Esempio 3.8.11. $\mathbb{Z} \curvearrowright \mathbb{R}^2$, con:

$$n \cdot (x, y) = (2^n x, 2^{-n} y)$$

Per $\mathbb{R}^2 \setminus \{0\}$, l'azione è libera. Vediamo che $\forall x, y \in \mathbb{R}^2 \setminus \{0\}, \exists U \in I(x)$ tale che $(U|U)_G = \{1\}$. Supponiamo $U \in I(x, y)$ con $x \neq 0$, e consideriamo il disco di centro (x, y) e raggio $\frac{|x|}{4}$. Allora $nU \cap U \neq \emptyset \iff n \neq 0$.

Vediamo che l'azione non è propria: consideriamo $p = (0, 1)$ e $q = (1, 0)$. Siano $U \in I(p), V \in I(q)$. Allora $\exists n_0$ tale che $\forall n \geq n_0$ vale $(2^{-n}, 1) \in U, (1, 2^{-n}) \in V$, ma $n(2^{-n}, 1) = (1, 2^{-n})$, ovvero l'azione di n li scambia. Allora $n \in (U|V)_G, \forall n \geq n_0$.

Definizione 3.8.12. $Z \subset X$ è **G-STABILE** se $\forall x \in Z, \forall g \in G, gx \in Z$.

Teorema 3.8.13. Sia $G \curvearrowright X$ un'azione vagante. Allora $G \curvearrowright X$ è propria se e solo se X/G è di Hausdorff.

Dimostrazione. (\implies) X/G è di Hausdorff se e solo se $\forall x, y \in X$ con $Gx \neq Gy, \exists U_1 \in I(x), V_1 \in I(y)$ G-stabili con $U_1 \cap V_1 = \emptyset$. Per ipotesi esistono $U \in I(x), V \in I(y)$ tali che $(U|V)_G$ è finito, fissati $x, y \in X$. Poniamo allora:

$$(U|V)_G = \{g_1, \dots, g_n\}$$

e consideriamo $g_i x$ e y . Poiché X è di Hausdorff, quindi possiamo separarli $\forall i = 1, \dots, n$. Siano allora $U_i \in I(g_i x)$ e $V_i \in I(y)$ tali che $U_i \cap V_i = \emptyset$. Definiamo inoltre:

$$U' = U \cap \bigcap_{i=1}^n g_i^{-1}(U_i) \quad V' = V \cap \bigcap_{i=1}^n V_i$$

Allora $U' \in I(x)$, $V' \in I(y)$ e vediamo che $(U'|V')_G = \emptyset$. Infatti, supponiamo:

$$gU' \cap V' \neq \emptyset \implies g \in (U|V)_G \implies g \in \{g_1, \dots, g_n\}$$

Ma allora, $g_i U' \cap V' \subset U_i \cap V_i = \emptyset \implies (U'|V')_G = \emptyset$.

Poniamo adesso $U'' = A = \bigcap_{g \in G} gU'$ e $B = \bigcap_{g \in G} gV'$, dunque A e B sono aperti e

G -stabili. Vediamo che sono disgiunti: abbiamo che $A \cap B = \bigcap_{g, h \in G} gU' \cap hV'$, e

d'altra parte $gU' \cap hV' \neq \emptyset$ se e solo se $h^{-1}gU' \cap V' \neq \emptyset$. Ma $h^{-1}g \notin (U'|V')_G = \emptyset$. Dunque $gU' \cap hV' = \emptyset$, $\forall g, h \in G$. Dunque X/G è di Hausdorff. \square

Esempio 3.8.14. $\mathbb{Z}^n \curvearrowright \mathbb{R}^n$ per traslazione $\implies \mathbb{R}^n/\mathbb{Z}^n \simeq (S^1)^n$

Osserviamo che il prodotto di identificazioni aperte è un'identificazione aperta, e quindi:

$$\mathbb{R}^n/\mathbb{Z}^n \simeq \left(\mathbb{R}/\mathbb{Z}\right)^n \simeq (S^1)^n$$

Consideriamo, per semplicità, il caso $n = 2$:

Sia $D = [0, 1] \times [0, 1]$, allora D interseca tutte le orbite di $\mathbb{Z}^2 \curvearrowright \mathbb{R}^2$. Posso vedere $\mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2$ come quoziente del quadrato?

Definiamo una relazione indotta su D : $x \sim y \iff \exists g \in G : gx = y$. Otteniamo il diagramma:

$$\begin{array}{ccc} D & \xrightarrow{i} & \mathbb{R}^2 \\ \downarrow \pi_1 & & \downarrow \pi_2 \\ D/\sim & \xrightarrow{f} & \mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2 \end{array}$$

Osserviamo che f è continua, vediamo che è un omeomorfismo.

$D/\sim \simeq S^1 \times S^1$, f è continua e biunivoca, ma D/\sim è compatto perché immagine di un compatto. Allora $\mathbb{R}^2/\mathbb{Z}^2$ Hausdorff implica che f è un omeomorfismo.

Definizione 3.8.15. Sia $G \curvearrowright X$ tramite omeomorfismo. Un DOMINIO FONDAMENTALE per l'azione è un chiuso $D \subset X$ tale che:

- (i) $D = \overline{\overset{\circ}{D}}$
- (ii) $g \neq \text{id}$, allora $g\overset{\circ}{D} \cap \overset{\circ}{D} = \emptyset$ (cioè $(\overset{\circ}{D} | \overset{\circ}{D})_G = \{\text{id}\}$)
- (iii) $X = \bigcup_{g \in G} gD$ è un ricoprimento localmente finito

Esempio 3.8.16. $\mathbb{Z}^n \curvearrowright \mathbb{R}^n$ per traslazione. Allora $[0, 1]^n$ è un dominio fondamentale.

Esempio 3.8.17. $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \curvearrowright \mathbb{R}^2$ per rotazione di angolo $\frac{2\pi}{n}$. Allora il cono di angolo $\frac{2\pi}{n}$ è un dominio fondamentale.

Teorema 3.8.18. Sia $G \curvearrowright X$ tramite omeomorfismo, X Hausdorff e localmente compatto, e $D \subset X$ un dominio fondamentale. Allora $D/\sim \simeq X/G$. Inoltre l'azione di G su X è propria.

Dimostrazione. Consideriamo il seguente diagramma:

$$\begin{array}{ccc} D & \xhookrightarrow{i} & X \\ \downarrow \pi_2 & & \downarrow \pi_1 \\ D/\sim & \xrightarrow{f} & X/G \end{array}$$

dove \sim è una relazione indotta dall'azione di G su D . Come nell'esempio precedente, f è continua e biunivoca, vediamo allora che è anche aperta (e che dunque è un omeomorfismo). Sia $A \subseteq X$ aperto, allora $f(A) \subset X/G$ è aperto se e solo se $\pi_1^{-1}(f(A)) \subseteq X$ è aperto e $\pi_2^{-1}(A) \subseteq D$, $\exists B \subseteq D : \pi_2^{-1}(A) = B \cap D$ aperto. Allora:

$$\pi_1^{-1}(f(A)) = \bigcup_{g \in G} g(B \cap D) = V$$

Mostriamo che V è aperto. Per fare ciò, è sufficiente vedere che $\forall x \in B \cap D$, $\exists U \subset X$ aperto con $U \subset V$ (cioè $x \in U$). Allora, poiché $\{gD\}$ è un ricoprimento localmente finito di X , esiste $U' \in I(x)$ aperto tale che $U' \cap gD \neq \emptyset$ per un numero finito di g .

Assumendo allora che $U' \cap gD \neq \emptyset \implies x \in gD$, basta sostituire U' con $U' \setminus \bigcup_{x \notin gD} gD$, ed ottengo ancora un intorno aperto di x con le stesse proprietà. Siano

adesso $g_1, \dots, g_n \in G$ gli elementi per cui $x \in g_i D$, allora $U' \subset g_1 D \cup \dots \cup g_n D$. Per ogni i abbiamo che:

$$g_i^{-1}x \in D \implies g_i^{-1}x \in \pi_2^{-1}(A) \implies g_i^{-1}(x) \in B \subset \pi_2^{-1}(A) \implies x \in g_i B$$

Poniamo:

$$U = U' \cap \bigcap_{i=1}^n g_i B \implies x \in U$$

intorno aperto di x . Vediamo che $U \subseteq V$. Infatti:

$$y \in U \implies y \in U' \implies y \in g_i D, \exists g_i : x \in g_i D \implies y \in g_i(D \cap B) \subset V$$

□

4 Spazi proiettivi e varietà

4.1 Spazi proiettivi

Definizione 4.1.1. Sia \mathbb{K} un campo, e sia V un \mathbb{K} -spazio vettoriale. Definiamo su V la relazione di equivalenza:

$$v \sim w \iff \exists \lambda \in \mathbb{K}^* = \mathbb{K} \setminus \{0\} : v = \lambda w$$

Allora chiamiamo SPAZIO PROIETTIVO associato a V lo spazio:

$$\mathbb{P}(V) = V \setminus \{0\} / \sim = V \setminus \{0\} /_G \quad \text{con } G = \{\lambda \text{id} \mid \lambda \neq 0\}$$

$\mathbb{P}(V)$ è lo spazio delle rette di V .

Definizione 4.1.2. $W \subseteq \mathbb{P}(V)$ è un SOTTOSPAZIO di dimensione k se $W = \pi(H \setminus \{0\})$, con H sottospazio di V di dimensione $k+1$ e $\pi : V \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{P}(V)$. In particolare, $\dim \mathbb{P}(V) = \dim V - 1$. Se $V = \mathbb{K}^n$, $\mathbb{P}(\mathbb{K}^n)$ si indica con $\mathbb{P}^{n-1}(\mathbb{K})$.

Considereremo adesso in particolare i casi $\mathbb{K} = \mathbb{R}$ oppure $\mathbb{K} = \mathbb{C}$. In questi casi assumiamo $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ dotato della topologia quoziente di $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$.

Osservazione 4.1.3. $\mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\} \simeq \mathbb{R}^{2(n+1)} \setminus \{0\}$

Osservazione 4.1.4. Se $S^n \subseteq \mathbb{R}^{n+1}$ è la sfera unitaria, S^n interseca ogni retta in due punti della forma $\pm v$, per cui, come insieme:

$$\mathbb{P}^n(\mathbb{R}) = S^n /_{\pm \text{id}}$$

Vediamo che $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ è omeomorfo a $S^n /_{\pm \text{id}}$. Infatti abbiamo il diagramma:

$$\begin{array}{ccc} S^n & \xhookrightarrow{i} & \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \\ \downarrow & & \downarrow \pi \\ S^n /_{\pm \text{id}} & \xrightarrow{\bar{i}} & \mathbb{P}^n(\mathbb{R}) \end{array}$$

Poiché $i \circ \pi$ è continua, per la proprietà universale della topologia quoziente, \bar{i} è continua. Consideriamo allora il diagramma:

$$\begin{array}{ccc} \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} & \xrightarrow{r} & S^n \\ \downarrow \pi & & \downarrow \\ \mathbb{P}^n(\mathbb{R}) & \xrightarrow{\bar{r}} & S^n /_{\pm \text{id}} \end{array}$$

con $r(x) = \frac{x}{\|x\|}$. Analogamente, \bar{r} è continua e \bar{r} e \bar{i} sono una l'inversa dell'altra, dunque sono omeomorfismi.

Osservazione 4.1.5. $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ è compatto T2. Infatti è quoziente di S^n (che è compatto T2) per l'azione di un gruppo finito, azione che perciò è sicuramente propria (in realtà è propriamente discontinua).

Proposizione 4.1.6. Sia $D^n = \{x \in \mathbb{R}^n \mid \|x\| \leq 1\}$, e sia \sim_D definita da:

$$x \sim_D y \iff x = y \text{ o } (\|x\| = \|y\| = 1 \text{ e } x = -y)$$

Allora $\mathbb{P}^n(\mathbb{R}) \simeq D^n / \sim_D$.

Dimostrazione. Sia $H = \{(x_0, \dots, x_n) \in S^n \mid x_0 \geq 0\}$ e sia \sim_H data da:

$$v \sim_H w \iff v = w \text{ o } (v = -w \text{ e } x_0(v) = x_0(w) = 0)$$

La composizione $H \longrightarrow S^n \longrightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ induce una bigezione continua $H / \sim_H \longrightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$, continua per la proprietà universale, mentre la bigezione deriva da ragioni insiemistiche.

H compatto $\implies H / \sim_H$ compatto. Inoltre $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ è T2, dunque $\mathbb{P}^n(\mathbb{R}) \simeq H / \sim_H$. Infine, l'omeomorfismo

$$\begin{aligned} H &\longrightarrow D^n \\ (x_0, \dots, x_n) &\longmapsto (x_1, \dots, x_n) \end{aligned}$$

con inversa $(x_1, \dots, x_n) \longmapsto (\sqrt{1 - x_1^2 - \dots - x_n^2}, x_1, \dots, x_n)$ induce un omeomorfismo $H / \sim_H \simeq D^n / \sim_D$. \square

Osservazione 4.1.7. $\mathbb{P}^1(\mathbb{R}) \simeq S^1$ in quanto:

$$\mathbb{P}^1(\mathbb{R}) = D^2 / \sim = [-1, 1] / \{-1, 1\} = S^1$$

Osservazione 4.1.8. $\mathbb{P}^2(\mathbb{R}) = D^2 / \sim$ dove $x \sim y \iff x = y \text{ o } \|x\| = \|y\| = 1$ è il nastro di Moebius.

In generale, l'inclusione $\mathbb{R}^n \setminus \{0\} \longrightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$ induce un'inclusione $\mathbb{P}^{n-1}(\mathbb{R}) \hookrightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$, tale che $\mathbb{P}^n(\mathbb{R}) \setminus \mathbb{P}^{n-1}(\mathbb{R}) \simeq (\overset{\circ}{D})^n$.

Definizione 4.1.9. Un punto di $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ è descritto da una $(n+1)$ -upla a meno di multipli. La classe di (x_0, \dots, x_n) si denota con $[x_0 : \dots : x_n]$ (COORDINATE OMOGENEE).

Osservazione 4.1.10. Se $p \in \mathbb{K}[x_0, \dots, x_n]$ è un polinomio, non ha senso chiedersi quanto vale $p([x_0 : \dots : x_n])$. Inoltre, se p è omogeneo di grado d , $\forall \lambda \in \mathbb{K}^*$, vale:

$$p(\lambda x_0, \dots, \lambda x_n) = \lambda^d p(x_0, \dots, x_n)$$

dunque, perlomeno, è ben definito il fatto che p si annulli su $[x_0 : \dots : x_n]$, cosa che avviene per definizione.

Torniamo adesso ad esaminare il caso generale. Prendiamo $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$, e siano x_0, \dots, x_n le coordinate di \mathbb{K}^{n+1} . Poniamo allora

$$U_i = \{x_i \neq 0\} = \{[x_0 : \dots : x_n] \in \mathbb{P}^n(\mathbb{K}) \mid x_i \neq 0\}$$

Proposizione 4.1.11. Esiste una bigezione naturale tra U_i e \mathbb{K}^n che, nel caso $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, è un omeomorfismo.

Dimostrazione. Siano $\varphi : U_i \rightarrow \mathbb{K}^n$, $\psi : \mathbb{K}^n \rightarrow U_i$ definite da:

$$\begin{aligned} \varphi([x_0 : \dots : x_n]) &= \left(\frac{x_0}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_n}{x_i} \right) \\ \psi((x_1, \dots, x_n)) &= [x_1 : \dots : x_{i-1} : 1 : x_{i+1} : \dots : x_n] \end{aligned}$$

Allora

$$\begin{aligned} \varphi(\psi((x_1, \dots, x_n))) &= (x_1, \dots, x_n) \\ \psi(\varphi([x_0 : \dots : x_n])) &= \psi\left(\left(\frac{x_0}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_n}{x_i}\right)\right) \\ &= \left[\frac{x_0}{x_i} : \dots : \frac{x_{i-1}}{x_i} : 1 : \frac{x_{i+1}}{x_i} : \dots : \frac{x_n}{x_i}\right] = [x_0 : \dots : x_n] \end{aligned}$$

Dunque φ e ψ sono una l'inversa dell'altra, e dunque sono bigezioni. Rimane da vedere che, se $\mathbb{K} = \mathbb{R}$, sono continue. ψ è ovviamente continua, in quanto composizione delle mappe continue $\mathbb{R}^n \hookrightarrow \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$. Inoltre φ si ottiene per passaggio al quoziente da $\tilde{\varphi} : \pi^{-1}(U_i) \rightarrow \mathbb{R}^n$, dove:

$$\tilde{\varphi}(x_0, \dots, x_n) = \left(\frac{x_0}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_n}{x_i} \right)$$

con $\pi^{-1}(U_i) = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} \mid x_i \neq 0\}$. Allora $\tilde{\varphi}$ è chiaramente continua, e dunque lo è anche φ (infatti la topologia quoziente di $\pi^{-1}(U_i)/\sim$ coincide con quella di $U_i \subseteq \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ come sottospazio, in quanto $\pi^{-1}(U_i)$ è saturo. Dunque $\forall p \in \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$, $\exists U$ aperto in $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ con $p \in U$ e U omeomorfo a \mathbb{R}^n . \square

Definizione 4.1.12. Sia X spazio topologico. Allora X si dice VARIETÀ n -dimensionale se:

- (i) X è T2

- (ii) $\forall p \in X, \exists$ aperto U con $p \in U$ con U omeomorfo a un aperto V di \mathbb{R}^n
- (iii) X è a base numerabile

Osservazione 4.1.13. Poiché le palle aperte sono una base della topologia di \mathbb{R}^n e una palla aperta è omeomorfa a \mathbb{R}^n , (ii) è equivalente a richiedere che esista U aperto con $p \in U$ e U omeomorfo ad una palla (o a \mathbb{R}^n).

Osservazione 4.1.14. Poiché $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ è a base numerabile, $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$ è una n -varietà.

Osservazione 4.1.15. (i), (ii), (iii), sono indipendenti. Ad esempio:

$$\mathbb{R} \times \{-1, 1\} / \sim \quad \text{con} \quad (x, t) \sim (y, s) \Leftrightarrow (x, t) = (y, s) \text{ o } (x = y \text{ e } x, y \neq 0)$$

Verifica (ii) poiché è localmente euclidea, ma non è T2.

4.2 Proiettivi complessi

Con dimostrazioni analoghe, si mostra che $\mathbb{P}^n(\mathbb{C})$ è compatto, T2, ed è ricoperto da aperti $U_i = \{z_i \neq 0\}$ omeomorfi a $\mathbb{C}^n \simeq \mathbb{R}^{2n}$. Essendo a base numerabile, $\mathbb{P}^n(\mathbb{C})$ è una varietà di dimensione $2n$.

Proposizione 4.2.1. $\mathbb{P}^1(\mathbb{C}) \simeq S^2$

Dimostrazione. Infatti:

$$\mathbb{P}^1(\mathbb{C}) = \{z_0 = 0\} \cup \{z_0 \neq 0\} = \{[0 : 1]\} \cup U_0$$

Poiché $\mathbb{P}^1(\mathbb{C})$ è compatto T2, per l'unicità della compattificazione di Alexandroff, $\mathbb{P}^1(\mathbb{C}) = \hat{U}_0 = \hat{\mathbb{R}}^2 = S^2$. \square

In generale:

$$\mathbb{P}^n(\mathbb{C}) = \{x_0 = 0\} \cup \{x_0 \neq 0\} \simeq \mathbb{P}^{n-1}(\mathbb{C}) \cup U_0 \simeq \mathbb{P}^{n-1}(\mathbb{C}) \cup \mathbb{C}^n$$

Esempio 4.2.2. La restrizione di $\pi : \mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{C})$ a:

$$S^{n+1} = \{v \in \mathbb{C}^{n+1} = \mathbb{R}^{2n+2} \mid \|v\| = 1\}$$

è surgettiva, perché $\pi(v) = \pi(\frac{v}{\|v\|})$ e ciò implica $\mathbb{P}^n(\mathbb{C})$ compatto. Tuttavia, $\forall \theta \in \mathbb{R}, \pi(e^{i\theta}v) = \pi(v) \forall v \in \mathbb{C}^{n+1} \setminus \{0\}$. Consideriamo la mappa $f : S^{2n+1} \rightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{C})$ ottenuta restringendo π . Allora, $\forall p \in \mathbb{P}^n(\mathbb{C}), f^{-1}(p) \subseteq S^{2n+1}$ è omeomorfo a S^1 . Infatti, se $v \in f^{-1}(p)$ scelto a caso, allora:

$$f^{-1}(p) = \{\lambda v \mid \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1\}$$

per cui la mappa

$$\begin{aligned} i : S^1 = \{\lambda \in \mathbb{C} \mid |\lambda| = 1\} &\longrightarrow f^{-1}(p) \\ \lambda &\longmapsto \lambda v \end{aligned}$$

è bigettiva e omeomorfismo (infatti va da un compatto a un T2).

Perciò, se $n = 1$, $\exists f : S^3 \rightarrow S^2$ surgettiva tale che $f^{-1}(p) \simeq S^1$ per ogni p in S^2 . Si ottiene che $S^3 \simeq S^2 \times S^1$. Questa f si chiama FIBRATO DI LEFSCHETZ, ed è un esempio di fibrato non banale.

Esempio 4.2.3. (*Uno spazio compatto per successioni non compatto*)

Sia $X = [0, 1]^{[0,1]}$ con la topologia prodotto, cioè la topologia della convergenza puntuale. Sia inoltre, $\forall f \in X$:

$$\text{supp}(f) = \{x \in [0, 1] \mid f(x) \neq 0\}$$

il supporto di f . Prendiamo allora:

$$Y = \{f \in X \mid \#\text{supp}(f) \leq \#\mathbb{N}\}$$

Allora:

- (i) Y è denso in X
- (ii) X è T2
- (iii) Y non è compatto (compatto in T2 \Rightarrow chiuso)
- (iv) Y è compatto per successioni

Sia f_n una successione in Y , ne devo trovare una estratta puntualmente convergente a una $f \in Y$. Sia:

$$A = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \text{supp}(f_n)$$

Allora $\#A \leq \#\mathbb{N}$, quindi posso scrivere anche $A = \{a_0, \dots, a_n, \dots\}$. La successione $\{f_n(a_0)\}_{n \in \mathbb{N}}$ è contenuta in $[0, 1]$ che è compatto, dunque esiste una scelta crescente di indice $k_0(n)$ tale che $f_{k_0(n)}(a_0) \rightarrow \ell_0$ per $n \rightarrow +\infty$.

Analogamente $\{f_{k_0(n)}(a_1)\}_{n \in \mathbb{N}} \subseteq [0, 1]$, dunque esiste una sottosuccessione $k_1(n)$ estratta da $k_0(n)$ con $f_{k_1(n)}(a_1) \rightarrow \ell_1 \in [0, 1]$. Procedendo così, $\forall m$ costruisco una sottosuccessione $k_m(n)$ con $k_{m+1}(n)$ estratta da $k_m(n)$ e tali che

$$\lim_{n \rightarrow +\infty} f_{k_m(n)}(a_m) = \ell_m \in [0, 1]$$

Segue che, $\forall m \in \mathbb{N}$, $\lim_{i \rightarrow +\infty} f_{k_i(i)}(a_m) = \ell_m$.

Infatti $f_{k_i(i)}$ è definitivamente una sottosuccessione di $f_{k_i(n)}$, con $n \in \mathbb{N}$. Poniamo allora:

$$f(x) = \begin{cases} \ell_i & \text{se } x = a_i \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases}$$

Allora $f \in Y$ ($\text{supp}(f)$ è numerabile) e $f_{k_i(i)} \rightarrow f$ puntualmente.

5 Topologia algebrica

5.1 Omotopie, equivalenze omotopiche e retrazioni

Definizione 5.1.1. Siano $f, g : X \rightarrow Y$ continue. Una OMOTOPIA tra f e g è una mappa continua $H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$ t.c. $H(x, 0) = f(x), H(x, 1) = g(x)$ per ogni $x \in X$.

Fatto 5.1.2. Per ogni $t \in [0, 1]$, $H_t(x) = H(x, t), H_t : X \rightarrow Y$ è continua, per cui H descrive un'interpolazione tra f e g : deformato f in g .

Nel seguito, $I = [0, 1]$.

Definizione 5.1.3. f si dice OMOTOPA a g (e si scrive $f \sim g$) se esiste un'omotopia tra f e g .

Fatto 5.1.4.

- (i) $f \sim f$;
- (ii) $f \sim g \Rightarrow g \sim f$;
- (iii) $f \sim g$ e $g \sim h \Rightarrow f \sim h$.

Dunque l'omotopia è una relazione di equivalenza su $C(X, Y)$ (le funzioni continue da X in Y). L'insieme delle classi di omotopia si denota con $[X, Y]$.

Esempio 5.1.5. Se Y è un convesso di \mathbb{R}^n , $|[X, Y]| = 1$, cioè tutte le mappe $f : X \rightarrow Y$ sono omotope fra loro. Infatti, date f e g , basta prendere $H(x, t) = tf(x) + (1-t)g(x)$. In realtà, dato che l'omotopia è una relazione di equivalenza, otteniamo di più: ci basta che Y sia "stellato" rispetto a un punto, cioè che esista $p \in Y$ t.c. per ogni $y \in Y, t \in I, ty + (1-t)p \in Y$. Allora si dimostra che tutte le funzioni sono omotope alla funzione che vale costantemente p .

Definizione 5.1.6. Sia X spazio topologico, $\pi_0(X)$ è l'insieme delle componenti connesse per archi di X .

Lemma 5.1.7. $f : X \rightarrow Y$ continua induce una funzione ben definita $f_* : \pi_0(X) \rightarrow \pi_0(Y)$ definita dalla richiesta che $f(C) \subseteq f_*(C)$ per ogni $C \in \pi_0(X)$. Allora il lemma dice questo: se $f \sim g$, $f_* = g_*$.

Dimostrazione. Sia $C \in \pi_0(X)$ e sia $x_0 \in C$. Se H è un'omotopia tra f e g , la mappa $\gamma : [0, 1] \rightarrow Y, \gamma(t) = H(x_0, t)$ è un arco continuo in Y che congiunge $f(x_0)$ con $g(x_0)$. \square

Fatto 5.1.8. Se $X \subseteq \mathbb{R}^n$ è stellato rispetto a p , allora c'è una bigezione tra $[X, Y]$ e $\pi_0(Y)$.

Dimostrazione. X stellato $\Rightarrow X$ connesso per archi $\Rightarrow |\pi_0(X)| = 1$. Dunque possiamo definire $\psi : C(X, Y) \rightarrow \pi_0(Y)$ data da $\psi(f) = f_*(X)$. Per il lemma, ψ induce al quoziente una ben definita $\varphi : [X, Y] \rightarrow \pi_0(Y)$. φ è ovviamente suriettiva (basta considerare le funzioni costanti). Per l'iniettività: $f \in C(X, Y)$ è omotopa alla costante $f(p)$ tramite l'omotopia $H(x, t) = f(tx + (1-t)p)$. Se prendiamo f e g t.c. $\varphi([f]) = \varphi([g])$, allora dev'essere che $f(p)$ e $g(p)$ stanno nella stessa componente connessa per archi di Y , dunque le costanti $f(p)$ e $g(p)$ sono omotope tramite $K(x, t) = \gamma(t)$ dove γ è il cammino che congiunge i due punti, da cui $[f] = [g]$ e quindi φ è iniettiva. \square

Definizione 5.1.9. $f : X \rightarrow Y$ continua è un'EQUIVALENZA OMOTOPICA se ammetta un'INVERSA OMOTOPICA, cioè $g : Y \rightarrow X$ continua t.c. $f \circ g \sim \text{id}_Y$, $g \circ f \sim \text{id}_X$. X e Y si dicono OMOTOPICAMENTE EQUIVALENTI (o OMOTOPI) se esiste un'equivalenza omotopica tra loro.

Esercizio 5.1.10. Essere omotopicamente equivalenti è una relazione di equivalenza. Per la transitività si usa il seguente lemma.

Lemma 5.1.11. $f_0, f_1 : X \rightarrow Y, g_0, g_1 : Y \rightarrow Z$ continue, $f_0 \sim f_1, g_0 \sim g_1 \Rightarrow g_0 \circ f_0 \sim g_1 \circ f_1$.

Dimostrazione. $(x, t) \mapsto K(H(x, t), t)$, dove H è l'omotopia tra f_0 e f_1 e K quella tra g_0 e g_1 , è l'omotopia cercata. \square

Definizione 5.1.12. X è CONTRAIBILE (o CONTRATTILE) se è omotopicamente equivalente a un punto.

Proposizione 5.1.13. $X \subseteq \mathbb{R}^n$ stellato $\Rightarrow X$ contrattile.

Dimostrazione. Sia $Y = \{q\}$ un punto. Siano $f : X \rightarrow Y$ la costante e $g : Y \rightarrow X$ t.c. $g(q) = x_0 \in X$ (a caso, non necessariamente il punto rispetto a cui X è stellato). f e g sono continue e $f \circ g$ è ovviamente l'identità. $g \circ f : X \rightarrow Y$ è omotopa a id_X perché X stellato $\Rightarrow |[X, X]| = 1$. \square

Osservazione 5.1.14. X contrattile $\Rightarrow X$ connesso per archi. Infatti, se $f : X \rightarrow Y$ è un'equivalenza omotopica, $f_* : \pi_0(X) \rightarrow \pi_0(Y)$ è bigettiva. Lo si dimostra considerando l'inversa g e facendo vedere che $(f \circ g)_* = f_* \circ g_*$.

Definizione 5.1.15. X spazio topologico, $C \subseteq X$ si dice RETRATTO se esiste una mappa r (detta *retrazione*), $r : X \rightarrow C$ continua t.c. $r(x) = x$ per ogni $x \in C$.

C si dice RETRATTO DI DEFORMAZIONE se esiste $r : X \rightarrow C$ come sopra e t.c. se $i : C \rightarrow X$ è l'inclusione, esiste un omotopia H tra id_X e $i \circ r$ t.c. $H(x, t) = x$ per ogni $x \in C, t \in I$.

Segue che se Y è un retratto di deformazione X e Y sono omotopicamente equivalenti (i e r sono equivalenze omotopiche).

Esempio 5.1.16. $p \in X \Rightarrow \{p\}$ è un retratto di X .

Esempio 5.1.17. S^n è un retratto di deformazione di $X = \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$. Basta prendere $r : X \rightarrow S^n$ definita da $r(x) = x/\|x\|$, l'omotopia tra id_X e $i \circ r$ è $H(x, t) = (1-t)x + tx/\|x\|$.

Esempio 5.1.18. $GL^+(n, \mathbb{R})$ (le matrici con determinante positivo) si ritrae per deformazione a $SL(n, \mathbb{R}) = \{A \in GL(n, \mathbb{R}) \mid \det A = 1\}$. Infatti, se $A \in GL^+(n, \mathbb{R})$, $\det A > 0$, per cui $tA + \frac{1-t}{\sqrt[n]{\det A}}A = \left(t + \frac{1-t}{\sqrt[n]{\det A}}\right)A \in GL^+(n, \mathbb{R})$ per ogni $t \in I$ dato che $t + \frac{1-t}{\sqrt[n]{\det A}} > 0$ per ogni $t \in I$. Allora è un semplice esercizio verificare che la funzione $H : GL^+(n, \mathbb{R}) \times I \rightarrow GL^+(n, \mathbb{R})$ data da $H(A, t) = \left(t + \frac{1-t}{\sqrt[n]{\det A}}\right)A$ è l'omotopia che cerchiamo.

Si può dimostrare analogamente che $GL^+(n, \mathbb{R})$ si retrae per deformazione su $SO(n, \mathbb{R})$ (le matrici ortonormali con determinante 1), ma la dimostrazione è difficile (più che altro lunga, secondo Frigerio) ed è lasciata al corso di geometria e topologia differenziale.

Esercizio 5.1.19. $X = (\mathbb{R} \times \{0\}) \cup (\mathbb{Q} \times \mathbb{R}) \subseteq \mathbb{R}^2$. allora

- (i) $\{(0, 0)\}$ è un retratto di deformazione di X , che perciò è contrattile;
- (ii) $\{(0, 1)\}$ non è un retratto di deformazione di X .

Soluzione

- (i) Hint: prima schiacciare il "pettine" sulla retta, poi la retta sul punto.
- (ii) Per assurdo sia $H : X \times I \rightarrow X$ tra id e la costante $(0, 1)$ t.c. $H((0, 1), t) = (0, 1)$ per ogni $t \in I$. Per ogni $x \neq 0$, i punti $(0, 1)$ e $(x, 1)$ giacciono in componenti connesse distinte di $X \setminus \{y = 0\}$, ma l'arco $\gamma_x : [0, 1] \rightarrow X$ dato da $\gamma_x(t) = H((x, 1), t)$ è continuo e congiunge $(x, 1)$ a $(0, 1)$, dunque deve passare per $\{y = 0\}$. Allora per ogni $x \neq 0$ esiste $t(x) \in I$ t.c. $H((x, 1), t(x))$ ha ordinata nulla. Consideriamo la successione $(1/n, 1)$. Chiamando $t_n = t(1/n)$ e sfruttando la compattezza di I , a meno di estrarre una sottosuccessione possiamo supporre senza perdita di generalità $t_n \rightarrow \bar{t}$. Per continuità, se $\pi_y : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ è la proiezione alla seconda coordinata, per continuità di H e π_y otteniamo che $0 = \lim_{n \rightarrow +\infty} \pi_y(H((1/n, 1), t_n)) = \pi_y(H((0, 1), \bar{t})) = \pi_y((0, 1)) = 1$, assurdo.

5.2 Gruppo fondamentale

Siano X spazio topologico e $a, b \in X$. $\Omega(a, b) := \{\gamma : [0, 1] \rightarrow X \text{ continuo t.c. } \gamma(0) = a, \gamma(1) = b\}$.

Definizione 5.2.1. $\alpha, \beta \in \Omega(a, b)$ sono OMOTOPICI (COME CAMMINI o A ESTREMI FISSI) se esiste $H : [0, 1] \times I \rightarrow X$ omotopia tra α e β e t.c. $H(0, t) =$

$a, H(1, t) = b$ per ogni $t \in I$. Essere omotopi è una relazione di equivalenza \sim tra cammini.

Definizione 5.2.2. Come insieme, il GRUPPO FONDAMENTALE DI X CON PUNTO BASE a è $\pi_1(X, a) = \Omega(a, a)/\sim$.

Il nostro prossimo obiettivo sarà quello di mettere su $\pi_1(X, a)$ una struttura di gruppo.

Se $\alpha, \beta \in \Omega(a, a)$, è ben definita $\alpha * \beta \in \Omega(a, a)$ data da $\alpha * \beta(t) = \begin{cases} \alpha(2t) & \text{se } 0 \leq t \leq 1/2 \\ \beta(2t - 1) & \text{se } 1/2 \leq t \leq 1 \end{cases}$.

Notazione: $1_a \in \Omega(a, a)$ è il cammino costante in a . Se $\alpha \in \Omega(a, b)$, $\bar{\alpha} \in \Omega(b, a)$ è $\bar{\alpha}(t) = \alpha(1 - t)$.

È vero che se $\alpha, \beta, \gamma \in \Omega(a, a)$, allora $(\alpha * \beta) * \gamma = \alpha * (\beta * \gamma)$? No! Però sono omotopi. 

Lemma 5.2.3. Sia $\varphi : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ continua e t.c. $\varphi(0) = 0, \varphi(1) = 1$ e sia $\gamma \in \Omega(a, b)$, allora $\gamma \sim \gamma \circ \varphi$.

Dimostrazione. L'omotopia cercata è data da $H(t, s) = \gamma(st + (1 - s)\varphi(t))$. \square

Corollario 5.2.4. $\alpha \in \Omega(a, b), \beta \in \Omega(b, c), \gamma \in \Omega(c, d)$, allora $(\alpha * \beta) * \gamma \sim \alpha * (\beta * \gamma)$ in quanto sono una riparametrizzazione dell'altro.

Lemma 5.2.5. $\alpha, \alpha' \in \Omega(a, b), \beta, \beta' \in \Omega(b, c), \alpha \sim \alpha', \beta \sim \beta' \Rightarrow \alpha * \beta \sim \alpha' * \beta'$ in $\Omega(a, c)$.

Dimostrazione. Sia H l'omotopia tra α e α' e K quella tra β e β' , allora la mappa

$$(t, s) \mapsto \begin{cases} H(2t, s) & \text{se } 0 \leq t \leq 1/2 \\ K(2t - 1, s) & \text{se } 1/2 \leq t \leq 1 \end{cases}$$

è l'omotopia cercata. \square

Corollario 5.2.6. L'operazione $\pi_1(X, a) \times \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(X, a)$ t.c. $([\alpha], [\beta]) \mapsto [\alpha * \beta]$ è ben definita e associativa.

Notazione: con un abuso, d'ora in poi indicheremo con $\alpha * \beta * \gamma$ il cammino $(\alpha * \beta) * \gamma$ o $\alpha * (\beta * \gamma)$, che non dà problemi a meno di riparametrizzazione/omotopia.

Stessa cosa per $\alpha_1 * \alpha_2 * \dots * \alpha_n$.

Elemento neutro: 1_a è il cammino costante. Allora $1_a * \alpha$ e $\alpha * 1_a$ sono riparametrizzazioni di α per ogni $\alpha \in \Omega(a, a)$, per cui $[1_a] \cdot [\alpha] = [1_a * \alpha] = [\alpha] = [\alpha * 1_a] = [\alpha] \cdot [1_a]$.

Inverso: vogliamo dire che $[\bar{\alpha}] \cdot [\alpha] = [\alpha] \cdot [\bar{\alpha}] = [1_a] = 1$ per ogni $\alpha \in \pi_1(X, a)$. Mostriamo che $\alpha * \bar{\alpha} \sim 1_a$, che lo stesso vale per $\bar{\alpha} * \alpha$ è analogo.

$$H(t, s) = \begin{cases} \alpha(2t) & \text{se } t \leq s/2 \\ \alpha(s) & \text{se } s/2 \leq t \leq 1 - s/2 \\ \bar{\alpha}(2t - 1) = \alpha(2 - 2t) & \text{se } t \geq 1 - s/2 \end{cases}$$

è l'omotopia cercata.

Abbiamo così dimostrato che $\pi_1(X, a)$ è un gruppo con l'operazione $[\alpha] \dots [\beta] = [\alpha * \beta]$. Vogliamo adesso studiare la dipendenza di $\pi_1(X, a)$ da a . D'ora in poi, se non detto diversamente, assumeremo X connesso per archi (se Y è la componente connessa per archi di a in X , $\pi_1(X, a) \cong \pi_1(Y, a)$).

Siano $a, b \in X$ e $\gamma \in \Omega(a, b)$. Poniamo $\gamma_\# : \pi_1(X, a) \longrightarrow \pi_1(X, b)$ t.c. $\gamma_\#([\alpha]) = [\bar{\gamma} * \alpha * \gamma]$. Osserviamo che è ben definita.

Teorema 5.2.7. $\gamma_\# : \pi_1(X, a) \longrightarrow \pi_1(X, b)$ è un isomorfismo di gruppi.

Dimostrazione. $\gamma_\#$ è un omomorfismo in quanto $\gamma_\#([\alpha][\beta]) = \gamma_\#([\alpha * \beta]) = [\bar{\gamma} * \alpha * \beta * \gamma] = [\bar{\gamma} * \alpha * \gamma * \bar{\gamma} * \beta * \gamma] = [\bar{\gamma} * \alpha * \gamma][\bar{\gamma} * \beta * \gamma] = \gamma_\#([\alpha]) \cdot \gamma_\#([\beta])$. È un isomorfismo con inversa $\bar{\gamma}_\#$. Infatti, $\bar{\gamma}_\#(\gamma_\#([\alpha])) = \bar{\gamma}_\#([\bar{\gamma} * \alpha * \gamma]) = [\bar{\gamma} * \bar{\gamma} * \alpha * \gamma * \bar{\gamma}] = [\alpha]$. Analogamente, $\gamma_\#(\bar{\gamma}_\#([\beta])) = [\beta]$. \square

Corollario 5.2.8. Il tipo di isomorfismo di $\pi_1(X, a)$ non dipende da a , per cui a volte si parla del gruppo fondamentale di X , $\pi_1(X)$.

Definizione 5.2.9. Sia $\Omega(S^1, a) = \{\gamma : S^1 \longrightarrow X \text{ con } \gamma(1) = a\}$ (S^1 lo vediamo in \mathbb{C} , cioè $1 \in S^1$ è $(1, 0)$). C'è una bigezione canonica tra $\Omega(a, a)$ e $\Omega(S^1, a)$ data da: se $\alpha \in \Omega(a, a)$, poiché $\alpha(0) = \alpha(1)$, α definisce una $\hat{\alpha} : [0, 1] \setminus \{0, 1\} \longrightarrow X$ continua. Identifichiamo d'ora in poi $[0, 1] \setminus \{0, 1\}$ tramite l'identificazione $\pi : [0, 1] \longrightarrow S^1, \pi(t) = e^{2\pi it}$, per cui $\hat{\alpha} : S^1 \longrightarrow X$ e $\hat{\alpha}(1) = \gamma(1) = a$. L'inverso della mappa $\alpha \mapsto \hat{\alpha}$ è $\alpha(t) = \hat{\alpha}(\pi(t))$.

Lemma 5.2.10. $Q = [0, 1] \times [0, 1], C \subseteq Q, C = \{s = 1\} \cup \{t = 0\} \cup \{t = 1\}$. Allora $Q/C \cong D^2$ tramite un omeomorfismo che manda $[t, 0]$ in $e^{2\pi it}$ per ogni $t \in [0, 1]$.

Dimostrazione. Non è stata fatta esplicitamente perché i conti sono orrendamente schifosi, per cui vi chiediamo di fare uno sforzo di immaginazione cercando di vedere la dimostrazione con "l'occhio della mente" (aiutatevi con un disegno e attenzione a non sbagliare con i bordi). \square

Proposizione 5.2.11. $\alpha \in \Omega(a, a)$, allora $[\alpha] = 1$ in $\pi_1(X, a) \Leftrightarrow \hat{\alpha} : S^1 \longrightarrow X$ si estende in maniera continua a D^2 .

Dimostrazione. (\Rightarrow) Se $\alpha \sim 1_a$, esiste $H : Q \longrightarrow X$ t.c. $H(t, 0) = \alpha(t), H(C) = \{a\}$ data dall'omotopia. H definisce per passaggio al quoziente una funzione continua. $\hat{H} : Q/C \longrightarrow X$, cioè tramite l'identificazione del lemma 5.2.10 $\hat{H} : D^2 \longrightarrow X$. Per costruzione, $\hat{H}|_{S^1} = \hat{\alpha}$, che dunque si estende come voluto. (\Leftarrow) Viceversa, se $\hat{\alpha}$ si estende a $f : D^2 \longrightarrow X$, la mappa $H : Q \longrightarrow X$ data da $H = f \circ \pi$, dove $\pi : Q/C \longrightarrow D^2$ è l'identificazione, dà un'omotopia tra α e 1_a . \square

Corollario 5.2.12. Sia $P \subseteq \mathbb{R}^2$ un poligono convesso con lati e_1, \dots, e_n parametrizzati da $\phi_i : [0, 1] \rightarrow e_i$ e siano $\gamma : \partial P = e_1 \cup \dots \cup e_n \rightarrow X, \alpha_1 = \gamma \circ \phi_i$ per ogni i . Allora $\alpha_1 * \alpha_2 * \dots * \alpha_n \sim 1_{\alpha_1(0)} \Leftrightarrow \gamma$ si estende a P in maniera continua.

Dimostrazione. Esiste un omeomorfismo $f : P \rightarrow D^2$ con $f(\partial P) = S^1$, per cui la tesi segue da quanto già visto. \square

5.3 Il gruppo fondamentale come funtore

Sia $f : X \rightarrow Y$ continua. Se $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ è continua, lo è anche $f \circ \alpha$, per cui f induce $f_* : \Omega(a, a) \rightarrow \Omega(f(a), f(a))$. Se $\alpha \sim \beta$ in $\Omega(a, a)$ e $H : I^2 \rightarrow X$ è un'omotopia di cammini tra α e β , $f \circ H : I^2 \rightarrow Y$ è un'omotopia di cammini tra $f_*\alpha$ e $f_*\beta$. Dunque f_* induce $f_* : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(Y, f(a))$.

- (i) f_* è un omomorfismo di gruppi: $f_*([\alpha][\beta]) = f_*([\alpha * \beta]) = [f \circ (\alpha * \beta)] = [(f \circ \alpha) * (f \circ \beta)] = [f \circ \alpha][f \circ \beta] = f_*([\alpha]) \cdot f_*([\beta])$.
- (ii) Se $g : Y \rightarrow Z$, $g_* \circ f_* = (g \circ f)_* : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(Z, g(f(a)))$. Infatti, $(g \circ f)_*([\alpha]) = [g \circ f \circ \alpha] = g_*([f \circ \alpha]) = g_*(f_*([\alpha])) = (g_* \circ f_*)([\alpha])$.
- (iii) Data $\text{id} : X \rightarrow X$, $\text{id}_* : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(X, a)$ è, ovviamente, l'identità.

Le proprietà appena elencate ci dicono che abbiamo trovato un funtore tra la categoria degli spazi topologici e quella dei gruppi.

Corollario 5.3.1. $f : X \rightarrow Y$ omeomorfismo $\Rightarrow f_* : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(Y, f(a))$ isomorfismo di gruppi.

Dimostrazione. Sia $g : X \rightarrow Y$ l'inversa continua di f , $g_* : \pi_1(Y, f(a)) \rightarrow \pi_1(X, a)$. $\text{id}_{\pi_1(X, a)} = (\text{id}_X)_* = (g \circ f)_* = g_* \circ f_*$. $\text{id}_{\pi_1(Y, f(a))} = (\text{id}_Y)_* = (f \circ g)_* = f_* \circ g_*$. Questo implica che f_* e g_* sono isomorfismi e sono uno l'inverso dell'altro. \square

Osservazione 5.3.2. X omeomorfo a Y implica X omotopicamente equivalente a Y . Domanda: X omotopicamente equivalente a Y implica $\pi_1(X) \cong \pi_1(Y)$?

Proposizione 5.3.3. Sia $f : X \rightarrow X$ omotopa all'identità tramite $H : X \times I \rightarrow X$ e sia $\gamma : [0, 1] \rightarrow X$ t.c. $\gamma(s) = H(a, s)$. Allora le mappe $f_* : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(X, f(a))$ e $\gamma_\# : \pi_1(X, a) \rightarrow \pi_1(X, f(a))$ coincidono.

Dimostrazione. Per ogni $\alpha \in \Omega(a, a)$ definisco $K : I^2 \rightarrow X$, $K(t, s) = H(\alpha(t), s)$. Dunque la giunzione $\alpha * \gamma * f_*\alpha$ è omotopa all'identità (esercizio; hint: "disegnate" K , poi al tempo t fermatevi prima lungo γ), dunque per il corollario 5.2.12 si estende da ∂I^2 a I^2 . Lo stesso vale per $f_*\alpha * \bar{\gamma} * \bar{\alpha} * \gamma$ che è perciò omotopo come cammino a $1_{f(a)}$ e ciò implica che $1_{\pi_1(X, f(a))} = [f_*\alpha * (\bar{\gamma} * \bar{\alpha} * \gamma)] = [f_*\alpha][\bar{\gamma} * \bar{\alpha} * \gamma]$, cioè $f_*([\alpha]) = [\bar{\gamma} * \bar{\alpha} * \gamma]^{-1} = [\bar{\gamma} * \alpha * \gamma] = \gamma_\#([\alpha])$. \square

Teorema 5.3.4. $f : X \longrightarrow Y$ equivalenza omotopica $\Rightarrow f_* : \pi_1(X, a) \longrightarrow \pi_1(Y, f(a))$ è un isomorfismo.

Dimostrazione. Sia $g : Y \longrightarrow X$ un'inversa omotopica di f . Poiché $g \circ f \sim \text{id}_X$, per la proposizione 5.3.3 $(g \circ f)_* = g_* \circ f_* : \pi_1(X, a) \longrightarrow \pi_1(X, g(f(a)))$ coincide con $\gamma_\#$ per qualche $\gamma \in \Omega(a, g(f(a)))$, dunque è un isomorfismo. Analogamente, $f_* \circ g_*$ è un isomorfismo. Dunque f_* è iniettiva e suriettiva, da cui la tesi. \square

Definizione 5.3.5. X è SEMPLICEMENTE CONNESSO se X è connesso per archi e $\pi_1(X, a) = 1$ per ogni $a \in X$.

Corollario 5.3.6. Se X è contrattile, X è semplicemente connesso.

Proposizione 5.3.7. $A \subseteq X$ retratto, con inclusione $i : A \longrightarrow X$ e retrazione $r : X \longrightarrow A$. Allora

- (i) i_* è iniettiva e r_* è suriettiva (per qualsiasi scelta del punto base in A);
- (ii) se la retrazione è per deformazione, i_* e r_* sono isomorfismi.

Dimostrazione. (i) Dato $a \in A$, $r \circ i = \text{id}_A \Rightarrow r_* \circ i_* = \text{id}_{\pi_1(A, a)}$, da cui la tesi.

- (ii) Segue dal fatto che i e r sono equivalenze omotopiche e dal teorema 5.3.4. \square

Osservazione 5.3.8. Se $A \subseteq X$, $i_* : \pi_1(A, a) \longrightarrow \pi_1(X, a)$ può non essere iniettiva. Vedremo che è così per $X = D^2$ e $A = S^1$.

Esercizio 5.3.9. Abbiamo studiato la mappa $\Omega(a, a) \longrightarrow \Omega(S^1, a)$ t.c. $\alpha \longmapsto \hat{\alpha}$ e abbiamo osservato che se $[\alpha] = [\beta]$ in $\pi_1(X, a)$ allora $\hat{\alpha} \sim \hat{\beta}$ come mappe $S^1 \longrightarrow X$. Perciò è ben definita la mappa $\psi : \pi_1(X, a) \longrightarrow [S^1, X]$ t.c. $\psi([\alpha]) = [\hat{\alpha}]$. Dimostrare che, se X è connesso per archi, ψ è suriettiva e $\psi([\alpha]) = \psi([\beta]) \Leftrightarrow [\alpha]$ è coniugato a $[\beta]$ in $\pi_1(X, a)$ (dunque $[S^1, X]$ è in bigezione con le classi di coniugio di $\pi_1(X, a)$).

5.4 Rivestimenti

Definizione 5.4.1. $f : X \longrightarrow Y$ è un *omeomorfismo locale* se per ogni $p \in X$ esistono U aperto con $p \in U$ e V aperto di Y con $f(p) \in V$ t.c. $f(U) = V$ e $f|_U : U \longrightarrow V$ è un omeomorfismo.

Fatto 5.4.2.

- (i) Un omeomorfismo locale è una mappa aperta;
- (ii) f omeomorfismo locale $\Rightarrow f^{-1}(y)$ è discreto per ogni $y \in Y$.

Definizione 5.4.3. Una mappa continua $p : E \longrightarrow X$ è un RIVESTIMENTO se X è connesso per archi e per ogni $x \in X$ esiste U aperto di X , $x \in U$ t.c. $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{i \in I} V_i$, $I \neq \emptyset$ e V_i aperto in E e $p|_{V_i} : V_i \longrightarrow U$ è un omeomorfismo per ogni $i \in I$.

Fatto 5.4.4.

- (i) Un rivestimento è anche un omeomorfismo locale;
- (ii) un rivestimento è suriettivo;
- (iii) un intorno U come quello dato dalla definizione di rivestimento si dice *ben rivestito*.

Esempio 5.4.5.

- (i) $p : \mathbb{R} \longrightarrow S^1$, $p(t) = (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$ è un rivestimento;
- (ii) $p : (-1, 1) \longrightarrow S^1$, $p(t) = (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t)$ è un omeomorfismo locale suriettivo, ma non un rivestimento;
- (iii) $\pi : \mathbb{R} \times \{-1, 1\} / \sim \longrightarrow \mathbb{R}$, $(x, \varepsilon) \sim (y, \varepsilon') \Leftrightarrow (x, \varepsilon) = (y, \varepsilon') \vee x = y \neq 0, \pi([x, \varepsilon]) = x$ è un omeomorfismo locale suriettivo, ma non un rivestimento;
- (iv) $\pi : S^n \longrightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{R})$, $\pi(x) = [x]$ è un rivestimento.

Definizione 5.4.6. Siano $p : E \longrightarrow X$ un rivestimento e $f : Y \longrightarrow X$ una funzione continua. Una funzione continua $\tilde{f} : Y \longrightarrow E$ si dice SOLLEVAMENTO DI f RISPETTO A p se $p \circ \tilde{f} = f$.

Proposizione 5.4.7. (Unicità del sollevamento) Sia $p : E \longrightarrow X$ un rivestimento, Y connesso, $f : Y \longrightarrow X$ continua. Siano \tilde{f}, \tilde{g} sollevamenti di f rispetto a p . Se esiste $y_0 \in Y$ con $\tilde{f}(y_0) = \tilde{g}(y_0)$, allora $\tilde{f} = \tilde{g}$.

Dimostrazione. Basta vedere che $\Omega = \{y \in Y | \tilde{f}(y) = \tilde{g}(y)\} \subseteq Y$ è sia aperto che chiuso. Per ipotesi $\Omega \neq \emptyset$ e Y è connesso, per cui avremmo necessariamente $\Omega = Y$, da cui la tesi.

Ω è aperto: sia $y \in \Omega$. Allora $\tilde{f}(y) = \tilde{g}(y) = \tilde{x}_0$. Siano $x_0 = p(\tilde{x}_0) = f(y)$ e U un intorno di x_0 ben rivestito. $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{i \in I} V_i$. Sia $i_0 \in I$ t.c. $\tilde{x}_0 \in V_{i_0}$.

\tilde{f}, \tilde{g} continue \Rightarrow esiste un intorno W di y t.c. $\tilde{f}(W) \subseteq V_{i_0}, \tilde{g}(W) \subseteq V_{i_0}$. $p|_{V_{i_0}}$ è iniettiva, dunque da $p \circ \tilde{f} = p \circ \tilde{g}$ ne deduciamo che $\tilde{f}|_W = \tilde{g}|_W \Rightarrow W \subseteq \Omega$.

Ω chiuso: $\Omega^C = Y \setminus \Omega$ è aperto. Sia $y \in \Omega^C \Rightarrow \tilde{f}(y) \neq \tilde{g}(y)$. Tuttavia $(p \circ \tilde{f})(y) = (p \circ \tilde{g})(y) = x_0$. Se U è un intorno ben rivestito di x_0 , $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{i \in I} V_i$

e da $\tilde{f}(y) \neq \tilde{g}(y)$ ne deduciamo che $\tilde{f}(y) \in V_{i_0}, \tilde{g}(y) \in V_{i_1}, i_0 \neq i_1$. Per continuità di \tilde{f} e \tilde{g} si conclude. \square

Teorema 5.4.8. Sia $p : E \longrightarrow X$ un rivestimento, $\gamma : [0, 1] \longrightarrow X$ un cammino continuo. Siano $x_0 = \gamma(0)$ e $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$. Allora esiste un unico $\tilde{\gamma} : [0, 1] \longrightarrow E$ cammino continuo con $\tilde{\gamma}(0) = \tilde{x}_0$ e $p \circ \tilde{\gamma} = \gamma$.

Dimostrazione. L'unicità segue dalla proposizione 5.4.7. Ricopriamo adesso X con aperti ben rivestiti $\{U_i\}_{i \in I}$ e sia $\varepsilon > 0$ numero di Lebesgue per il ricoprimento $\{\gamma^{-1}(U_i), i \in I\}$ di $[0, 1]$. Perciò, se $1/n < \varepsilon$, per ogni $k = 0, 1, \dots, n-1$, $\gamma([k/n, (k+1)/n]) \subseteq U_{i_k}$ ben rivestito. Definiamo induttivamente $\tilde{\gamma}$ su $[k/n, (k+1)/n]$ come segue: per definizione di rivestimento esiste V_{i_0} aperto di E t.c. $\tilde{x}_0 \in V_{i_0}$ e $p_0 = p|_{V_{i_0}} : V_{i_0} \longrightarrow U_{i_0}$ è un omeomorfismo; per ogni $t \in [0, 1/n]$, $\tilde{\gamma}(t) = p_0^{-1}(\gamma(t))$. Una volta definito $\tilde{\gamma}$ continuo su $[0, k/n]$, troviamo $V_{i_k} \subseteq E$ t.c. $\tilde{\gamma}(k/n) \in V_{i_k}$ e $p_k = p|_{V_{i_k}} : V_{i_k} \longrightarrow U_{i_k}$ è un omeomorfismo. Poniamo dunque $\tilde{\gamma}(t) = p_k^{-1}(\gamma(t))$ per ogni $t \in [k/n, (k+1)/n]$. È ora facile verificare che questa definizione soddisfa le condizioni richieste. \square

Proposizione 5.4.9. Sia $p : E \longrightarrow X$ un rivestimento, $x_0, x_1 \in X$. Allora esiste una bigezione tra $p^{-1}(\{x_0\})$ e $p^{-1}(\{x_1\})$. La cardinalità di $p^{-1}(\{x_0\})$ si dice *grado* del rivestimento e si indica con $\deg p$.

Dimostrazione. X connesso per archi \Rightarrow esiste $\gamma \in \Omega(x_0, x_1)$ e, dato $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(\{x_0\})$, esiste un sollevamento $\tilde{\gamma}_{\tilde{x}_0} : [0, 1] \longrightarrow E$ con punto iniziale \tilde{x}_0 . È ben definita

$$\begin{aligned} \psi : p^{-1}(\{x_0\}) &\longrightarrow p^{-1}(\{x_1\}) \\ \tilde{x}_0 &\longmapsto \tilde{\gamma}_{\tilde{x}_0}(1) \end{aligned}$$

che ammette inversa ottenuta da $\bar{\gamma} \in \Omega(x_1, x_0)$. \square

Definizione 5.4.10. (Sezione) Dato $U \subseteq X$, una SEZIONE $s : U \longrightarrow E$ di un rivestimento $p : E \longrightarrow X$ è una mappa continua t.c. $p(s(x)) = x$ per ogni $x \in U$. Si dice *locale* se U è un aperto di X , *globale* se $U = X$.

Osservazione 5.4.11. Per definizione, se p è un rivestimento, per ogni $x \in X$ esiste $U \subseteq X$ aperto con sezione locale definita su U .

Teorema 5.4.12. (Sollevamento delle omotopie) Siano $p : E \longrightarrow X$ un rivestimento, $f : Y \longrightarrow X$ continua con Y localmente connesso per archi. Sia $F : Y \times [0, 1] \longrightarrow X$ t.c. $F(y, 0) = f(y)$ per ogni $y \in Y$. Sia $\tilde{f} : Y \longrightarrow E$ un sollevamento di f , cioè $p \circ \tilde{f} = f$. Allora esiste $\tilde{F} : Y \times [0, 1] \longrightarrow E$ che solleva F , cioè $p \circ \tilde{F} = F$, ed estende \tilde{f} , cioè $\tilde{F}(y, 0) = \tilde{f}(y)$ per ogni $y \in Y$.

Dimostrazione. Poniamo, per ogni $y_0 \in Y$, $\gamma_{y_0} : [0, 1] \rightarrow X$ il cammino $\gamma_{y_0}(t) = F(y_0, t)$. Sia $\tilde{\gamma}_{y_0}$ il sollevamento di γ_{y_0} a partire da $\tilde{f}(y_0)$. Poniamo infine $\tilde{F}(y_0, t) = \tilde{\gamma}_{y_0}(t)$. È chiaro che $p \circ \tilde{F} = F$. Serve \tilde{F} continua, basta vedere che per ogni $(y_0, t) \in Y \times [0, 1]$ esiste un intorno U in $Y \times [0, 1]$ t.c. $\tilde{F}|_U = s \circ F|_U$ dove s è una sezione locale (continua) del rivestimento. Poiché $[0, 1]$ è compatto, analizzando il ricoprimento $\{F^{-1}(W)|W \text{ aperto ben rivestito di } X\}$ otteniamo un numero finito di aperti Z_1, \dots, Z_n di $Y \times [0, 1]$ che ricoprono $y_0 \times [0, 1] \cong [0, 1]$ e sono t.c. $F(Z_i)$ è contenuto in un intorno ben rivestito di X per ogni i . Possiamo supporre $Z_i = A_i \times B_i$, A_i aperto di Y e B_i aperto di $[0, 1]$, $y_0 \in A_i$ per ogni i . Sia $A = \bigcap_{i=1}^n A_i$ aperto di Y con $y_0 \in A$ e osserviamo che $\bigcup_{i=1}^n B_i = [0, 1]$. Sia $1/k < \text{numero di Lebesgue di } \{B_1, \dots, B_n\}$. Allora per ogni $j = 0, 1, \dots, k-1$ $A \times [j/k, (j+1)/k] \subseteq A_i \times B_i$ per qualche i , perciò $F(A \times [j/k, (j+1)/k]) \subseteq U_j$ con U_j aperto ben rivestito. Ora, per definizione di sollevamenti di cammini, $\tilde{F}|_{A \times [0, 1/k]} = s_0 \circ F$ dove $s_0 : U_0 \rightarrow E$ è una sezione locale (si suppone A connesso per archi). Induttivamente $\tilde{F}|_{A \times [j, (j+1)/k]} = s_j \circ F$ con $s_j : U_j \rightarrow E$ sezione locale per ogni j , da cui la tesi. \square

Corollario 5.4.13. Siano $\gamma_1, \gamma_2 : [0, 1] \rightarrow X$ cammini omotopi (a estremi fissi), $\gamma_1(0) = \gamma_2(0) = x_0$. Allora, se $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$, $(\tilde{\gamma}_1)_{\tilde{x}_0}$ è omotopo a $(\tilde{\gamma}_2)_{\tilde{x}_0}$ (a estremi fissi). In particolare, $(\tilde{\gamma}_1)_{\tilde{x}_0}(1) = (\tilde{\gamma}_2)_{\tilde{x}_0}(1)$.

Dimostrazione. Si prenda come F l'omotopia tra i due cammini. Bisogna verificare che \tilde{F} data dal teorema 5.4.12 è un'omotopia tra i sollevamenti dei due cammini, cioè che è a estremi fissi e solleva le cose giuste. Tutto ciò segue dall'unicità del sollevamento data dalla proposizione 5.4.7. \square

Corollario 5.4.14. Sia $p : E \rightarrow X$ un rivestimento. Allora $p_\star : \pi_1(E, \tilde{x}_0) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$ è iniettiva.

Dimostrazione. $\alpha = [\gamma] \in \ker p_\star \Rightarrow p \circ \gamma \sim c_{x_0}$ (cammino costante) $\Rightarrow \gamma = \widetilde{(p \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0} \sim \widetilde{(c_{x_0})}_{\tilde{x}_0} = c_{\tilde{x}_0} \Rightarrow [\gamma] = 1 \in \pi_1(E, \tilde{x}_0)$. \square

Definizione 5.4.15. (Azione di monodromia) Siano $p : E \rightarrow X$ un rivestimento, $x_0 \in X$, $F = p^{-1}(x_0)$. Allora esiste un'azione destra di $\pi_1(X, x_0)$ su F definita così:

$$\begin{aligned} F \times \pi_1(X, x_0) &\rightarrow F \\ (\tilde{x}, [\gamma]) &\mapsto \tilde{x} \cdot [\gamma] = \tilde{\gamma}_{\tilde{x}}(1), \end{aligned}$$

detta AZIONE DI MONODROMIA.

Osservazione 5.4.16. Sia $p : E \rightarrow X$ un rivestimento, $F = p^{-1}(x_0) \subseteq E$, $x_0 \in X$. La monodromia $F \times \pi_1(X, x_0)$ è transitiva se e solo se E è connesso per archi.

Definizione 5.4.17. Un rivestimento $p : E \longrightarrow X$ si dice UNIVERSALE se E è semplicemente connesso, in particolare connesso per archi.

Proposizione 5.4.18. Sia $p : E \longrightarrow X$ un rivestimento universale, $x_0 \in X$, $\tilde{x}_0 \in F = p^{-1}(x_0)$. La mappa $\psi : \pi_1(X, x_0) \longrightarrow F$, $\psi([\gamma]) = \tilde{x}_0 \cdot [\gamma]$ è bigettiva, per cui $|\pi_1(X, x_0)| = |F|$.

Dimostrazione. E connesso per archi \Rightarrow la suriettività viene dal fatto che l'azione è transitiva. Se $\psi([\gamma_1]) = \psi([\gamma_2])$, $\tilde{x}_0 \cdot [\gamma_1] = \tilde{x}_0 \cdot [\gamma_2] \Rightarrow (\tilde{\gamma}_1)_{\tilde{x}_0}(1) = (\tilde{\gamma}_2)_{\tilde{x}_0}(1)$. Poiché E è semplicemente connesso, $(\tilde{\gamma}_1)_{\tilde{x}_0} = (\tilde{\gamma}_2)_{\tilde{x}_0} \Rightarrow \gamma_1 = p \circ \tilde{\gamma}_1 \sim p \circ \tilde{\gamma}_2 = \gamma_2 \Rightarrow [\gamma_1] = [\gamma_2]$, da cui l'injectività. \square

5.5 Alcuni gruppi fondamentali

Abbiamo adesso gli strumenti per poter determinare il gruppo fondamentale di alcuni spazi topologici. Iniziamo da quello di S^1 .

Teorema 5.5.1. $\pi_1(S^1) \simeq \mathbb{Z}$.

Dimostrazione. Analizziamo il rivestimento

$$\begin{aligned} p : \mathbb{R} &\longrightarrow S^1 \\ t &\longmapsto (\cos 2\pi t, \sin 2\pi t), \end{aligned}$$

$F = p^{-1}(1, 0) = \mathbb{Z}$. Poniamo $\psi : \pi_1(S^1, (1, 0)) \longrightarrow \mathbb{Z}$, $\psi([\gamma]) = 0 \cdot [\gamma]$. \mathbb{R} è semplicemente connesso, quindi basta vedere che ψ è un omeomorfismo. Dati $[\alpha], [\beta] \in \pi_1(S^1, x_0)$, $x_0 = (1, 0)$, abbiamo che $\psi([\alpha] \cdot [\beta]) = \psi([\alpha * \beta]) = (\alpha * \beta)_0(1) = \tilde{\alpha}_0 * \tilde{\beta}_{\tilde{\alpha}_0(1)}(1) = \tilde{\beta}_{\tilde{\alpha}_0(1)}(1)$. Ora, $\tilde{\beta}_{\tilde{\alpha}_0(1)}$ e $\tilde{\alpha}_0(1) + \tilde{\beta}_0$ sono entrambi sollevamenti di β a partire dallo stesso punto iniziale. Dunque $\psi([\alpha] \cdot [\beta]) = (\tilde{\alpha}_0(1) + \tilde{\beta}_0)(1) = \tilde{\alpha}_0(1) + \tilde{\beta}_0(1) = \psi([\alpha]) + \psi([\beta])$, da cui la tesi. \square

Proposizione 5.5.2. $R \subseteq X$ retracts, allora per ogni $x_0 \in R$ $i_* : \pi_1(R, x_0) \longrightarrow \pi_1(X, x_0)$ è injectiva e $r_* : \pi_1(X, x_0) \longrightarrow \pi_1(R, x_0)$ è suriettiva.

Dimostrazione. Già vista nel punto (i) della proposizione 5.3.7. \square

Corollario 5.5.3. $S^1 = \partial D^2$ non è un retracts di D^2 .

Teorema 5.5.4. (Teorema del punto fisso di Brouwer) $f : D^2 \longrightarrow D^2$ continua $\Rightarrow f$ ha almeno un punto fisso.

Dimostrazione. Se $f(x) \neq x$ per ogni $x \in D^2$, costruiamo una retrazione $r : D^2 \longrightarrow S^1$ come segue:



cerchiamo $t > 0$ t.c. $\|f(x) + t(x - f(x))\|^2 = 1$, poniamo poi $r(x) = f(x) + t(x - f(x))$ per cui basta vedere che t dipende in modo continuo da x . Risolviamo $1 = \|f(x)\|^2 + 2t \langle f(x), x - f(x) \rangle + t^2 \|x - f(x)\|^2$ e prendiamo $t > 0$. \square

Osservazione 5.5.5. Tramite $\pi_1(S^1) \simeq \mathbb{Z}$, l'elemento $n \in \mathbb{Z}$ è identificato da $\gamma(t) = (\cos 2\pi nt, \sin 2\pi nt)$ in quanto $\tilde{\gamma}_0(t) = nt$ e $\tilde{\gamma}_0(1) = n$.

Esercizio 5.5.6.

$$\begin{aligned} f : \mathbb{C} \setminus \{0\} &\longrightarrow \mathbb{C} \setminus \{0\} \\ z &\longmapsto z^n \end{aligned}$$

è un rivestimento di grado n .

Teorema 5.5.7. Dati X, Y e $x_0 \in X, y_0 \in Y$,
 $\pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) = \pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0)$.

Dimostrazione. È lasciata come esercizio per il lettore. Traccia: $\pi_X : X \times Y \longrightarrow X$, $\pi_Y : X \times Y \longrightarrow Y$ le proiezioni,

$$\begin{aligned} i : X &\longrightarrow X \times Y \\ x &\longmapsto (x, y_0), \\ j : Y &\longrightarrow X \times Y \\ y &\longmapsto (x_0, y). \end{aligned}$$

Poniamo $\psi : \pi_1(X \times Y, (x_0, y_0)) \longrightarrow \pi_1(X, x_0) \times \pi_1(Y, y_0)$, $\psi(\alpha) = ((\pi_X)_*(\alpha), (\pi_Y)_*(\alpha))$. Si verifica che funziona. \square

Corollario 5.5.8. $\pi_1(S^1 \times S^1) = \mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}$.

Esercizio 5.5.9. Siano α che genera $\mathbb{Z} \times \{0\}$ e β che genera $\{0\} \times \mathbb{Z}$ sul toro. Visualizzare l'omotopia di cammini tra $\alpha * \beta$ e $\beta * \alpha$.

5.6 Gruppi liberi

Si fa un po' di algebra perché sì.

Definizione 5.6.1. Siano $\{G_i\}$ con $i \in I$ dei gruppi. Il loro prodotto libero è una coppia $(G, \{\phi_i\}_{i \in I})$ con G gruppo e i $\phi_i: G_i \rightarrow G$ omomorfismi tali che per ogni gruppo H e famiglia di omomorfismi $\psi_i: G_i \rightarrow H$ esista unico omomorfismo $\psi: G \rightarrow H$ con la proprietà che $\psi\phi_i = \psi_i$ per ogni $i \in I$. Spesso si indicherà il prodotto libero con il simbolo $\ast_i G_i$.

Proposizione 5.6.2. Il prodotto libero è unico a meno di isomorfisimi.

Dimostrazione. Siano (G, ϕ_i) e (G', ϕ'_i) prodotti liberi dei G_i . La dimostrazione segue lo schema che si è sempre fatto con le proprietà universali. Inizio con lo scrivere la definizione del prodotto libero G , utilizzando $H = G'$ e $\psi_i = \phi'_i$. Dunque ho garantita un'unica funzione $\phi': G \rightarrow G'$ tale che $\phi'\phi_i = \phi'_i$. Analogamente trovo una funzione $\phi: G' \rightarrow G$. Allora $\phi_i = \phi\phi'\phi_i$ e $\phi'_i = \phi'\phi\phi'_i$, da cui si ricava che $\phi\phi'$ e $\phi'\phi$ sono identità, e dunque ϕ e ϕ' sono gli isomorfismi tra G e G' . \square

Proposizione 5.6.3. Il prodotto libero dei G_i esiste.

Dimostrazione. Sia $W = \cup_{i \in I} (G_i \setminus \{e_i\})$, dove gli e_i sono le unità nei rispettivi gruppi. Sia W^* l'insieme delle parole finite (eventualmente vuote) sull'alfabeto W . Definisco anche

$$G = \{g \in W^* \mid \forall k \in \mathbb{N}, g_k \in G_i \Rightarrow g_{k+1} \notin G_i\}$$

Su G voglio definire un'operazione che lo renda un gruppo. Lo faccio con una concatenazione più un'eventuale riduzione cioè:

$$(g_1, \dots, g_i)(h_1, \dots, h_j) = \begin{cases} (g_1, \dots, g_i, h_1, \dots, h_j) & \text{se } G_i \neq H_1 \\ (g_1, \dots, g_i h_1, \dots, h_j) & \text{se } G_i = H_1 \text{ e } g_i h_1 \neq e \\ (g_1, \dots, g_{i-1})(h_2, \dots, h_j) & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Questo è un gruppo con elemento neutro la parola vuota $()$. Bisogna trovare degli omomorfismi e poi far vedere che rispettano la proprietà universale per essere il prodotto libero cercato.

Possiamo equipaggiare ogni gruppo con una funzione $\phi_i: G_i \rightarrow G$ che associa $\phi_i(x) = (x)$ la parola di una lettera. Si prenda un gruppo H e degli omomorfismi $\psi: G_i \rightarrow H$. Pongo allora $\psi: G \rightarrow H$ come

$$\psi((g_1, \dots, g_n)) = \psi_{i_1}(g_1) \cdots \psi_{i_n}(g_n)$$

Si verifica che tale ψ è effettivamente l'omomorfismo cercato, unico per costruzione. \square

Definizione 5.6.4. Dato $S = \{x_i\}$ l'insieme $F(S) = \ast_i G_i$ è il gruppo libero generato da S , dove $G_i = \{x_i^m \mid m \in \mathbb{Z}\} \cong \mathbb{Z}$.

Osservazione 5.6.5. Si ha canonicamente un'immersione $i: S \hookrightarrow F(S)$, tale per cui, preso un gruppo H e una funzione $\psi: S \rightarrow H$, esiste unico un omomorfismo $\phi: F(S) \rightarrow H$ tale che $\phi \circ i = \psi$.

Definizione 5.6.6. Dato un gruppo G e un sottoinsieme $S \subseteq G$, la chiusura normale di S , detta $N(S)$, è il più piccolo sottogruppo normale contenente S .

Osservazione 5.6.7. Ogni chiusura normale si può esprimere come Span dei coniugati.

Definizione 5.6.8. Dato un insieme S e un sottoinsieme $R \subseteq F(S)$, si definisce la presentazione come $\langle S \mid R \rangle = F(S)/N(R)$.

Esempio 5.6.9.

- (i) $\mathbb{Z} \cong \langle 1 \rangle$;
- (ii) $\mathbb{Z} * \mathbb{Z} \cong F(\{a, b\})$;
- (iii) $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z} \cong \langle a, b \mid aba^{-1}b^{-1} \rangle$.

Proposizione 5.6.10. Sia $R \subseteq F(S)$, $\psi: F(S) \rightarrow H$ un omomorfismo. Se $\psi(R) = \{e\}$, allora esiste un omomorfismo $\bar{\psi}: \langle S \mid R \rangle \rightarrow H$ tale che $\bar{\psi}([s]) = \psi(s)$ per ogni $s \in F(S)$.

Proposizione 5.6.11. Sia $G_i = \langle S_i \mid R_i \rangle$ $i = 1, 2, 3$, $\phi_1: G_0 \rightarrow G_1$, $\phi_2: G_0 \rightarrow G_2$. Sia $G = G_1 * G_2 / N$ con $N = N(\{\phi_1(g)\phi_2(g)^{-1} \mid g \in G_0\})$. Allora

$$G \cong \langle S_1 \cup S_2 \mid R_1 \cup R_2 \cup R \rangle$$

con $R = \{\tilde{\phi}_1(s)\tilde{\phi}_2(s)^{-1} \mid s \in S_0\}$, $\tilde{\phi}_i: F(S_0) \rightarrow F(S_i)$ le estensioni naturali di ϕ_i .

5.7 Il teorema di Van Kampen

Teorema 5.7.1. (Van Kampen) Sia X uno spazio topologico con $X = A \cup B$ dove A , B e $A \cap B$ sono aperti connessi per archi. Si considerino le inclusioni:

$$\begin{aligned}\alpha: A \cap B &\longrightarrow A \\ \beta: A \cap B &\longrightarrow B \\ f: A &\longrightarrow X \\ g: B &\longrightarrow X\end{aligned}$$

Sia inoltre G un gruppo e si considerino ancora gli omomorfismi

$$\begin{aligned}h: \pi_1(A) &\longrightarrow G \\ k: \pi_1(B) &\longrightarrow G\end{aligned}$$

tali per cui $h \alpha_* = k \beta_*$.

Allora esiste unico un omomorfismo $\phi: \pi_1(X) \longrightarrow G$ tale che $\phi f_* = h$ e $\phi g_* = k$.

Dimostrazione. La dimostrazione è una cosa bestiale in termini di grafici e disegni. Arriverà. □

Corollario 5.7.2. Nelle notazioni del teorema precedente, si ha che

$$\pi_1(X) \cong \frac{\pi_1(A) * \pi_1(B)}{N}$$

con $N = N(\{i\alpha_*(g) j\beta_*(g)^{-1} \mid g \in \pi_1(A \cap B)\})$, dove i e j sono le immersioni dei π_1 .

Dimostrazione. Applico la definizione del prodotto libero con gli omomorfismi f_* e g_* . Questo mi dà un omomorfismo ψ che fa commutare il diagramma.

$$\begin{array}{ccccc}\pi_1(A) & & & & \\ & \searrow i & & f_* & \\ & & \pi_1(A) * \pi_1(B) & \xrightarrow{\psi} & \pi_1(X) \\ & \nearrow j & & g_* & \\ \pi_1(B) & & & & \end{array}$$

Con un po' di conti si mostra che $\psi(N) = \{e\}$, il che mi permette di applicare una proposizione sui prodotti liberi che mi garantisce l'esistenza di un omomorfismo

$$\bar{\psi}: \frac{\pi_1(A) * \pi_1(B)}{N} \longrightarrow \pi_1(X)$$

Per esercizio si verifichi che la funzione data da Van Kampen (utilizzando come G il quoziente di gruppi cercato, $h = i$ e $k = j$) è un'inversa di $\bar{\psi}$. □

Esempio 5.7.3. $\pi_1(S^n) = \{e\}$ per $n \geq 2$.

Dimostrazione. Prendo $A = S^n \setminus \{(1, 0, \dots, 0)\}$ e $B = S^n \setminus \{(0, \dots, 0, 1)\}$. La proiezione stereografica mostra che sono entrambi semplicemente connessi, e dunque anche S^n lo è. \square

Osservazione 5.7.4. $\pi_1(\mathbb{P}^n(\mathbb{R})) \simeq \mathbb{Z}_2$ per ogni $n \geq 2$. Infatti, S^n è un rivestimento universale di $\mathbb{P}^n(\mathbb{R})$, per cui $|\pi_1(\mathbb{P}^n(\mathbb{R}))| = \text{grado del rivestimento} = 2$. Domanda: $\pi_1(\mathbb{P}^1(\mathbb{R})) = ?$

Esempio 5.7.5. $\pi_1(\mathbb{P}^n(\mathbb{C}))$ è banale per ogni n .

Dimostrazione. Per induzione, il caso $n = 1$ funziona. Prendiamo $H = \{[x_0 : \dots : x_n] \mid x_0 = 0\}$, $A = \mathbb{P}^n \setminus H$ e $B = \mathbb{P}^n \setminus \{[1 : 0 : \dots : 0]\}$. Si ha che $A \cong \mathbb{C}^n$ con

$$[x_0 : \dots : x_n] \mapsto \left(\frac{x_1}{x_0}, \dots, \frac{x_n}{x_0} \right)$$

Quindi A è semplicemente connesso. $A \cap B$ è semplicemente connesso perché è isomorfo a tutto \mathbb{C}^n tolta l'origine.

Sia $r \subseteq \mathbb{C}^{n+1}$ la retta generata da $(1, 0, \dots, 0)$. Sia $h: \mathbb{C}^{n+1} \setminus r \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}^{n+1}$ con $h((x_0, \dots, x_n), t) = (tx_0, \dots, x_n)$. Si ha che h passa al quoziente che definisce lo spazio proiettivo, e ho ottenuto che B è omotopo a \mathbb{P}^{n-1} . Quindi per ipotesi induttiva si conclude. \square

Definizione 5.7.6. Σ_g è la superficie con g buchi. Per esempio Σ_0 è la sfera e Σ_1 è il toro.

Esempio 5.7.7. Vogliamo calcolare il gruppo fondamentale di Σ_g . Sia P un 4g-agono, con i lati indicati con $a_1, b_1, a_1^{-1}, b_1^{-1}, a_2, \dots$ in senso antiorario. Allora Σ_g è P quozientato l'identificazione dei lati con lo stesso nome, in modo simile alla costruzione del toro. Non abbiamo formalizzato questo passaggio, basta soltanto essere in grado di vederlo.

Sia p un punto interno a P . Chiamo $A = \pi(P \setminus \{p\})$ e $B = \pi(P \setminus \partial P)$, dove π è la proiezione al quoziente. Si ha innanzi tutto che B ha gruppo fondamentale banale.

Inoltre A si retrae (radialmente) su $\pi(\partial P)$. Ora un altro passaggio di cui si richiede solo l'intuito geometrico: $\pi(\partial P)$ è il wedge di $2g$ cerchi. Dunque $\pi_1(A)$ è il prodotto libero di $2g$ copie di \mathbb{Z} . Infine $A \cap B$ è omotopo a una circonferenza. Un rappresentante α del generatore del gruppo fondamentale è la proiezione di un laccio che fa un giro intorno a p . Allora dentro $\pi_1(A)$ l'immagine di α è $\prod_{i=1}^g a_i b_i a_i^{-1} b_i^{-1}$. Allora

$$\pi_1(\Sigma_g) = \langle a_1, \dots, b_g \mid \prod_{i=1}^g a_i b_i a_i^{-1} b_i^{-1} \rangle$$

Proposizione 5.7.8. Detto $\Gamma_g = \pi_1(\Sigma_g)$, si ha che $\Gamma_g/[\Gamma_g, \Gamma_g] \cong \mathbb{Z}^{2g}$.

Dimostrazione. Costruisco una funzione $\psi: \Gamma_g \longrightarrow \mathbb{Z}^{2g}$ che manda a_i e b_i distinti in generatori distinti. Si verifica che ψ è un omomorfismo surgettivo. Si mostra con rapido conto che $[\Gamma_g, \Gamma_g] \subseteq \text{Ker } \psi$. Infine si costruisce a mano l'inversa di $\bar{\psi}: \Gamma_g/[\Gamma_g, \Gamma_g] \rightarrow \mathbb{Z}^{2g}$. \square

Corollario 5.7.9. Si ha che $\Sigma_m \sim \Sigma_n$ se e solo se $\Sigma_m \cong \Sigma_n$ se e solo se $n = m$.

5.8 Ancora rivestimenti e gruppo fondamentale

D'ora in poi tutti gli spazi saranno localmente connessi per archi.

Proposizione 5.8.1. Sia $p: E \longrightarrow X$ rivestimento con E connesso e siano $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0) = F$ e $\psi: \pi_1(X, x_0) \longrightarrow F$, $\psi(\alpha) = \tilde{x}_0 \cdot \alpha$. ψ induce una bigezione $p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0)) \xrightarrow{\pi_1(X, x_0)} \cong F$. In particolare, $\text{stab}(\tilde{x}_0) = p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0))$ e, al variare di $\tilde{x} \in F$, i gruppi $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) = \text{stab}(\tilde{x})$ sono tutti e soli i coniugati di $p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0)) = \text{stab}(\tilde{x}_0)$.

Dimostrazione. Poiché E è connesso, l'azione di monodromia è transitiva, per cui ψ è suriettiva. $\alpha = [\gamma] \in \text{stab}(\tilde{x}_0) \iff \tilde{\gamma}_{\tilde{x}_0}(1) = \tilde{x}_0 \iff \tilde{\gamma}_{\tilde{x}_0}$ è un loop in $E \iff [\gamma] \in p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0))$. Infatti, γ si solleva a un laccio chiuso se e solo se $\tilde{\gamma}_{\tilde{x}_0}$ definisce un elemento di $\pi_1(E, \tilde{x}_0)$. Da ciò segue $\psi(\alpha) = \psi(\beta) \iff \tilde{x}_0 \cdot \alpha = \tilde{x}_0 \cdot \beta \iff \tilde{x}_0 \cdot (\alpha\beta^{-1}) = \tilde{x}_0 \iff \alpha\beta^{-1} \in \text{stab}(\tilde{x}_0) \iff [\alpha] = [\beta]$ in $\text{stab}(\tilde{x}_0) \xrightarrow{\pi_1(X, x_0)}$, dunque ψ induce la bigezione richiesta.

Usando il fatto che l'azione è transitiva è facile vedere che $\text{stab}(\tilde{x}), \tilde{x} \in F$ sono tutti e soli i coniugati di $\text{stab}(\tilde{x}_0)$ (se $\tilde{x} \in F$, $\tilde{x} = \tilde{x}_0 \cdot \eta$ e $\text{stab}(\tilde{x}) = \eta^{-1} \cdot \text{stab}(\tilde{x}_0) \cdot \eta$). \square

Teorema 5.8.2. (di sollevamento) Sia $p: E \longrightarrow X$ un rivestimento connesso (cioè E è connesso), $x_0 \in X, \tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$ e sia $f: Y \longrightarrow X$ continua, Y connesso, $y_0 \in Y$ t.c. $f(y_0) = x_0$. Allora esiste un sollevamento $\tilde{f}: Y \longrightarrow E$ di f con $\tilde{f}(y_0) = \tilde{x}_0 \iff f_*(\pi_1(Y, y_0)) \subseteq p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0))$.

Dimostrazione. Consideriamo il seguente diagramma:

$$\begin{array}{ccc} & & E \\ & \nearrow \tilde{f} & \downarrow p \\ Y & \xrightarrow{f} & X \end{array}$$

(\Rightarrow) Se $f = p \circ \tilde{f}$, $f_\star = p_\star \circ \tilde{f}_\star$ (sui π_1 con i punti base scelti), dunque $\text{Im } f_\star \subseteq \text{Im } p_\star$.

(\Leftarrow) Definiamo \tilde{f} come segue: se $y \in Y$, scegliamo un cammino γ in Y con $\gamma(0) = y_0, \gamma(1) = y$. Poniamo $\tilde{f}(y) = \widetilde{(f \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0}(1)$. $p(\tilde{f}(y)) = p(\widetilde{(f \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0}(1)) = \widetilde{(f \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0}(1) = f(y) \Rightarrow p \circ \tilde{f} = f$. Verifichiamo che \tilde{f} sia ben definita: se β è un altro cammino da y_0 a y , $\gamma \sim \gamma * \beta * \beta \Rightarrow f \circ \gamma \sim f \circ (\gamma * \beta * \beta) = (f \circ (\gamma * \beta)) * (f \circ \beta)$, ma adesso notiamo che $\gamma * \beta = \alpha$ è un loop in y_0 , quindi $f \circ \alpha$ è un loop in x_0 e $[f \circ \alpha] \in f_\star(\pi_1(Y, y_0)) \subseteq p_\star(\pi_1(E, \tilde{x}_0))$, dunque $f \circ \alpha$ si solleva a un loop in E a partire da \tilde{x}_0 . Perciò $\widetilde{(f \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{((f \circ \alpha) * (f \circ \beta))}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{(f \circ \alpha)}_{\tilde{x}_0} * \widetilde{(f \circ \beta)}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{(f \circ \alpha)}_{\tilde{x}_0} * \widetilde{(f \circ \beta)}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{(f \circ \beta)}_{\tilde{x}_0}(1) \Rightarrow \tilde{f}$ è ben definita.

Continuità di \tilde{f} : dato $y \in Y$, sia U un intorno aperto connesso per archi e ben rivestito di $f(y)$ in X e sia $W = f^{-1}(U)$, che è aperto. $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{i \in I} V_i$ con i

V_i aperti in E . Scegliamo i_0 t.c. $\tilde{f}(y) \in V_{i_0}$. Sia anche $s : U \rightarrow V_{i_0}$ l'inversa continua di $p|_{V_{i_0}}$. Basta vedere che $\tilde{f}|_W = s \circ f|_W$, così avremmo $\tilde{f}|_W$ continua,

dunque \tilde{f} continua. Sia $\gamma \in \Omega(y_0, y)$ e per ogni $z \in W$ sia $\gamma_z \in \Omega(y, z)$. Scegliamo $\alpha_z = \gamma * \gamma_z$. $\tilde{f}(z) = \widetilde{(f \circ \alpha_z)}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{((f \circ \gamma) * (f \circ \gamma_z))}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{(f \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0} * \widetilde{(f \circ \gamma_z)}_{\tilde{x}_0}(1) = \widetilde{(f \circ \gamma)}_{\tilde{x}_0} * \widetilde{(f \circ \gamma_z)}_{\tilde{f}(y)}(1) = \widetilde{(f \circ \gamma_z)}_{\tilde{f}(y)}(1)$.

Adesso notiamo che $s \circ f \circ \gamma_z$ solleva $f \circ \gamma_z$ a partire da $\tilde{f}(y)$, dunque per unicità del sollevamento dev'essere uguale a $\widetilde{(f \circ \gamma_z)}_{\tilde{f}(y)}$, perciò $\widetilde{(f \circ \gamma_z)}_{\tilde{f}(y)}(1) = (s \circ f \circ \gamma_z)(1) = s(f(z))$. \square

Corollario 5.8.3. Siano $p : E \rightarrow X$ rivestimento connesso, $x_0 \in X$, $\tilde{x}_0 \in p^{-1}(x_0)$, $f : Y \rightarrow X$ con $f(y_0) = x_0$. Se Y è semplicemente connesso, esiste un unico sollevamento $\tilde{f} : Y \rightarrow E$ di f con $\tilde{f}(y_0) = \tilde{x}_0$.

Teorema 5.8.4. (Borsuk-Ulam) Non esistono mappe continue $f : S^2 \rightarrow S^1$ t.c. $f(-x) = -f(x)$.

Dimostrazione. Per assurdo, sia $f : S^2 \rightarrow S^1$ continua t.c. $f(-x) = -f(x)$. Siano $p : S^2 \rightarrow \mathbb{P}^2(\mathbb{R}), q : S^1 \rightarrow \mathbb{P}^1(\mathbb{R})$ le proiezioni. Abbiamo un diagramma commutativo di funzioni continue

$$\begin{array}{ccc} S^2 & \xrightarrow{f} & S^1 \\ \downarrow p & & \downarrow q \\ \mathbb{P}^2(\mathbb{R}) & \xrightarrow{\tilde{f}} & \mathbb{P}^1(\mathbb{R}) \end{array}$$

Si noti che il diagramma commuta perché $q(f(x_0)) = q(f(-x_0))$. Sappiamo che $\pi_1(\mathbb{P}^2(\mathbb{R})) = \mathbb{Z}_2$ e dato che $\mathbb{P}^1(\mathbb{R}) \cong S^1$ abbiamo che $\pi_1(\mathbb{P}^1(\mathbb{R})) = \mathbb{Z}$. Allora $\tilde{f}_\star : \pi_1(\mathbb{P}^2(\mathbb{R})) \rightarrow \pi_1(\mathbb{P}^1(\mathbb{R}))$ è la mappa banale.

$$\begin{array}{ccccc}
& & f & & \\
& & \curvearrowright & & \\
& & & & S^1 \\
& & h & \nearrow & \downarrow q \\
S^2 & \xrightarrow{p} & \mathbb{P}^2(\mathbb{R}) & \xrightarrow{\bar{f}} & \mathbb{P}^1(\mathbb{R})
\end{array}$$

Per il teorema di sollevamento, esiste $h : \mathbb{P}^2(\mathbb{R}) \rightarrow S^1$ con $q \circ h = \bar{f}$ (attenzione: non sappiamo che $h \circ p = f$). Scegliamo $x_0 \in S^2$. Sappiamo che $q(h(p(x_0))) = \bar{f}(p(x_0)) = q(f(x_0))$, dunque $h \circ p$ e f sono entrambi sollevamenti di $\bar{f} \circ p$. Dato $x_0 \in S^2$, sia $z_0 \in \mathbb{P}^1(\mathbb{R})$, $z_0 = \bar{f}(p(x_0))$. $q^{-1}(z_0) = \{y_0, -y_0\}$. Dunque $f(x_0) \in \{y_0, -y_0\}$. Supponiamo $f(x_0) = y_0$. Allora $f(-x_0) = -f(x_0) = -y_0$. Anche $h(p(x_0)), h(p(-x_0)) \in \{y_0, -y_0\}$, ma $p(x_0) = p(-x_0) \Rightarrow h(p(x_0)) = h(p(-x_0))$. Dunque $h(p(x_0)) = y_0 = f(x_0)$ o $h(p(-x_0)) = -y_0 = f(-x_0)$. Perciò f e $h \circ p$ sono sollevamenti che coincidono in un punto e per unicità (e connessione di S^2) $f = h \circ p$, assurdo perché $f(x_0) \neq f(-x_0)$ ma $h(p(x_0)) = h(p(-x_0))$. \square

Corollario 5.8.5. Sia $f : S^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ continua, allora esiste $x \in S^2$ t.c. $f(x) = f(-x)$.

Dimostrazione. Se $f(x) \neq f(-x)$ per ogni $x \in S^2$, $g : S^2 \rightarrow S^1, g(x) = \frac{f(x) - f(-x)}{\|f(x) - f(-x)\|}$ è ben definita e continua e t.c. $g(x) = -g(-x)$, assurdo. \square

Corollario 5.8.6. In ogni dato istante, esistono due punti antipodali sulla superficie della Terra che hanno uguali temperatura e pressione.

Dimostrazione. Assumiamo che la superficie terrestre sia una sfera e che temperatura e pressione siano funzioni continue del punto in cui vengono calcolate. Allora basta applicare il corollario precedente alla funzione che associa a ogni punto sulla superficie la coppia (temperatura, pressione). \square

Definizione 5.8.7. Dati $p_1 : E_1 \rightarrow X, p_2 : E_2 \rightarrow X$ rivestimenti, un MORFISMO tra p_1 e p_2 è una mappa continua $\varphi : E_1 \rightarrow E_2$ t.c. $p_2 \circ \varphi = p_1$. Il seguente diagramma commuta:

$$\begin{array}{ccc}
E_1 & \xrightarrow{\varphi} & E_2 \\
& \searrow p_1 & \swarrow p_2 \\
& X &
\end{array}$$

φ è un isomorfismo se e solo se esiste $\psi : E_2 \rightarrow E_1$ continua con $\varphi \circ \psi = \text{id}_{E_2}, \psi \circ \varphi = \text{id}_{E_1}$.

Composizione di morfismi è un morfismo e l'identità è un morfismo, per cui $\text{Aut}(E) = \text{Aut}(E, p) = \{\varphi : E \rightarrow E \mid \varphi \text{ è un isomorfismo}\}$ è un gruppo con la composizione.

Fissiamo un rivestimento connesso $p : E \rightarrow X$.

Teorema 5.8.8.

- (i) $\text{Aut}(E)$ agiscono su E in maniera propriamente discontinua (in particolare, libera);
- (ii) $\text{Aut}(E)$ agisce sulle fibre di E ;
- (iii) se F è una fibra di E e $\tilde{x}_0, \tilde{x}_1 \in F$, esiste $\varphi \in \text{Aut}(E)$ con $\varphi(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_1 \iff p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0)) = p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_1))$ (entrambi sottogruppi di $\pi_1(X, p(\tilde{x}_0)) = \pi_1(X, p(\tilde{x}_1))$).

Dimostrazione. (i) Dato $\tilde{x} \in E$, sia U un intorno ben rivestito connesso per archi di $p(\tilde{x}) \in X$. $p^{-1}(U) = \bigsqcup_{i \in I} V_i$ e sia i_0 t.c. $\tilde{x} \in V_{i_0}$. Basta vedere che se $\varphi \in \text{Aut}(E)$ e $\varphi(V_{i_0}) \cap V_{i_0} \neq \emptyset$, allora $\varphi = \text{id}$. Se $\varphi(V_{i_0}) \cap V_{i_0} \neq \emptyset$, esiste $z \in V_{i_0}$ t.c. $\varphi(z) \in V_{i_0}$. Poiché $p \circ \varphi = p$, $p(\varphi(z)) = p(z)$, ma $p|_{V_{i_0}}$ è iniettiva $\Rightarrow \varphi(z) = z$. Ora, sia φ sia id sono sollevamenti di p (a partire da E) e coincidono in z . Per unicità del sollevamento, $\varphi = \text{id}$.

(ii) Se $F = p^{-1}(x_0)$ e $\tilde{x} \in F$, $p(\varphi(\tilde{x})) = p(\tilde{x}) = x_0 \Rightarrow \varphi(\tilde{x}) \in F$.

(iii) (\Rightarrow) Se $\varphi \in \text{Aut}(E)$ verifica $\varphi(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_1$, poiché $p \circ \varphi = p$, $p_* \circ \varphi_* = p_*$ come mappe da $\pi_1(E, \tilde{x}_0)$ in $\pi_1(X, x_0)$. In particolare, $p_*(\varphi_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0))) = p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0))$, ma $\varphi_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0)) = \pi_1(E, \tilde{x}_1)$ perché $\varphi : E \rightarrow E$ è un omeomorfismo, dunque $\varphi_* : \pi_1(E, \tilde{x}_0) \rightarrow \pi_1(E, \tilde{x}_1)$ è un isomorfismo.

(\Leftarrow) Se $p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_0)) = p_*(\pi_1(E, \tilde{x}_1))$, applichiamo il teorema di sollevamento al seguente diagramma:

$$\begin{array}{ccc} & (E, \tilde{x}_1) & \\ & \downarrow p & \\ (E, \tilde{x}_0) & \xrightarrow{p} & (X, x_0) \end{array}$$

Applichiamolo prima considerando come rivestimento quello a partire da (E, \tilde{x}_1) per ottenere $\varphi : E \rightarrow E$ con $\varphi(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_1$ e $p \circ \varphi = p$. Analogamente, considerando invece (E, \tilde{x}_0) , troviamo $\psi : E \rightarrow E$ con $\psi(\tilde{x}_1) = \tilde{x}_0$ e $p \circ \psi = p$. Ora $\varphi \circ \psi$ e $\psi \circ \varphi$ sollevano p , così come l'identità, e sono t.c. $\varphi(\psi(\tilde{x}_1)) = \tilde{x}_1$ e $\psi(\varphi(\tilde{x}_0)) = \tilde{x}_0$, per cui per unicità dei sollevamenti $\varphi \circ \psi = \psi \circ \varphi = \text{id}_E$.

□

Teorema 5.8.9. Sia $F = p^{-1}(x_0)$. Per ogni $\varphi \in \text{Aut}(E), \alpha \in \pi_1(X, x_0), \tilde{x} \in F$ si ha $\varphi(\tilde{x} \cdot \alpha) = \varphi(\tilde{x}) \cdot \alpha$.

Dimostrazione. Sia $\alpha = [\gamma]$. Allora $\varphi \circ \tilde{\gamma}_{\tilde{x}}$ è un sollevamento di γ ($p \circ \varphi \circ \tilde{\gamma}_{\tilde{x}} = p \circ \tilde{\gamma}_{\tilde{x}} = \gamma$) e ha come punto iniziale $\varphi(\tilde{\gamma}_{\tilde{x}}(0)) = \varphi(\tilde{x})$. Dunque $\varphi \circ \tilde{\gamma}_{\tilde{x}} = \tilde{\gamma}_{\varphi(\tilde{x})}$. Quindi $\varphi(\tilde{x}) \cdot \alpha = \tilde{\gamma}_{\varphi(\tilde{x})}(1) = (\varphi \circ \tilde{\gamma}_{\tilde{x}})(1) = \varphi(\tilde{\gamma}_{\tilde{x}}(1)) = \varphi(\tilde{x} \cdot \alpha)$. □

Definizione 5.8.10. $p : E \rightarrow X$ rivestimento connesso si dice **REGOLARE** se per ogni fibra $F \subseteq E$ l'azione di $\text{Aut}(E)$ su F è transitiva.

Teorema 5.8.11. Sono fatti equivalenti:

- (i) p è regolare;
- (ii) esiste una fibra $F \subseteq E$ t.c. l'azione di $\text{Aut}(E)$ su F sia transitiva;
- (iii) per ogni $\tilde{x} \in E$, $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) \triangleleft \pi_1(X, p(\tilde{x}))$;
- (iv) esiste $\tilde{x} \in E$ t.c. $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) \triangleleft \pi_1(X, p(\tilde{x}))$.

Dimostrazione. (iii) \Rightarrow (iv) è ovvia.

(iv) \Rightarrow (iii). Supponiamo che valga per $\tilde{x} \in E$ e sia $\tilde{y} \in E, \tilde{\gamma} \in \Omega(\tilde{x}, \tilde{y})$. Sia $\gamma = p \circ \tilde{\gamma}, \gamma \in \Omega(x, y), x = p(\tilde{x}), y = p(\tilde{y})$. Abbiamo due isomorfismi $\tilde{\gamma}_\# : \pi_1(E, \tilde{x}) \rightarrow \pi_1(E, \tilde{y})$ e $\gamma_\# : \pi_1(X, x) \rightarrow \pi_1(X, y)$. Si vede che il seguente diagramma commuta:

$$\begin{array}{ccc} \pi_1(E, \tilde{x}) & \xrightarrow{\tilde{\gamma}_\#} & \pi_1(E, \tilde{y}) \\ \downarrow p_* & & \downarrow p_* \\ \pi_1(X, x) & \xrightarrow{\gamma_\#} & \pi_1(X, y) \end{array}$$

Dunque $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) \triangleleft \pi_1(X, x) \iff p_*(\pi_1(E, \tilde{y})) \triangleleft \pi_1(X, y)$.

Per concludere, basta vedere che se $F = p^{-1}(x)$ è una fibra e $\tilde{x} \in F$, allora l'azione di $\text{Aut}(E)$ su F è transitiva $\iff p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) \triangleleft \pi_1(X, x)$. Dati $\tilde{x}, \tilde{y} \in F$, abbiamo visto che esiste $\varphi \in \text{Aut}(E)$ con $\varphi(\tilde{x}) = \tilde{y} \iff p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) = p_*(\pi_1(E, \tilde{y}))$. Abbiamo anche visto che al variare di $\tilde{y} \in F$ i gruppi $p_*(\pi_1(E, \tilde{y}))$ sono tutti e soli i coniugati di $p_*(\pi_1(E, \tilde{x}))$. Dunque l'azione su F è transitiva $\iff p_*(\pi_1(E, \tilde{x}))$ coincide con tutti i suoi coniugati, cioè se è normale. \square

Teorema 5.8.12. Sia $p : E \rightarrow X$ regolare. Allora

$$\text{Aut}(E) \cong \pi_1(X, x) /_{p_*(\pi_1(E, \tilde{x}))}$$

dove l'isomorfismo è un isomorfismo di gruppi e $x = p(\tilde{x})$. Ciò vale per ogni $\tilde{x} \in E$.

Dimostrazione. Ricordiamo che $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) \triangleleft \pi_1(X, x)$, dunque in effetti il quoziente è un gruppo. Sia $\vartheta : \pi_1(X, x) \rightarrow \text{Aut}(E)$ t.c. per ogni $\alpha \in \pi_1(X, x)$ $\vartheta(\alpha)$ sia l'unico elemento di $\text{Aut}(E)$ t.c. $\vartheta(\alpha)(\tilde{x}) = \tilde{x} \cdot \alpha$. Tale $\vartheta(\alpha)$ esiste perché il rivestimento è regolare ed è unico perché $\text{Aut}(E)$ agisce liberamente su E .

- (i) ϑ è un omomorfismo: $(\vartheta(\alpha_1) \circ \vartheta(\alpha_2))(\tilde{x}) = \vartheta(\alpha_1)(\vartheta(\alpha_2)(\tilde{x})) = \vartheta(\alpha_1)(\tilde{x} \cdot \alpha_2)$, ma per il teorema 5.8.9 $\vartheta(\alpha_1)(\tilde{x} \cdot \alpha_2) = (\vartheta(\alpha_1)(\tilde{x})) \cdot \alpha_2 = (\tilde{x} \cdot \alpha_1) \cdot \alpha_2 = \tilde{x} \cdot (\alpha_1 \cdot \alpha_2) = \vartheta(\alpha_1 \cdot \alpha_2)(\tilde{x}) \Rightarrow \vartheta(\alpha_1) \circ \vartheta(\alpha_2) = \vartheta(\alpha_1 \cdot \alpha_2)$.
- (ii) ϑ è suriettivo. Se $\varphi \in \text{Aut}(E)$, poiché l'azione di monodromia è transitiva, esiste $\alpha \in \pi_1(X, x)$ con $\tilde{x} \cdot \alpha = \varphi(\tilde{x})$. Dunque $\vartheta(\alpha) = \varphi$ in quanto $\vartheta(\alpha)$ e φ coincidono su \tilde{x} e sono perciò uguali (sempre perché $\text{Aut}(E)$ agisce liberamente).
- (iii) $\ker \vartheta = p_*(\pi_1(E, \tilde{x}))$. Infatti, poiché $\text{Aut}(E)$ agisce liberamente, $\vartheta(\alpha) = \text{id} \iff \vartheta(\alpha)(\tilde{x}) = \tilde{x} \iff \tilde{x} \cdot \alpha = \tilde{x} \iff \alpha \in p_*(\pi_1(E, \tilde{x}))$.

\square

Corollario 5.8.13. $p : E \longrightarrow X$ regolare $\Rightarrow X \cong E/\text{Aut}(E)$ (cioè sono omeomorfi).

Dimostrazione. Essendo aperta e suriettiva, $p : E \longrightarrow X$ è un'identificazione, per cui $X \cong E/\sim$ dove $\tilde{x} \sim \tilde{y} \iff p(\tilde{x}) = p(\tilde{y}) \iff \tilde{x} = \varphi(\tilde{y})$ per qualche $\varphi \in \text{Aut}(E)$, in quanto $\text{Aut}(E)$ agiscono transitivamente sulle fibre. \square

Vale una sorta di viceversa.

Proposizione 5.8.14. Se G agisce in maniera propriamente discontinua su uno spazio connesso E , allora la proiezione $p : E \longrightarrow E/G$ è un rivestimento regolare e $G = \text{Aut}(E, p)$.

Dimostrazione. Dato $x \in E/G$, dobbiamo costruire un intorno $U \ni x$ ben rivestito. Scegliamo $\tilde{x} \in E$ con $p(\tilde{x}) = x$; per definizione di azione propriamente discontinua, esiste un aperto V di E t.c. $\tilde{x} \in V$ e $\gamma(V) \cap V = \emptyset$ per ogni $\gamma \in G \setminus \{\text{id}\}$. Poniamo $U = p(V)$. Le proiezioni al quoziente per azioni di gruppo sono aperte, per cui U è aperto. Per costruzione, $p^{-1}(U) = \bigcup_{\gamma \in G} \gamma(V)$.

Ogni $\gamma(V)$ è aperto (i γ sono omeomorfismi) e l'unione è disgiunta poiché $\gamma_1(V) \cap \gamma_2(V) \neq \emptyset \Rightarrow V \cap (\gamma_1^{-1}\gamma_2)(V) \neq \emptyset \Rightarrow \gamma_1^{-1}\gamma_2 = \text{id} \Rightarrow \gamma_1 = \gamma_2$. Infine, $p|_{\gamma(V)}$ è un omeomorfismo su U per ogni $\gamma \in G$ (è continua, aperta e suriettiva; l'iniettività segue ancora dal fatto che $V \cap \gamma(V) = \emptyset$ per ogni $\gamma \neq \text{id}$). \square

Osservazione 5.8.15. Un rivestimento universale è regolare. Infatti, $p_\star(\{1\}) = \{1\} \triangleleft \pi_1(X, x)$.

Corollario 5.8.16. Se $p : E \longrightarrow X$ è un rivestimento universale, $\text{Aut}(E) \cong \pi_1(X, x)$.

Corollario 5.8.17. Se E è semplicemente connesso e G agisce su E in maniera propriamente discontinua, allora $\pi_1(E/G) \cong G$.

Esempio 5.8.18.

- (i) $S^1 = \mathbb{R}/\mathbb{Z}$, \mathbb{R} semplicemente connesso $\Rightarrow \pi_1(S^1) = \mathbb{Z}$.
- (ii) $\underbrace{S^1 \times S^1 \times \dots \times S^1}_{n \text{ volte}} = \mathbb{R}^n/\mathbb{Z}^n$, \mathbb{R}^n semplicemente connesso $\Rightarrow \pi_1((S^1)^n) = \mathbb{Z}^n$.
- (iii) $\mathbb{P}^n(\mathbb{R}) = S^n/G$, $G = \{\pm \text{id}\}$. Se $n \geq 2$, S^n semplicemente connesso $\Rightarrow \pi_1(\mathbb{P}^n(\mathbb{R})) \cong G = \mathbb{Z}_2$.

5.9 Rivestimento universale e spazi semilocalmente semplicemente connessi

Definizione 5.9.1. Uno spazio topologico X localmente connesso per archi si dice SEMILOCALMENTE SEMPLICEMENTE CONNESSO se per ogni $x \in X$ esiste $U \subseteq X$ aperto con $x \in U$ t.c. l'inclusione $i : U \rightarrow X$ induce il morfismo banale $i_* : \pi_1(U, x) \rightarrow \pi_1(X, x)$. Ovvero, per ogni $x \in X$ esiste un intorno U di x t.c. tutti i lacci basati in x e contenuti in U sono banali in X .

Questa proprietà è verificata ad esempio se ogni punto ha un intorno semplicemente connesso (per esempio le varietà).

Osservazione 5.9.2. Se X ammette un rivestimento universale, allora è semilocalmente semplicemente connesso. Infatti, dato $x \in X$, ne possiamo prendere un intorno connesso per archi e ben rivestito U . Se $p : E \rightarrow X$ è il rivestimento universale e $V \subseteq p^{-1}(U)$ è un aperto con $p|_V : V \rightarrow U$ omeomorfismo,

$$\begin{array}{ccc} V & \xhookrightarrow{j} & E \\ \uparrow s \downarrow p|_V & & \downarrow p \\ U & \xhookrightarrow{i} & X \end{array}$$

$i = p \circ j \circ s \Rightarrow i_* = p_* \circ j_* \circ s_*$, ma j_* è banale perché $\pi_1(E) \cong \{1\}$, dunque $i_* : \pi_1(U, x) \rightarrow \pi_1(X, x)$ è banale.

Lemma 5.9.3. Quando esiste, il rivestimento universale è unico a meno di isomorfismo.

Dimostrazione. Siano $p_1 : E_1 \rightarrow X, p_2 : E_2 \rightarrow X$ rivestimenti universali di X . Consideriamo il seguente diagramma:

$$\begin{array}{ccc} & & E_2 \\ & \nearrow \varphi & \downarrow p_2 \\ E_1 & \xrightarrow{p_1} & X \end{array}$$

Poiché E_1 è semplicemente connesso, per il corollario 5.8.3 il diagramma si completa con $\varphi : E_1 \rightarrow E_2$ t.c. $p_2 \circ \varphi = p_1$. Fissati $\tilde{x}_1 \in p_1^{-1}(x)$ e $\tilde{x}_2 \in p_2^{-1}(x)$, possiamo anche richiedere $\varphi(\tilde{x}_1) = \tilde{x}_2$. Analogamente, esiste $\psi : E_2 \rightarrow E_1$ con $p_1 \circ \psi = p_2$ e $\psi(\tilde{x}_2) = \tilde{x}_1$. Segue facilmente che φ e ψ sono isomorfismi, uno l'inverso dell'altro. \square

Teorema 5.9.4. Sia X spazio topologico localmente connesso per archi e connesso. Allora X ammette un rivestimento universale se e solo se X è semilocalmente semplicemente connesso. Inoltre, in tal caso il rivestimento universale è unico.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Già vista.

Unicità: già vista.

(\Leftarrow) (Idea della dimostrazione) Si fissa $x \in X$. Si definisce $E = \bigcup_{y \in X} \Omega(x, y) / \sim$

dove $\gamma_1 \sim \gamma_2 \iff$ sono omotopi a estremi fissi. Si topologizza $\bigcup_{y \in X} \Omega(x, y)$ con

la topologia compatta-aperta (se X è metrico, è la topologia della convergenza uniforme), si dota E della topologia quoziente e si definisce $p : E \rightarrow X$, $p([\gamma]) = \gamma(1)$. Bisogna verificare che E è semplicemente connesso e che p è un rivestimento. \square

Teorema 5.9.5. Sia X connesso e semilocalmente semplicemente connesso, $x \in X$. Allora per ogni $H < \pi_1(X, x)$ esiste un rivestimento $p : E \rightarrow X$ t.c. $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) = H$, dove $\tilde{x} \in p^{-1}(x)$. Tale rivestimento è unico a meno di isomorfismo.

Dimostrazione. Sia $q : \tilde{X} \rightarrow X$ il rivestimento universale di X e fissiamo $\tilde{x} \in q^{-1}(x)$. Abbiamo $\pi_1(X, x) \cong \text{Aut}(\tilde{X})$, denotiamo con H anche il sottogruppo di $\text{Aut}(\tilde{X})$ corrispondente a $H < \pi_1(X, x)$. Pongo $E = \tilde{X} / H$.

$$\begin{array}{ccccc} \tilde{X} & \xrightarrow{\pi} & \tilde{X} / H = E & \xrightarrow{p} & \tilde{X} / \pi_1(X, x) = X \\ & \searrow q & & & \nearrow \end{array}$$

Si verifica facilmente che p è un rivestimento (un aperto di X ben rivestito rispetto a q lo è anche rispetto a p). Inoltre, se $\tilde{x} = \pi(\tilde{\tilde{x}}) \in E$, abbiamo $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) = \text{stab}(\tilde{x})$ rispetto all'azione di monodromia. Dato $\alpha \in \pi_1(X, x)$, $\alpha = [\gamma]$, siano $\tilde{\gamma}$ e $\tilde{\tilde{\gamma}}$ i sollevamenti di γ in E, \tilde{X} a partire da $\tilde{x}, \tilde{\tilde{x}}$, così che $\tilde{\gamma} = \pi \circ \tilde{\tilde{\gamma}}$. Ora $\tilde{x} \cdot \alpha = \tilde{\gamma}(1) = \pi(\tilde{\tilde{\gamma}}(1))$, che è uguale a $\tilde{x} \iff \tilde{\tilde{\gamma}}(1)$ è equivalente a $\tilde{\tilde{x}}$ tramite l'azione di H , che equivale alla tesi. \square

Esempio 5.9.6. Indicheremo sempre con \tilde{X} il rivestimento universale di X .

$$X = b \circlearrowleft \circlearrowright a \quad \tilde{X} = ?$$

\tilde{X} è rappresentato dal seguente grafo, con \tilde{a} rappresentato dalle frecce orizzontali dirette verso destra (e \tilde{a}^{-1} verso sinistra) e \tilde{b} da quelle verticali verso l'alto (e \tilde{b}^{-1} verso il basso):



È un albero quadrivalente infinito. I segmenti orizzontali si proiettano su a , quelli verticali su b . Chi è il rivestimento di X associato ad $H = \langle a \rangle$? Cerchiamo un rivestimento $E \xrightarrow{p} X$ con $p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) = \langle a \rangle$. Il grafo è il seguente:



Non è omogeneo: se $\varphi : E \rightarrow E$ è un omeomorfismo, $\varphi(\text{loop}) = \text{loop} \Rightarrow \varphi(\tilde{x}_0) = \tilde{x}_0 \Rightarrow \text{Aut}(E) = \{1\}$. In effetti $\langle a \rangle$ è molto lontano dall'essere normale in $\pi_1(X, x) = \mathbb{Z} * \mathbb{Z}$. Se $N(a)$ è il sottogruppo normale generato da a in $\pi_1(X)$, il rivestimento associato a N come sarà fatto? N normale \Rightarrow il rivestimento associato $E \xrightarrow{p} X$ sarà regolare e $\text{Aut}(E) = \pi_1(X, x) / p_*(\pi_1(E, \tilde{x})) = \mathbb{Z} * \mathbb{Z} / N = \langle a, b \mid a \rangle \cong \mathbb{Z}$,

$$\begin{aligned} \psi : \mathbb{Z} * \mathbb{Z} &\longrightarrow \mathbb{Z} \\ a &\longmapsto 0 \\ b &\longmapsto 1 \end{aligned}$$

induce l'isomorfismo. Ecco E :



5.10 π_1 di grafi finiti (connessi)

Sia Γ un grafo finito connesso con V vertici e E lati. Diciamo che Γ è un albero se non contiene cicli, cioè loop iniettivi.

Fatto 5.10.1.

- (i) Un albero è contraibile (per induzione sul numero di vertici).
- (ii) Se Γ è un albero, $V - E = 1$ (induzione).
- (iii) Γ connesso $\Rightarrow \Gamma$ contiene un albero massimale Γ' e Γ' contiene tutti i vertici di $\Gamma \Rightarrow \Gamma = \Gamma' \cup \{\text{qualche lato}\}$.
- (iv) Definiamo $\chi(\Gamma) =$ caratteristica di Eulero di $\Gamma = V - E$. Se $\Gamma' \subseteq \Gamma$ (Γ connesso) è un albero massimale, $\chi(\Gamma') = 1 \Rightarrow \Gamma = \Gamma' \cup \{(1 - \chi(\Gamma)) \text{ lati}\}$.
- (v) Dunque Γ è ottenuto da un albero massimale aggiungendo $1 - \chi(\Gamma)$ lati. Usando induttivamente Van Kampen, otteniamo il seguente teorema, di cui omettiamo la dimostrazione.

Teorema 5.10.2. $\pi_1(\Gamma) \cong F_{1-\chi(\Gamma)}$, il gruppo libero su $1 - \chi(\Gamma)$ generatori.

Teorema 5.10.3. Sia F il gruppo libero su n generatori, $H < F$ sottogruppo di indice k . Allora H è un gruppo libero su $k(n-1) + 1$ generatori (in particolare, il rango di H è spesso maggiore di quello di F).

Dimostrazione. $F = \pi_1(\Gamma)$, $\chi(\Gamma) = 1 - n$ per il teorema appena visto. Sia $\tilde{\Gamma}$ il rivestimento di Γ associato ad H . Poiché vertici e lati sono semplicemente connessi, se V, E sono vertici e lati di $\tilde{\Gamma}$, allora i vertici e lati di $\tilde{\Gamma}$ sono $k \cdot V, k \cdot E$, in quanto $\deg(\text{rivestimento}) = [F : H] = k \Rightarrow H = \pi_1(\tilde{\Gamma}) = F_{1-\chi(\tilde{\Gamma})} = F_{1-k\chi(\Gamma)} = F_{1-k(1-n)} = F_{k(n-1)+1}$. \square

6 Analisi complessa

6.1 Funzioni olomorfe

Adesso studiamo le funzioni complesse.

Sia $U \subset \mathbb{C}$ aperto, $f : U \rightarrow \mathbb{C}$. Possiamo scrivere $f(z) = u(z) + iv(z)$ per ogni $z \in U$. Chiamiamo $u(z)$ la parte reale di f , $u : U \rightarrow \mathbb{R}$, $v(z)$ la parte immaginaria di f , $v : U \rightarrow \mathbb{R}$.

Fatto 6.1.1. $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ è continua in $z_0 \in U$ (rispettivamente in tutto U) se e solo se u e v sono continue in $z_0 \in U$ (rispettivamente in tutto U).

Importante: dal punto di vista della continuità le funzioni di U a valori complessi possono essere semplicemente viste come funzioni da $U \subseteq \mathbb{R}^2$ a valori reali. Domanda: vale la stessa cosa quando parliamo di derivabilità?

Definizione 6.1.2. (Differenziabilità) La funzione $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ è *differenziabile* in $z_0 \in U$ se esiste $A : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ applicazione \mathbb{R} -lineare t.c.

$$(i) \quad f(z) = f(z_0) + A(z - z_0) + r(z);$$

$$(ii) \quad \frac{|r(z)|}{|z - z_0|} \xrightarrow{z \rightarrow z_0} 0.$$

In questo caso, chiamiamo l'applicazione A *jacobiano di f* , $A =: Jf_{z_0}$. In alcuni casi scriveremo df e lo chiameremo *differenziale di f* per intendere l'applicazione che associa a z_0 la funzione \mathbb{R} -lineare Jf_{z_0} .

Osservazione 6.1.3. f differenziabile in $z_0 \Rightarrow f$ continua in z_0 .

Fissiamo la base $\{1, i\}$ di \mathbb{C} come \mathbb{R} -spazio vettoriale.

$$\begin{aligned} f : U &\rightarrow \mathbb{C} \\ z = x + iy &\mapsto u(x, y) + iv(x, y) \end{aligned}$$

Fatto 6.1.4.

(i) Se f è differenziabile in $x_0 + iy_0 = z_0 \in U$, esistono le derivate parziali di

$$f \text{ in } z_0 \text{ e } Jf_{z_0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x}(x_0, y_0) & \frac{\partial u}{\partial y}(x_0, y_0) \\ \frac{\partial v}{\partial x}(x_0, y_0) & \frac{\partial v}{\partial y}(x_0, y_0) \end{pmatrix};$$

(ii) (teorema del differenziale totale): se esistono $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ in un intorno di z_0 e sono continue in z_0 , allora f è differenziabile in z_0 .

Esercizio 6.1.5.

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R} \\ (x, y) &\mapsto \begin{cases} x & \text{se } y \neq x^2 \\ 0 & \text{se } y = x^2 \end{cases} \end{aligned}$$

è differenziabile in $(0,0)$?

Definizione 6.1.6. (Funzione olomorfa) Siano $U \subseteq \mathbb{C}$ aperto, $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ continua. Diciamo che f è OLOMORFA IN $z_0 \in \mathbb{C}$ se esiste $\lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h \neq 0}} \frac{f(z_0 + h) - f(z_0)}{h}$.

Se tale limite esiste, lo chiamiamo derivata di f in z_0 e lo denotiamo con $f'(z_0)$. Diciamo che f è OLOMORFA IN U se è olomorfa per ogni $z_0 \in U$. Diciamo che f è INTERA se è definita su tutto \mathbb{C} ed è olomorfa in \mathbb{C} .

Proposizione 6.1.7. Sia $U \subset \mathbb{C}$ aperto, $f, g : U \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfe in $z_0 \in U$.

- (i) $f + g$ è olomorfa in z_0 e $(f + g)'(z_0) = f'(z_0) + g'(z_0)$;
- (ii) $f \cdot g$ è olomorfa in z_0 e $(f \cdot g)'(z_0) = f'(z_0)g(z_0) + f(z_0)g'(z_0)$;
- (iii) se $g(z_0) \neq 0$, $\frac{f}{g}$ è olomorfa in z_0 e $\left(\frac{f}{g}\right)'(z_0) = \frac{f'(z_0)g(z_0) - f(z_0)g'(z_0)}{g(z_0)^2}$.

Proposizione 6.1.8. Siano U, V aperti di \mathbb{C} , $f : U \rightarrow V$, $g : V \rightarrow \mathbb{C}$, f olomorfa in $z_0 \in U$ e g olomorfa in $f(z_0)$. Allora $g \circ f$ è olomorfa in z_0 e $(g \circ f)'(z_0) = g'(f(z_0)) \cdot f'(z_0)$.

Esempio 6.1.9.

- (i) $f(z) = z$ è una funzione intera. Infatti, $\frac{f(z+h) - f(z)}{h} = \frac{z+h-z}{h} = 1$
 $\Rightarrow f$ è olomorfa in $z \in \mathbb{C}$ e $f'(z) = 1$;
- (ii) $f(z) = z^n, n \geq 1$ è intera. Infatti, $\frac{f(z+h) - f(z)}{h} = \frac{(z+h)^n - z^n}{h} =$

$$\frac{\sum_{k=0}^n \binom{n}{k} z^k h^{n-k} - z^n}{h} = \sum_{k=0}^{n-1} \binom{n}{k} z^k h^{n-k-1} \xrightarrow[h \neq 0]{h \rightarrow 0} \binom{n}{n-1} z^{n-1} =$$

 $= n z^{n-1} =: f'(z).$

Esercizio 6.1.10. Provare che $f(z) = z^n, n < 0$ è olomorfa in $\mathbb{C} \setminus \{0\}$.

Osservazione 6.1.11. I polinomi sono funzioni intere. Le funzioni razionali $\frac{P(z)}{Q(z)}$ con P e Q polinomi sono olomorfe in $\mathbb{C} \setminus \{z \in \mathbb{C} \mid Q(z) = 0\}$.

Esempio 6.1.12. (Una funzione non olomorfa) $f(z) = \bar{z}$ non è olomorfa. $\frac{f(z+h) - f(z)}{h} = \frac{\bar{z} + \bar{h} - \bar{z}}{h} = \frac{\bar{h}}{h}$ per $h \in \mathbb{C}, h \neq 0$. Se esiste $f'(z)$, allora il limite dovrebbe esistere per ogni possibile direzione per cui $h \rightarrow 0, h \neq 0$. Se

esiste $f'(z)$, dobbiamo per esempio avere che

$$\begin{aligned} 1 &= \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h \neq 0 \\ \Im(h)=0}} \frac{\bar{h}}{h} = \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h \neq 0 \\ \Im(h)=0}} \frac{f(z+h) - f(z)}{h} = \\ &= \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h \neq 0 \\ \Re(h)=0}} \frac{f(z+h) - f(z)}{h} = \lim_{\substack{h \rightarrow 0 \\ h \neq 0 \\ \Re(h)=0}} \frac{\bar{h}}{h} = -1, \end{aligned}$$

assurdo \Rightarrow non può esistere $f'(z)$.

Domanda: qual è il legame tra l'olomorficità di $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ e la differenziabilità di f vista come funzione da $U \subset \mathbb{R}^2$ in \mathbb{R}^2 ?

Osservazione 6.1.13. Come nel caso della differenziabilità in ambito reale, f olomorfa in $z_0 \Rightarrow f$ continua in z_0 . Infatti, $f(z) - f(z_0) = \frac{f(z) - f(z_0)}{z - z_0}(z - z_0)$; al limite per $z \rightarrow z_0$, abbiamo che tende $f'(z_0) \cdot \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0) = f'(z_0) \cdot 0 = 0$.

Esempio 6.1.14. $g(z) = \bar{z}$ non è olomorfa ma nella base $\{1, i\}$ di \mathbb{C}

$$\begin{aligned} g : \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{R}^2 \\ (x, y) &\mapsto (x, -y) \end{aligned}$$

è differenziabile.

Teorema 6.1.15. Sia $U \subset \mathbb{C}$ un aperto e $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ continua. f è olomorfa in $z_0 \in U \iff$ le seguenti due condizioni sono soddisfatte:

- (i) f è differenziabile in z_0 ;
- (ii) $Jf_{z_0} : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ corrisponde alla moltiplicazione per $a \in \mathbb{C}$.

Dimostrazione. (\Rightarrow)

L'olomorficità implica che $f(z_0 + h) = f(z_0) + f'(z_0)h + r(h)$ (*) con

$\frac{|r(h)|}{|h|} \xrightarrow{h \rightarrow 0, h \neq 0} 0$. Nella base $\{1, i\}$ di \mathbb{C} , possiamo riscrivere l'equazione (*) come $(z_0 = x_0 + iy_0, h = \alpha + i\beta)$ $f(x_0 + \alpha, y_0 + \beta) = f(x_0, y_0) + f'(z_0)(\alpha + i\beta) + r(\alpha, \beta)$ con $\frac{|r(\alpha, \beta)|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \rightarrow 0$. La mappa

$$\begin{aligned} \mathbb{C} &\rightarrow \mathbb{C} \\ z &\mapsto az, \end{aligned}$$

$a := f'(z_0)$ è \mathbb{R} -lineare $\Rightarrow f$ differenziabile in z_0 e $Jf_{z_0} =$ moltiplicazione per $a = f'(z_0)$.

(\Leftarrow) La dimostrazione è analoga:

1. si parte dalla definizione di differenziabilità nelle variabili x, y ;
2. si riscrive in termini di z ;
3. si usa che $Jf_{z_0} = \text{moltiplicazione per } a \in \mathbb{C} \Rightarrow f'(z_0) = a$.

□

Obiettivo: sostituire la condizione (ii) con le cosiddette condizioni di Cauchy-Riemann.

Lemma 6.1.16. Sia $A : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ \mathbb{R} -lineare. Le seguenti affermazioni sono equivalenti:

- (i) A è indotta dalla moltiplicazione per un numero complesso, cioè $A(z) = a \cdot z$ per un certo $a \in \mathbb{C}$;
- (ii) A è \mathbb{C} -lineare;
- (iii) $A(i) = iA(1)$;
- (iv) $A =$ moltiplicazione per la matrice $\begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$ dove $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$ (nella base $\{1, i\}$ di \mathbb{C}).

Dimostrazione. Per esercizio.

□

Osservazione 6.1.17. $a = \alpha + i\beta$.

Teorema 6.1.18. (Cauchy-Riemann) Sia $U \subset \mathbb{C}$ aperto, $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ continua. $f(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$ nella base $\{1, i\}$ di \mathbb{C} . f è olomorfa in $z_0 \in U \iff$ valgono le seguenti:

- (i) f è differenziabile in z_0 ;
- (ii) valgono le CONDIZIONI DI CAUCHY-RIEMANN: $\frac{\partial u}{\partial x}(x_0, y_0) = \frac{\partial v}{\partial y}(x_0, y_0)$ e $\frac{\partial u}{\partial y}(x_0, y_0) = -\frac{\partial v}{\partial x}(x_0, y_0)$.

Nel caso f sia olomorfa, $f'(z_0) = \frac{\partial u}{\partial x}(z_0) + i\frac{\partial v}{\partial x}(z_0) =$ espressioni equivalenti usando le condizioni di Cauchy-Riemann.

Dimostrazione. Dobbiamo semplicemente provare che (ii) del teorema 6.1.15 equivale a (ii) di questo teorema. $Jf_{z_0} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u}{\partial x}(z_0) & \frac{\partial u}{\partial y}(z_0) \\ \frac{\partial v}{\partial x}(z_0) & \frac{\partial v}{\partial y}(z_0) \end{pmatrix}$ che, per il punto (ii) del teorema 6.1.15, equivale alla moltiplicazione per $a \in \mathbb{C}$, che per il lemma 6.1.16 corrisponde all'applicazione lineare data dalla matrice $\begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$. Imponendo l'uguaglianza troviamo le condizioni di Cauchy-Riemann. □

Definizione 6.1.19. $z = x + iy, e^z := e^x(\cos y + i \sin y)$.

Proposizione 6.1.20. $f(z) = e^z$ è intera con $f'(z) = e^z$.

Dimostrazione. Nella base $\{1, i\}$ di \mathbb{C} scriviamo $f(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$, $u(x, y) = e^x \cos y$, $v(x, y) = e^x \sin y$.

1. f è differenziabile: ovvio.

2. Verifichiamo le condizioni di C-R: $\frac{\partial u}{\partial x} = e^x \cos y$, $\frac{\partial u}{\partial y} = -e^x \sin y$, $\frac{\partial v}{\partial x} = e^x \sin y$, $\frac{\partial v}{\partial y} = e^x \cos y \Rightarrow f(z)$ soddisfa C-R e $f'(z) = e^z$.

□

Esempio 6.1.21. Altri esempi di funzioni intere:

$$\sin z := \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}, \cos z := \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}, \sinh z := \frac{e^z - e^{-z}}{2}, \cosh z := \frac{e^z + e^{-z}}{2}.$$

Corollario 6.1.22. Sia $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con $U \subset \mathbb{C}$ aperto connesso. Le seguenti affermazioni sono equivalenti:

- (i) f è costante in U ;
- (ii) f' è identicamente nulla;
- (iii) $\Re(f)$ è costante in U ;
- (iv) $\Im(f)$ è costante in U .

Dimostrazione. (i) \Rightarrow (iii) e (i) \Rightarrow (iv) sono ovvie. Adesso vogliamo usare il teorema di Cauchy-Riemann per la caratterizzazione delle funzioni olomorfe.

(i) \iff (ii) f è costante in $U \iff Jf$ è identicamente nullo, ma Jf era la moltiplicazione per la matrice $\begin{pmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{pmatrix}$ dove $f'(z) = \alpha + i\beta$, quindi $Jf \equiv 0 \iff \alpha = \beta = 0 \iff f'(z) = 0$.

(iii) \Rightarrow (i) e (iv) \Rightarrow (i) Adesso bisogna usare C-R. Nella base $\{1, i\}$ di \mathbb{C} , scriviamo $f(x, y) = u(x, y) + iv(x, y)$. $\Re(f)$ costante $\iff u$ costante $\iff \frac{\partial u}{\partial x} = 0 = \frac{\partial u}{\partial y}$

e per C-R abbiamo $\frac{\partial v}{\partial x} = 0 = \frac{\partial v}{\partial y}$. (iv) \Rightarrow (i) è analogo. □

6.2 Serie

Vediamo ora, senza dimostrazione, alcuni risultati sulle serie di numeri complessi che ci torneranno utili.

Definizione 6.2.1. Sia $(c_n)_{n \in \mathbb{N}}$ una successione di numeri complessi. Diciamo che $\sum_{n \geq 0} c_n$ è *assolutamente convergente* se la serie $\sum_{n \geq 0} |c_n|$ è convergente.

Esercizio 6.2.2. $\sum_{n \geq 0} \frac{i^n}{n!}$ è convergente?

Proposizione 6.2.3. Siano $\sum_{n \geq 0} a_n$ e $\sum_{n \geq 0} b_n$ due serie assolutamente convergenti.

- (i) $\sum_{n \geq 0} a_n + b_n$ è assolutamente convergente ed è uguale a $\sum_{n \geq 0} a_n + \sum_{n \geq 0} b_n$ (la serie delle somme è la somma delle serie);
- (ii) se $c_n := \sum_{p=0}^n a_p b_{n-p}$, allora $\sum_{n \geq 0} c_n$ è assolutamente convergente e la sua somma è uguale al prodotto delle somme delle due serie date.

Definizione 6.2.4. Sia $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ una serie di potenze. Chiamiamo *raggio di convergenza* la quantità $\rho := \sup\{r \in \mathbb{R}, r > 0 \mid \sum_{n \geq 0} |a_n| r^n \text{ è convergente}\}$.

Osservazione 6.2.5. ρ può essere finito e in questo caso $\rho \geq 0$, oppure $\rho = +\infty$.

Definizione 6.2.6. Chiamiamo *disco di convergenza* l'insieme $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| < \rho\}$.

Osservazione 6.2.7. Il disco di convergenza è aperto e $\rho = 0 \Rightarrow \text{disco} = \emptyset$.

Proposizione 6.2.8. Data una serie di potenze $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$, esiste $0 \leq \rho \leq +\infty$

t.c.:

- 1. caso $\rho = 0$ la serie converge solo per $z = 0$;
- 2. caso $\rho = +\infty$: la serie converge assolutamente per ogni $z \in \mathbb{C}$;
- 3. caso $0 < \rho < +\infty$: se $|z| < \rho$ la serie converge assolutamente, se $|z| > \rho$ la serie non converge.

Inoltre si ha la formula di Hadamard:

$$\frac{1}{\rho} = \limsup_{n \rightarrow +\infty} |a_n|^{1/n}$$

con la convenzione che $\rho = +\infty$ se il limite è 0 e $\rho = 0$ se il limite è $+\infty$.

Esercizio 6.2.9. Calcolare il raggio di convergenza di

$$\sum_{n \geq 0} n! z^n, \sum_{n \geq 0} \frac{z^n}{n!}, \sum_{n \geq 0} (-1)^n \frac{z^{2n}}{(2n)!}, \sum_{n \geq 0} (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}.$$

Esempio 6.2.10. Proviamo che $\sum_{n \geq 0} z^n = \frac{1}{1-z}$ per $|z| < 1$. La somma della

serie è $\lim_{n \rightarrow +\infty} S_n, S_n = z^0 + z^1 + \dots + z^n = \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z}$. Lo studio del limite è lasciato per esercizio.

Fatto 6.2.11.

- (i) Siano $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ e $\sum_{n \geq 0} b_n z^n$ due serie di potenze con raggio di convergenza $\geq R$ per qualche R . Allora, definendo $S(z) := \sum_{n \geq 0} a_n z^n + \sum_{n \geq 0} b_n z^n$, $P(z) := \left(\sum_{n \geq 0} a_n z^n \right) \left(\sum_{n \geq 0} b_n z^n \right)$, abbiamo che $S(z)$ e $P(z)$ hanno raggio di convergenza $\geq R$. Inoltre, per ogni $r \in \mathbb{C}$ con $|r| < R$, $S(r) = \sum_{n \geq 0} a_n r^n + \sum_{n \geq 0} b_n r^n$ e $P(r) = \left(\sum_{n \geq 0} a_n r^n \right) \left(\sum_{n \geq 0} b_n r^n \right)$.
- (ii) Sia $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n$. Chiamiamo *serie derivata* la serie di potenze $\sum_{n \geq 1} n a_n z^{n-1}$ e la denotiamo con $f'(z)$. Allora f e f' hanno lo stesso raggio di convergenza.

Passiamo ora a definire alcune funzioni complesse tramite serie di potenze. Cominciamo da esponenziale, seno e coseno.

Definizione 6.2.12. Fissato $z \in \mathbb{C}$, chiamiamo *esponenziale del numero complesso* z la quantità $e^z := \sum_{n \geq 0} \frac{1}{n!} z^n$. Chiamiamo *coseno di* z $\cos z := \sum_{n \geq 0} (-1)^n \frac{z^{2n}}{(2n)!}$ e *seno di* z $\sin z := \sum_{n \geq 0} (-1)^n \frac{z^{2n+1}}{(2n+1)!}$.

Osservazione 6.2.13. Le definizioni sono ben poste perché le serie hanno raggio di convergenza infinito.

Esercizio 6.2.14. Provare che le definizioni coincidono con quelle già date.

Esempio 6.2.15. Dati $z, z' \in \mathbb{C}$, $e^{z+z'} = e^z e^{z'}$. Siano $a_n = \frac{1}{n!} z^n$, $b_n = \frac{1}{n!} (z')^n$. Sia $c_n = \sum_{p=0}^n a_p b_{n-p} = \sum_{p=0}^n \left(\frac{1}{p!} z^p \right) \left(\frac{1}{(n-p)!} (z')^{n-p} \right) = \frac{1}{n!} \sum_{p=0}^n \binom{n}{p} z^p (z')^{n-p} = \frac{1}{n!} (z + z')^n$, allora per il punto (ii) della proposizione 6.2.3 abbiamo proprio $e^{z+z'} = e^z e^{z'}$.

Osservazione 6.2.16. $z, z' \in \mathbb{C}$ t.c. $e^z = e^{z'}$. Questo equivale a $e^{z'-z} = 1 \iff |e^{z'-z}| = e^{\Re(w)} = 1, \cos \Im(w) + i \sin \Im(w) = 1$ ($w = z' - z$) $\iff \Re(w) = 0$ e $\Im(w) = 2\pi k$ per $k \in \mathbb{Z}$. Da questo segue che $e^z = e^{z'} \iff z' = z + i(2\pi k)$ per un certo $k \in \mathbb{Z}$.

Adesso vogliamo definire il logaritmo.

Definizione 6.2.17. Sia $z \in \mathbb{C}, z \neq 0$. Chiamiamo *logaritmo del numero complesso* z la quantità $\log z := \log |z| + i \arg z$.

Osservazione 6.2.18. $\log z \in \mathbb{C}$ è definito modulo $2\pi i\mathbb{Z}$ perché $\arg z \in \mathbb{R}/2\pi\mathbb{Z}$.

Proposizione 6.2.19. Per ogni $z \in \mathbb{C}, z \neq 0$, $e^{\log z} = z$.

Fatto 6.2.20. $\log(zz') = \log z + \log z' \pmod{2\pi i\mathbb{Z}}$.

Domanda: come definiamo $z \mapsto \log z$? Abbiamo bisogno della definizione di branca.

Definizione 6.2.21. Sia D aperto connesso di \mathbb{C} t.c. $0 \notin D$ e $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ continua. Diciamo che f è una *branca* di $\log z$ se $e^{f(z)} = z$ (cioè se $f(z)$ è uno dei possibili valori di $\log z$).

Proposizione 6.2.22. Assumiamo che esista una branca $f(z)$ di $\log z$ in D . Allora ogni altra branca di $\log z$ in D è della forma $f(z) + k(2\pi i)$ per qualche intero k . Viceversa, $f(z) + k(2\pi i)$ è una branca di $\log z$ per ogni intero k , a partire dalla branca fissata $f(z)$.

Dimostrazione. Siano $f(z)$ e $g(z)$ due branche di $\log z$ in D ($e^{f(z)} = z, e^{g(z)} = z$ per ogni $z \in D$). $h(z) := \frac{1}{2\pi i}(g(z) - f(z)) : D \rightarrow \mathbb{C}$. h è continua e t.c. $\text{Im } h \subseteq \mathbb{Z}$. Visto che D è connesso, h è costantemente uguale a un certo intero $k \Rightarrow g(z) = f(z) + k(2\pi i)$. Il viceversa è ovvio. \square

Osservazione 6.2.23.

- (i) Possiamo dare una definizione di branca anche per $\arg z$;
- (ii) ogni branca di $\arg z$ definisce una branca di $\log z$ (e viceversa) (se $f(z)$ è una branca di $\arg z$, $\log |z| + if(z)$ è una branca di $\log z$).

Osservazione 6.2.24. Sia $D = \{z \in \mathbb{C} \mid \Re(z) > 0\}$. Per ogni $z \in D$ esiste un unico $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ t.c. ϕ è un argomento di z ; poniamo allora $\text{Arg}(z) := \phi$.

Proposizione 6.2.25. La funzione

$$\begin{aligned} \text{Arg}(z) : D &\rightarrow \mathbb{C} \\ z &\mapsto \phi \end{aligned}$$

è continua.

Dimostrazione. Per ogni $z \in \mathbb{C}, z \neq 0$, $\arg z = \arg \left(\frac{z}{|z|} \right)$.

$$\begin{aligned} f : D &\rightarrow U = \{u \in \mathbb{C} \mid |u| = 1, \Re(u) > 0\} \\ z &\mapsto \frac{z}{|z|} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc}
 D & \xrightarrow{f} & U \\
 & \searrow \text{Arg} & \swarrow \text{Arg} \\
 & \mathbb{C} &
 \end{array}$$

f è continua. Ci rimane da provare che

$$\begin{aligned}
 \text{Arg} : U &\longrightarrow \mathbb{C} \\
 u &\longmapsto \text{Arg}(u) = y
 \end{aligned}$$

è continua. Per costruzione, è l'inversa di

$$\begin{aligned}
 g : (-\pi/2, \pi/2) &\longrightarrow U \\
 y &\longmapsto e^{iy}
 \end{aligned}$$

g è continua e biettiva. g si estende a \tilde{g} continua e biettiva da $[-\pi/2, \pi/2]$ (compatto) a $\{u \in \mathbb{C} \mid \Re(u) \geq 0\}$ (Hausdorff) $\Rightarrow \tilde{g}$ è un omeomorfismo, quindi la sua inversa è continua, quindi l'inversa di g è continua, quindi Arg è continua. \square

Definizione 6.2.26. Chiamiamo branca *principale* di $\log z$ la funzione continua $\log z + i\text{Arg}(z)$ per $z \in D = \{z \in \mathbb{C} \mid \Re(z) > 0\}$.

Lemma 6.2.27. Se $f : D \longrightarrow D'$ è olomorfa e biettiva e $g : D \longrightarrow D'$ è l'inversa di f , se $f'(z_0) \neq 0$, allora g è olomorfa in $f(z_0)$ e vale l'usuale formula $g'(f(z_0)) = \frac{1}{f'(z_0)}$.

Dimostrazione. Da $g \circ f = \text{id}$ e dal teorema della funzione inversa (Analisi II), poiché $f'(z_0) = a + ib \neq 0$, $df_{z_0} = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$ è invertibile, per cui g è differenziabile in $f(z_0)$ e $dg_{f(z_0)} = (df_{z_0})^{-1}$. Infine, si verifica che se $df_{z_0} = A = \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix}$, $a^2 + b^2 \neq 0$ (cioè $a + ib \neq 0$), $dg_{f(z_0)} = A^{-1} = \begin{pmatrix} c & -d \\ d & c \end{pmatrix}$ con $c + id = \frac{1}{a + ib}$ su \mathbb{C} . \square

Proposizione 6.2.28. Se $f(z)$ è una branca di $\log z$ in un insieme aperto connesso D , la funzione f è olomorfa e $\frac{d}{dz}f(z) = \frac{1}{z}$ (ovviamente $0 \notin D$).

Dimostrazione. $f(\exp(z)) = z + c$, c costante. Per il lemma 6.2.27, $f'(\exp(z)) = \frac{1}{\exp(z)}$, cioè $f'(y) = \frac{1}{y}$. Detto bene, fissato $z_0 \in D$, $z_0 \neq 0$, $y_0 = f(z_0) \in f(D)$ è t.c. $z_0 = \exp(y_0)$. Per continuità di \exp , dato un intorno V di z_0 in D esiste un intorno W di y_0 in \mathbb{C} t.c. $\exp(W) \subseteq V$ e le uguaglianze sopra sono verificate (in particolare, $f \circ \exp = \text{id}$, senza l'aggiunta di una costante). \square

Proposizione 6.2.29. La serie di potenze $\sum_{n \geq 1} (-1)^{n+1} \frac{z^n}{n}$ converge per $|z| < 1$ ed è uguale alla branca principale di $\log(z+1)$.

Dimostrazione. Si veda più avanti, alla fine del paragrafo sulle funzioni analitiche. \square

Definizione 6.2.30. Per ogni $z, \alpha \in \mathbb{C}, z \neq 0$ poniamo $z^\alpha = e^{\alpha \log z}$.

6.3 Funzioni analitiche

Definizione 6.3.1. (Funzione analitica) Sia $U \subset \mathbb{C}$ un aperto. Una funzione $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ si dice ANALITICA IN $z_0 \in U$ se

- (i) esiste una serie di potenze $\sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n$ che converge assolutamente per $|z - z_0| < r$ per un qualche $r > 0$ e
- (ii) $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n$ per $|z - z_0| < r$.

Diremo che f è ANALITICA IN U se f è analitica in z_0 per ogni $z_0 \in U$.

Osservazione 6.3.2. $\sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n = a_0 + \sum_{n \geq 1} a_n(z - z_0)^n$.

Esempio 6.3.3. Sono funzioni analitiche:

- (i) i polinomi;
- (ii) $e^z, \cos z, \sin z, \dots$

Proposizione 6.3.4. Sia $U \subset \mathbb{C}$ un aperto e siano $f, g : U \rightarrow \mathbb{C}$ funzioni analitiche in U . Allora

- (i) $f + g$ è analitica in U ;
- (ii) fg è analitica in U ;
- (iii) $\frac{f}{g}$ è definita e analitica in qualunque aperto contenuto in $\{z \in U \mid g(z) \neq 0\}$.

Proposizione 6.3.5. Siano U e V aperti di \mathbb{C} . Siano $f : U \rightarrow V$ e $g : V \rightarrow \mathbb{C}$ funzioni analitiche. Allora $g \circ f$ è analitica in U .

Proposizione 6.3.6. Sia $U \subset \mathbb{C}$ aperto e $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione. Se f è analitica in U , allora f è continua in U .

Dimostrazione. Sia $z_0 \in U$. Assumiamo che $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n$ per $|z - z_0| < r$ per qualche $r > 0$. Senza perdita di generalità $z_0 = 0$ e $f(z_0) = f(0) = 0 \Rightarrow a_0 = f(z_0) = f(0) = 0$. $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n = \sum_{n \geq 0} a_n z^n = \sum_{n \geq 1} a_n z^n = z \sum_{n \geq 1} a_n z^{n-1}$. Se $0 < \rho < r$ e $|z| < \rho$, $|f(z)| \leq \sum_{n \geq 1} |a_n| |z|^n \leq |z| \sum_{n \geq 1} |a_n| |z|^{n-1} \leq |z| \sum_{n \geq 1} |a_n| \rho^{n-1}$. Adesso notiamo che $\sum_{n \geq 1} |a_n| \rho^{n-1}$ non dipende da $|z|$, quindi $|f(z)| \rightarrow 0$ per $|z| \rightarrow 0$. \square

Proposizione 6.3.7. Sia $z_0 \in \mathbb{C}$. Sia $\sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n$ una serie di potenze assolutamente convergente nel disco aperto $D_r(z_0) = \{z \mid |z - z_0| < r\}$ per qualche $r > 0$. Allora la funzione

$$f : D_r(z_0) \longrightarrow \mathbb{C}$$

$$z \longmapsto \sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n$$

è analitica in $D_r(z_0)$.

Dimostrazione. Senza perdita di generalità $z_0 = 0 \Rightarrow f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n$. Sia $a \in D_r(0)$ e sia $s \in \mathbb{R}, s > 0$ t.c. $|a| + s < r$. Notiamo che $z^n = ((z - a) + a)^n = \sum_{0 \leq k \leq n} \binom{n}{k} (z - a)^k a^{n-k}$. Quindi $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n = \sum_{n \geq 0} a_n \left(\sum_{0 \leq k \leq n} \binom{n}{k} (z - a)^k a^{n-k} \right)$. Se $|z - a| < s$, $|a| + |z - a| < r$, quindi la serie $\sum_{n \geq 0} |a_n| (|a| + |z - a|)^n$ converge. Scambiando l'ordine delle sommatorie, possiamo scrivere $f(z) = \sum_{k \geq 0} \left(\sum_{n \geq k} a_n \binom{n}{k} a^{n-k} \right) \cdot (z - a)^k = \sum_{n \geq 0} b_k (z - a)^k$ per $|z - a| < s$ se $\sum_{n \geq k} a_n \binom{n}{k} a^{n-k}$ converge per ogni k . Per mostrarlo, osserviamo che $\sum_{l \geq 0} c_l z^l$ assolutamente convergente implica, con una semplice induzione, $\sum_{l \geq s} c_l \cdot l(l-1) \dots (l-s+1) z^{l-s}$ assolutamente convergente, con lo stesso raggio di convergenza, per ogni s . Adesso $\sum_{l \geq s} c_l \cdot l(l-1) \dots (l-s+1) z^{l-s} = \sum_{l \geq s} c_l \frac{l!}{(l-s)!} z^{l-s} = s! \sum_{l \geq s} c_l \binom{l}{s} z^{l-s}$, per cui $\sum_{l \geq s} c_l \binom{l}{s} z^{l-s}$ è assolutamente convergente con lo stesso raggio di conver-

genza di $\sum_{l \geq 0} c_l z^l$. Visto che $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ è assolutamente convergente per $|z| < r$,
abbiamo che $\sum_{n \geq k} a_n \binom{n}{k} a^{n-k}$ converge dato che $|a| < r$. \square

Teorema 6.3.8. Sia $U \subset \mathbb{C}$ aperto. Se $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ è analitica in U , allora f è olomorfa in U e la sua derivata f' è una funzione analitica in U .

Dimostrazione. Sia $z_0 \in U$, senza perdita di generalità $z_0 = 0$. Per ipotesi esiste una serie $\sum_{n \geq 0} a_n (z - z_0)^n = \sum_{n \geq 0} a_n z^n$ che converge assolutamente per $|z - z_0| = |z| < r$ per qualche $r > 0$. Sia $\delta > 0$ t.c. $|z| + \delta < r$. Per ogni $h \in \mathbb{C}, h \neq 0, |h| < \delta$, abbiamo $f(z + h) = \sum_{n \geq 0} a_n (z + h)^n = \sum_{n \geq 0} a_n (z^n + nhz^{n-1} + h^2 P_n(z, h))$ dove $P_n(z, h)$ è un polinomio in z e h a coefficienti interi positivi. $P_n(z, h) = \sum_{k=2}^n \binom{n}{k} h^{k-2} z^{n-k} \Rightarrow |P_n(z, h)| \leq \sum_{k=2}^n \binom{n}{k} \delta^{k-2} |z|^{n-k} = P_n(|z|, \delta)$, che non dipende da h . Allora $f(z + h) = f(z) + \sum_{n \geq 1} a_n n h z^{n-1} + h^2 \sum_{n \geq 2} a_n P_n(z, h) \Rightarrow f(z + h) - f(z) - \sum_{n \geq 1} a_n n h z^{n-1} = h^2 \sum_{n \geq 2} a_n P_n(z, h)$. Per ipotesi la somma al membro di sinistra è assolutamente convergente, dunque lo è anche quella al membro di destra. Dividiamo per h : $\frac{f(z + h) - f(z)}{h} - \sum_{n \geq 1} a_n n z^{n-1} = h \sum_{n \geq 2} a_n P_n(z, h)$. $\sum_{n \geq 1} a_n n z^{n-1}$ è la cosiddetta serie derivata di $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$. Per $|h| < \delta$, $\left| \sum_{n \geq 2} a_n P_n(z, h) \right| \leq \sum_{n \geq 2} |a_n| P_n(|z|, \delta)$ che non dipende da h e converge. Dunque per $h \rightarrow 0$ abbiamo che $h \sum_{n \geq 2} a_n P_n(z, h) \rightarrow 0$, quindi $\frac{f(z + h) - f(z)}{h} \rightarrow f'(z) = \sum_{n \geq 1} a_n n z^{n-1} \Rightarrow f'$ è analitica. \square

Concludiamo il paragrafo con la dimostrazione della proposizione 6.2.29.

Dimostrazione. Sia $D = B(0, 1)$ e siano $f : D \rightarrow \mathbb{C}, f(z) = \log(1 + z)$, $g : D \rightarrow \mathbb{C}, g(z) = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n+1} \frac{z^n}{n}$. Poiché il raggio di convergenza della serie data è 1, g è ben definita, analitica, dunque olomorfa e $g'(z) = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n+1} n \frac{z^{n-1}}{n} = \sum_{n=1}^{+\infty} (-1)^{n+1} z^{n-1} = \sum_{n=0}^{+\infty} (-1)^n z^n = \frac{1}{1 - (-z)} = \frac{1}{1 + z}$. Perciò, se

$h = f - g$, $h'(z) = f'(z) - g'(z) = \frac{1}{1+z} - \frac{1}{1+z} = 0$ per ogni $z \in D$, dunque $h' \equiv 0$ su D e h è costante su D (una funzione con differenziale nullo ovunque è costante su un connesso). Dunque $h(z) = c$ per ogni $z \in D$. Per trovare c osserviamo che $h(0) = f(0) - g(0) = \log 1 - \sum_{n=1}^{+\infty} 0 = 0$. Dunque $h \equiv 0$, cioè $f \equiv g$. \square

6.4 Zeri di funzioni analitiche e prolungamento analitico

D'ora in poi, D sarà un aperto connesso di \mathbb{C} .

Teorema 6.4.1. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ analitica. Sono fatti equivalenti:

- (i) esiste $z_0 \in D$ con $f^{(n)}(z_0) = 0$ per ogni $n \in \mathbb{N}$;
- (ii) esiste un aperto $U \subseteq D$ con $f \equiv 0$ su U ;
- (iii) $f \equiv 0$ su D .

Dimostrazione. (iii) \Rightarrow (i) è ovvio e vale per ogni $z_0 \in D$.

(i) \Rightarrow (ii) Per analiticità, $f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$ per ogni $z \in B(z_0, R)$ per qualche $R > 0$. Inoltre, $a_n = \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!}$ (segue da una semplice induzione).

Dunque $f^{(n)}(z_0) = 0 \Rightarrow a_n = 0$ per ogni $n \in \mathbb{N}$, perciò $f \equiv 0$ su $B(z_0, R)$.

(ii) \Rightarrow (iii) Sia $\Omega \subseteq D$, $\Omega = \{z \in D \mid \text{esiste un intorno aperto } U \text{ di } z_0 \text{ con } f|_U \equiv 0\}$. Essendo nelle ipotesi del punto (ii), $\Omega \neq \emptyset$. Poiché D è connesso, basta vedere che Ω è clopen in D , da cui $\Omega = D$. Ω è aperto praticamente per definizione. Ω chiuso: sia $z \in D$ con $z = \lim_{n \rightarrow +\infty} z_n, z_n \in \Omega$. Allora $f^{(k)}(z_n) = 0$ per ogni $n, k \in \mathbb{N}$. Ma $f^{(k)}$ continua per ogni $k \Rightarrow f^{(k)}(z) = \lim_{n \rightarrow +\infty} f^{(k)}(z_n) = 0$. Si usa adesso che (i) \Rightarrow (ii). \square

Abbiamo usato che, se $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ è analitica, $f' : D \rightarrow \mathbb{C}$ è analitica e se $f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$, allora $f'(z) = \sum_{n=1}^{+\infty} n a_n(z - z_0)^{n-1}$, da cui f' derivabile.

Iterando otteniamo $f \in C^\infty$ e $f^{(n)}(z_0) = a_n n!$, cioè $a_n = \frac{f^{(n)}(z_0)}{n!}$.

Attenzione: il teorema 6.4.1 è falso per funzioni C^∞ . \triangle

Esempio 6.4.2. $f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$, $f(a + ib) = \begin{cases} e^{-\frac{1}{a}} & \text{se } a > 0 \\ 0 & \text{se } a \leq 0 \end{cases}$, allora f è C^∞ , si annulla su $\{\Re z > 0\}$, dunque anche su un aperto di \mathbb{C} , ma non è nulla in \mathbb{C} . In questo esempio l'insieme Ω definito nella dimostrazione del teorema 6.4.1 è aperto ma non è chiuso.

Corollario 6.4.3. (Prolungamento analitico) Siano $f, g : D \rightarrow \mathbb{C}$ analitiche. Se $f = g$ su un aperto $U \subseteq D$, allora $f = g$ su D . Se esiste $z_0 \in D$ con $f^{(n)}(z_0) = g^{(n)}(z_0)$ per ogni $n \in \mathbb{N}$, allora anche in questo caso $f = g$ su D .

Dimostrazione. Si applica il teorema 6.4.1 alla funzione $f = h - g$. □

Corollario 6.4.4. L'anello delle funzioni analitiche su D è un dominio di integrità.

Dimostrazione. Se $f, g : D \rightarrow \mathbb{C}$ sono t.c. $f \cdot g = 0$, se $A = \{z \mid f(z) = 0\}$, $B = \{z \mid g(z) = 0\}$, allora $D = A \cup B$. A, B chiusi \Rightarrow almeno uno di essi ha parte interna non vuota (dimostrazione per esercizio). Se, senza perdita di generalità, $A^\circ \neq \emptyset$, $f \equiv 0$ su un aperto, dunque per il teorema 6.4.1 $f \equiv 0$ su D . □

Vediamo ora un paio di risultati sugli zeri di funzioni analitiche.

Definizione 6.4.5. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ analitica non identicamente nulla. Allora, per ogni $z_0 \in D$, $\text{ord}_{z_0}(f) = \min \{n \in \mathbb{N} \mid f^{(n)}(z_0) \neq 0\}$ è L'ORDINE DI f IN z_0 . Per il teorema 6.4.1, poiché f non è identicamente nulla, $\{n \in \mathbb{N} \mid f^{(n)}(z_0) \neq 0\} \neq \emptyset$, dunque $\text{ord}_{z_0}(f)$ è ben definito. $f(z_0) = 0 \iff \text{ord}_{z_0}(f) \geq 1$. Uno zero z_0 di f si dice SEMPLICE se $\text{ord}_{z_0}(f) = 1$ e MULTIPLIO altrimenti. Se $f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$, poiché $f^{(n)}(z_0) = n!a_n$, $\text{ord}_{z_0}(f) = \min \{n \in \mathbb{N} \mid a_n \neq 0\}$.

Proposizione 6.4.6. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ analitica non identicamente nulla, $z_0 \in D$. Allora $f(z) = (z - z_0)^{\text{ord}_{z_0}(f)} \cdot g(z)$ con $g : D \rightarrow \mathbb{C}$ analitica e $g(z) \neq 0$ in un intorno di z_0 .

Dimostrazione. Sia $k = \text{ord}_{z_0}(f)$. In un intorno di z_0 , $f(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n$
 $z_0)^n = \sum_{n=k}^{+\infty} a_n(z - z_0)^n = (z - z_0)^k \sum_{n=k}^{+\infty} a_n(z - z_0)^{n-k} = (z - z_0)^k \sum_{n=0}^{+\infty} a_{n+k}(z - z_0)^n = (z - z_0)^k g(z)$. La serie di potenze che definisce g ha lo stesso raggio di convergenza di quella di f . In particolare, esiste un intorno U di z_0 t.c., posto $g(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{n+k}(z - z_0)^n$, $f(z) = (z - z_0)^k g(z)$ per ogni $z \in U$. g è analitica e $g(z_0) = a_k \neq 0$ (per definizione). Questo ci dà la tesi su U . Fuori da U (anzi, su $D \setminus \{z_0\}$) poniamo $g(z) = \frac{f(z)}{(z - z_0)^k}$. Questa definizione estende $g(z) = \sum_{n=0}^{+\infty} a_{n+k}(z - z_0)^n$ a una funzione analitica su tutto D . Infine, poiché $g(z_0) \neq 0$ e g è continua in quanto analitica, $g(z) \neq 0$ in un intorno di z_0 . □

Corollario 6.4.7. $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ analitica non identicamente nulla. Allora $C = \{z \in D \mid f(z) = 0\} \subseteq D$ è discreto e chiuso in D (ma non necessariamente in \mathbb{C}).

Dimostrazione. Se $z_0 \in C$, $f(z_0) = 0$ e $k = \text{ord}_{z_0}(f)$, allora in un intorno U di z_0 si ha $f(z) = (z - z_0)^k g(z)$, $g(z) \neq 0$ per ogni $z \in U$. Se $z \in U \setminus \{z_0\}$, $(z - z_0)^k \neq 0, g(z) \neq 0 \Rightarrow f(z) \neq 0$. Perciò $C \cap U = \{z_0\}$, dunque C è discreto ed è chiuso perché preimmagine di 0 , che è un chiuso. \square

6.5 1-forme differenziali complesse

\mathbb{C} è un \mathbb{R} -spazio vettoriale di dimensione 2, con base $\{1, i\}$. Fissata questa base,

$$\begin{aligned} \text{End}_{\mathbb{R}}(\mathbb{C}) &\cong M(2 \times 2, \mathbb{R}) \\ \varphi &\longleftrightarrow \begin{pmatrix} \Re(\varphi(1)) & \Re(\varphi(i)) \\ \Im(\varphi(1)) & \Im(\varphi(i)) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Definizione 6.5.1. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un dominio aperto. Una 1-FORMA COMPLESSA su D è una funzione $\omega : D \rightarrow \text{End}_{\mathbb{R}}(\mathbb{C})$ continua (rispetto all'usuale topologia su $M(2 \times 2, \mathbb{R}) \cong \mathbb{R}^4$).

Notiamo che

$$\begin{aligned} dx : \mathbb{C} &\rightarrow \mathbb{C}, \quad dx(a + ib) = a \\ dy : \mathbb{C} &\rightarrow \mathbb{C}, \quad dy(a + ib) = b \end{aligned}$$

sono una base di $\text{End}_{\mathbb{R}}(\mathbb{C})$ inteso come \mathbb{C} -spazio vettoriale.

Più concretamente, una 1-forma differenziale complessa ω su D corrisponde a due funzioni $P, Q : D \rightarrow \mathbb{C}$ t.c. $\omega(z) = P(z)dx + Q(z)dy = Pdz + Qd\bar{z}$. La continuità di ω equivale alla continuità di P e Q . Infatti, se $P(z) = a(z) + ib(z)$, $Q(z) = c(z) + id(z)$, $\omega(z)(1) = P(z)dx(1) + Q(z)dy(1) = P(z) = a(z) + ib(z)$, $\omega(z)(i) = P(z)dx(i) + Q(z)dy(i) = Q(z) = c(z) + id(z)$, perciò $\omega(z) = \begin{pmatrix} a(z) & c(z) \\ b(z) & d(z) \end{pmatrix}$ ed è continua $\iff a, b, c, d$ lo sono $\iff P$ e Q lo sono.

Esempio 6.5.2. Se $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ è C^1 , $z = u + iv$, allora df è una 1-forma

$$\text{complessa, data da } df = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Re(f)}{\partial u} & \frac{\partial \Re(f)}{\partial v} \\ \frac{\partial \Im(f)}{\partial u} & \frac{\partial \Im(f)}{\partial v} \end{pmatrix}.$$

Un'altra base utile di $\text{End}_{\mathbb{R}}(\mathbb{C})$ è data da $dz = dx + i dy, d\bar{z} = dx - i dy$.

Inoltre, se $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ è differenziabile, $df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy$, da cui $df = \frac{\partial f}{\partial x} \left(\frac{dz + d\bar{z}}{2} \right) + \frac{\partial f}{\partial y} \left(-\frac{i}{2}(dz - d\bar{z}) \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} - i \frac{\partial f}{\partial y} \right) dz + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + i \frac{\partial f}{\partial y} \right) d\bar{z}$.

Poniamo $\frac{\partial f}{\partial z} := \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} - i \frac{\partial f}{\partial y} \right)$, $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} := \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} + i \frac{\partial f}{\partial y} \right)$. Perciò si ha che $df = \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z}$ per costruzione.

Osservazione 6.5.3. f è olomorfa $\iff df$ è \mathbb{C} -lineare, cioè $\frac{\partial f}{\partial y} = df(i) = i df(1) = i \frac{\partial f}{\partial x} \iff \frac{\partial f}{\partial x} = -i \frac{\partial f}{\partial y} \iff \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0$.

Proposizione 6.5.4. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ differenziabile. Allora f è olomorfa $\iff \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0$ e in tal caso $df = \frac{\partial f}{\partial z} dz$.

Osservazione 6.5.5. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto connesso, $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ differenziabile. Abbiamo visto che se f è olomorfa (cioè df_z è \mathbb{C} -lineare per ogni $z \in D$, ed è perciò la moltiplicazione per un elemento di \mathbb{C} detto $f'(z)$) si ha $\frac{\partial f}{\partial \bar{z}} = 0$. Inoltre, sempre assumendo f olomorfa, $\frac{\partial f}{\partial x}(z) = df_z(1) = f'(z) \cdot 1 = f'(z)$, $\frac{\partial f}{\partial y}(z) = df_z(i) = i df_z(1) = i f'(z)$. Perciò $\frac{\partial f}{\partial z} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial f}{\partial x} - i \frac{\partial f}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} (f'(z) - i \cdot i f'(z)) = f'(z)$.

Corollario 6.5.6. Se f è olomorfa, $df = f' dz$.

Dimostrazione. $df = \frac{\partial f}{\partial z} dz + \frac{\partial f}{\partial \bar{z}} d\bar{z} = f'(z) dz + 0$. □

Definizione 6.5.7. Sia ω una 1-forma differenziale complessa su D . Allora ω è ESATTA se esiste $F : D \rightarrow \mathbb{C}$ t.c. $\omega = dF$. Inoltre, ω è CHIUSA se è localmente esatta, cioè per ogni $p \in D$ esiste un aperto $U \subseteq D$ con $p \in U$ e $F_U : U \rightarrow \mathbb{C}$ con $dF_U = \omega|_U$ (in particolare, F e F_U sono differenziabili). F si chiama PRIMITIVA di ω mentre F_U è una PRIMITIVA LOCALE.

Ovviamente ω esatta $\Rightarrow \omega$ chiusa. Ricordiamo che $dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy$, per cui $\omega = P dx + Q dy$ è esatta se esiste F t.c. $P = \frac{\partial F}{\partial x}$, $Q = \frac{\partial F}{\partial y}$, cioè se il “campo vettoriale” $z \mapsto (P(z), Q(z))$ è gradiente di una funzione (ammette un potenziale). Le forme chiuse corrispondono ai campi che ammettono potenziali locali. Vedremo che questa condizione si può controllare localmente ed è equivalente a essere “irrotazionale”.

chiusura di $\omega \rightarrow$ proprietà locale
esattezza di $\omega \rightarrow$ proprietà globale, che dipende dalla topologia di D

6.6 Integrali curvilinei

Se $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ è continua, poniamo $\int_a^b f(t) dt = \int_a^b \Re(f(t)) dt + i \int_a^b \Im(f(t)) dt$.

Definizione 6.6.1. Sia D dominio aperto connesso di \mathbb{C} e sia ω una 1-forma differenziale complessa su D fissata. Se $\gamma : [a, b] \rightarrow D$ è un cammino C^1 ,

definiamo $\int_\gamma \omega := \int_a^b \omega_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) dt$, dove se $\gamma(t) = (x(t), y(t)) = x(t) + iy(t)$, allora $\gamma'(t) = x'(t) + iy'(t) = (x'(t), y'(t))$.

Osservazione 6.6.2. Se $\omega = P dx + Q dy$, $\omega_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) = P(\gamma(t)) dx(\gamma'(t)) + Q(\gamma(t)) dy(\gamma'(t)) = P(\gamma(t))x'(t) + Q(\gamma(t))y'(t)$ è funzione continua di t (perché γ è C^1), dunque integrabile.

Esempio 6.6.3. Siano $D = \mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}$, $\omega = \frac{1}{z} dz$, $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}^*$, $\gamma(t) = e^{2\pi i t} = \cos 2\pi t + i \sin 2\pi t$. γ è un loop con punto iniziale e finale $1 \in \mathbb{C}^*$. Vogliamo calcolare $\int_\gamma \omega$. Ricordiamo che $dz = dx + i dy$, cioè è l'identità di \mathbb{C} ($dz(a+ib) = (dx+i dy)(a+ib) = dx(a+ib) + i dy(a+ib) = a+ib$). Inoltre $\gamma'(t) = 2\pi i e^{2\pi i t} = 2\pi i \gamma(t)$ (convincersene). Dunque $\omega_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) = \frac{dz}{\gamma(t)}(2\pi i \gamma(t)) = \frac{2\pi i \gamma(t)}{\gamma(t)} = 2\pi i$. Perciò $\int_\gamma \omega = \int_0^1 2\pi i dt = 2\pi i$. In coordinate (cioè usando dx e dy), $\frac{dz}{z} = \frac{1}{x+iy}(dx + i dy) = \frac{x-iy}{x^2+y^2}(dx + i dy) = \frac{x-iy}{x^2+y^2} dx + \frac{ix+y}{x^2+y^2} dy = (P(x,y) dx + Q(x,y) dy) = P(z) dx + Q(z) dy = \frac{x dx + y dy}{x^2+y^2} + i \frac{x dy - y dx}{x^2+y^2}$. $\gamma(t) = \cos 2\pi t + i \sin 2\pi t = x(t) + iy(t)$ con $x(t) = \cos 2\pi t$, $y(t) = \sin 2\pi t$. Perciò $dx(\gamma'(t)) = x'(t) = -2\pi \sin 2\pi t$, $dy(\gamma'(t)) = y'(t) = 2\pi \cos 2\pi t$. $(x dx + y dy)_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) = \cos 2\pi t(-2\pi \sin 2\pi t) + \sin 2\pi t(2\pi \cos 2\pi t) = 0$. $\left(i \frac{x dy - y dx}{x^2+y^2}\right)_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) = i \frac{\cos 2\pi t \cdot 2\pi \cos 2\pi t - \sin 2\pi t(-2\pi \sin 2\pi t)}{\cos^2 2\pi t + \sin^2 2\pi t} = 2\pi i$. Abbiamo ritrovato che $\int_\gamma \frac{dz}{z} = \int_\gamma \frac{x dx + y dy}{x^2+y^2} + i \int_\gamma \frac{x dy - y dx}{x^2+y^2} = 0 + \int_0^1 2\pi i = 0 + 2\pi i$, come sopra.

Fatto 6.6.4. Un fatto utile appena visto è che $dz = \text{id}$, perciò $dz(a) = a$ per ogni $a \in \mathbb{C}$. Analogamente, $d\bar{z}(a) = \bar{a}$ per ogni $a \in \mathbb{C}$.

Proposizione 6.6.5. Proprietà elementari dell'integrale curvilineo:

- (i) sia $\gamma : [a, b] \rightarrow D$, se $\psi : [c, d] \rightarrow [a, b]$ è C^1 con $\psi(c) = a$, $\psi(d) = b$, allora $\int_\gamma \omega = \int_{\gamma \circ \psi} \omega$ (cioè $\int_\gamma \omega$ è indipendente da riparametrizzazioni che preservino il verso di percorrenza);

- (ii) $\gamma : [a, b] \longrightarrow D, \psi : [c, d] \longrightarrow [a, b]$ con $\psi(c) = b, \psi(d) = a$, allora $\int_{\gamma \circ \psi} \omega = - \int_{\gamma} \omega$;
- (iii) se $\gamma = \gamma_1 * \gamma_2$ (giunzione C^1), allora $\int_{\gamma} \omega = \int_{\gamma_1} \omega + \int_{\gamma_2} \omega$.

Dimostrazione. (i) $\int_{\gamma \circ \psi} \omega = \int_c^d \omega_{\gamma(\psi(t))}((\gamma \circ \psi)'(t)) dt = \int_c^d \omega_{\gamma(\psi(t))}(\gamma'(\psi(t))\psi'(t)) dt.$

Questo, per \mathbb{R} -linearità di $\omega_{\gamma(\psi(t))}$, è uguale a $\int_c^d \omega_{\gamma(\psi(t))}(\gamma'(\psi(t))) \cdot \psi'(t) dt$

che a sua volta, per il teorema di cambio di variabile, è uguale a $\int_{\psi(c)}^{\psi(d)} \omega_{\gamma(s)}(\gamma'(s)) ds =$

$$\int_a^b \omega_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) dt = \int_{\gamma} \omega.$$

- (ii) La dimostrazione è analoga a quella del punto (i).
 (iii) Segue dal punto (i) più alcuni passaggi ovvi lasciati per esercizio.

□

Definizione 6.6.6. Se $\gamma : [a, b] \longrightarrow D$ è C^1 a tratti (cioè continua e t.c. esistono $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$ t.c. $\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}$ sia C^1 per ogni $i = 0, 1, \dots, n-$

1), allora poniamo $\int_{\gamma} \omega = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}} \omega$. La definizione appena data non dipende dalla partizione scelta per le proprietà viste nella proposizione 6.6.5.

Lemma 6.6.7. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto connesso. Allora D è connesso per archi C^1 (in particolare, anche per archi C^1 a tratti).

Dimostrazione. La dimostrazione è quasi identica a localmente connesso per archi+connesso \Rightarrow connesso per archi. Basta osservare che ogni punto di D ha un intorno connesso per archi C^1 (una piccola palla), scegliamo $x_0 \in D$ e mostriamo che l'insieme dei punti di D connessi a x_0 da un arco C^1 a tratti è aperto e chiuso. I dettagli sono lasciati al lettore. □

Lemma 6.6.8. Sia ω una 1-forma differenziale esatta su D , $\omega = dF$. Allora per ogni $\gamma : [a, b] \longrightarrow D$ C^1 a tratti vale $\int_{\gamma} \omega = F(\gamma(b)) - F(\gamma(a))$.

Dimostrazione. Sia $a = t_0 < t_1 < \dots < t_n = b$ una partizione t.c. $\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}$ sia C^1 per ogni $i = 0, 1, \dots, n-1$. Se mostriamo che $\int_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}} \omega = F(\gamma(t_{i+1})) -$

$$F(\gamma(t_i)) \text{ abbiamo finito per definizione di } \int_{\gamma} \omega. \text{ Ma } \int_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}} \omega = \int_{\gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}} dF = \int_{t_i}^{t_{i+1}} dF_{\gamma(t)}(\gamma'(t)) dt = \int_{t_i}^{t_{i+1}} (F \circ \gamma)'(t) dt = F(\gamma(t_{i+1})) - F(\gamma(t_i)). \quad \square$$

Corollario 6.6.9. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un aperto connesso, se $F : D \rightarrow \mathbb{C}$ è t.c. $dF = 0$, allora F è costante.

Dimostrazione. Per il lemma 6.6.7, per ogni $a, b \in D$ esiste $\gamma \in C^1$ a tratti che connette a e $b \Rightarrow F(b) - F(a) = \int_{\gamma} dF = 0 \Rightarrow F(a) = F(b)$ per ogni $a, b \in D$. \square

Corollario 6.6.10. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un aperto connesso. Se F è una primitiva di ω , tutte e sole le primitive di ω si ottengono sommando una costante a F .

Dimostrazione. Se G è un'altra primitiva di ω , $dG = dF \Rightarrow d(G - F) = 0 \Rightarrow G - F = c$, c costante $\Rightarrow G = F + c$. Il viceversa è ovvio: $d(F + c) = dF = \omega$. \square

Teorema 6.6.11. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un aperto connesso, ω una 1-forma su D . Allora ω è esatta $\iff \int_{\gamma} \omega = 0$ per ogni loop $\gamma \in C^1$ a tratti.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Se $\gamma : [a, b] \rightarrow D$ è un loop e $\omega = dF$, abbiamo visto che $\int_{\gamma} \omega = F(\gamma(b)) - F(\gamma(a)) = 0$ poiché $\gamma(b) = \gamma(a)$.

(\Leftarrow) Costruiamo una primitiva di ω come segue. Fissato $x_0 \in D$, per ogni $p \in D$ scegliamo un cammino $\gamma_p : [0, 1] \rightarrow D$ C^1 a tratti con $\gamma_p(0) = x_0, \gamma_p(1) = p$ e poniamo $F(p) = \int_{\gamma_p} \omega$. F è ben definita (cioè non dipende dalla scelta di γ_p). Ciò segue dalle proprietà viste nella proposizione 6.6.5: sia α_p un altro cammino da x_0 a p , allora $\gamma_p * \bar{\alpha}_p$ è un loop, per cui per ipotesi $0 = \int_{\gamma_p * \bar{\alpha}_p} \omega =$

$$\int_{\gamma_p} \omega + \int_{\bar{\alpha}_p} \omega = \int_{\gamma_p} \omega - \int_{\alpha_p} \omega \Rightarrow \int_{\gamma_p} \omega = \int_{\alpha_p} \omega. \text{ Dobbiamo vedere che } F$$

è differenziabile e $dF = \omega$. Se $\omega = P dx + Q dy$, basta vedere che $\frac{\partial F}{\partial x} =$

$P, \frac{\partial F}{\partial y} = Q$ (perché P, Q sono continue per ipotesi, dunque, per il teorema del differenziale totale, F ammette derivate parziali continue e sarebbe differenziabile

con $dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy = \omega$). Mostriamo che $\frac{\partial F}{\partial x} = P$ (l'altra dimostrazione è analoga). Se vogliamo calcolare la derivata parziale lungo x , poniamo h un numero reale, allora dobbiamo valutare la funzione in un punto p e in $p + h$ e calcolare il limite del rapporto incrementale. Sia dunque $\gamma_h : [0, h] \rightarrow$

$D, \gamma_h(t) = p + t$. Allora $F(p) = \int_{\gamma_p} \omega, F(p+h) = \int_{\gamma_p * \gamma_h} \omega \Rightarrow F(p+h) - F(p) = \int_{\gamma_p * \gamma_h} \omega - \int_{\gamma_p} \omega = \int_{\gamma_p} \omega + \int_{\gamma_h} \omega - \int_{\gamma_p} \omega = \int_{\gamma_h} \omega$. Notiamo che $\omega_{\gamma_h(t)}(\gamma'_h(t)) = \omega_{\gamma_h(t)}(1) = P(\gamma_h(t)) dx(1) + Q(\gamma_h(t)) dy(1) = P(\gamma_h(t)) = P(p+t)$. Dunque $F(p+h) - F(p) = \int_{\gamma_h} \omega = \int_0^h P(p+t) dt$ e $\frac{F(p+h) - F(p)}{h} = \frac{1}{h} \int_0^h P(p+t) dt = P(p + \xi_h)$ con $0 \leq \xi_h \leq h$ per il teorema della media integrale (in realtà, andrebbe applicato separatamente a parte reale e parte immaginaria, ma non cambiano le conclusioni). Passando al limite per $h \rightarrow 0$ e usando la continuità di P otteniamo $\frac{\partial F}{\partial x}(p) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{F(p+h) - F(p)}{h} = \lim_{h \rightarrow 0} P(p + \xi_h) = P(p)$. \square

Corollario 6.6.12. Su \mathbb{C}^* la forma $\frac{dz}{z}$ è chiusa ma non esatta.

Dimostrazione. Per ogni $z_0 \in \mathbb{C}^*$ esiste un aperto U con $z_0 \in U \subseteq \mathbb{C}^*$ su cui è definita una branca F di \log e $dF = F' dz = \frac{1}{z} dz$ su U , per cui $\frac{dz}{z}$ è chiusa. Però, se $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}^*, \gamma(t) = e^{2\pi i t}$, $\int_\gamma \frac{dz}{z} \neq 0 \Rightarrow \frac{dz}{z}$ non è esatta. \square

Corollario 6.6.13. Non esiste un “logaritmo” definito su tutto \mathbb{C}^* .

Dimostrazione. Altrimenti, $\frac{dz}{z}$ sarebbe esatta su \mathbb{C}^* . \square

Adesso integriamo sui rettangoli. Salvo diversamente indicato, quando parliamo di rettangoli useremo sempre le notazioni che introduciamo adesso. Un rettangolo $R \subseteq \mathbb{C}$ è caratterizzato da quattro vertici della forma $a_1 + ib_1, a_1 + ib_2, a_2 + ib_2, a_2 + ib_1$. Siano $\gamma_1(t) = a_1 + t(a_2 - a_1) + ib_1, \gamma_2(t) = a_2 + i(b_1 + t(b_2 - b_1)), \gamma_3(t) = a_2 + t(a_1 - a_2) + ib_2, \gamma_4(t) = a_1 + i(b_2 + t(b_1 - b_2))$. Possiamo parametrizzare il bordo del rettangolo con il cammino $\gamma = \gamma_1 * \gamma_2 * \gamma_3 * \gamma_4$. D'ora in poi indicheremo con $\int_{\partial R} \omega$ l'integrale $\int_\gamma \omega$ per ogni 1-forma ω . Se $\omega = P dx + Q dy$,

$$\int_{\partial R} \omega = \int_{a_1}^{a_2} P(t, b_1) dt + \int_{b_1}^{b_2} Q(a_2, t) dt - \int_{a_1}^{a_2} P(t, b_2) dt - \int_{b_1}^{b_2} Q(a_1, t) dt.$$

Proposizione 6.6.14. Sia $D = B(z_0, R)$ un disco aperto, ω una 1-forma su D . Allora ω è esatta $\iff \int_{\partial R} \omega = 0$ per ogni rettangolo $R \subseteq D$.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Segue dal teorema 6.6.11, poiché ∂R è un cammino chiuso C^1 a tratti.

(\Leftarrow) Costruiamo una primitiva integrando ω lungo cammini differenziabili a tratti fatti da un tratto orizzontale seguito da un tratto verticale. Per ogni $z \in D$, sia γ_z un tale cammino (esiste perché D è un disco). Poniamo $F(z) = \int_{\gamma(z)} \omega$.

Poiché γ_z è univocamente determinato da z (a meno di riparametrizzazioni), F è ben definita. Dobbiamo mostrare che, se $\omega = P dx + Q dy$, allora $\frac{\partial F}{\partial x} =$

$$P, \frac{\partial F}{\partial y} = Q. \quad F(z+ih) - F(z) = \int_{\gamma_{z+ih}} \omega - \int_{\gamma_z} \omega = \int_{\gamma'_h} \omega = \int_0^h Q(z+it) dt \text{ che,}$$

diviso per h , ragionando come nella dimostrazione del teorema 6.6.11 tende a $Q(z)$ per $h \rightarrow 0$. Sia α_z il cammino che va da z_0 a z prima in orizzontale poi in verticale. Allora $\gamma_z * \bar{\alpha}_z$ è il bordo di un rettangolo R , dunque per ipotesi

$$0 = \int_{\partial R} \omega = \int_{\gamma_z * \bar{\alpha}_z} \omega = \int_{\gamma_z} \omega - \int_{\alpha_z} \omega \Rightarrow F(z) = \int_{\gamma_z} \omega = \int_{\alpha_z} \omega. \text{ A questo}$$

punto, la dimostrazione che $\frac{\partial F}{\partial x} = P$ è analoga a quella per $\frac{\partial F}{\partial y} = Q$, con gli α_z al posto dei γ_z . \square

Corollario 6.6.15. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un aperto qualsiasi, ω una 1-forma su D . Se $\int_{\partial R} \omega = 0$ per ogni $R \subseteq D$ rettangolo, allora ω è chiusa.

Dimostrazione. Dato $z_0 \in D$, sia $z_0 \in U \subseteq D$ una palla aperta centrata in z_0 . Allora si applica la proposizione 6.6.14 a U . \square

Vogliamo adesso definire gli integrali lungo curve continue (non necessariamente C^1 a tratti).

Definizione 6.6.16. Sia ω una 1-forma chiusa su un aperto $D \subseteq \mathbb{C}$. Se $\gamma : [0, 1] \rightarrow D$ è una curva continua, allora una PRIMITIVA DI ω LUNGO γ è una funzione continua $f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ t.c. per ogni $t_0 \in [0, 1]$ esiste $\varepsilon > 0$ e un intorno U di $\gamma(t_0)$ t.c. $f(t) = F(\gamma(t))$ per ogni $t \in (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon)$, dove $F : U \rightarrow \mathbb{C}$ è una primitiva locale di ω .

Proposizione 6.6.17. Nelle ipotesi della definizione 6.6.16, una primitiva lungo γ esiste, e due primitive lungo γ differiscono per una costante.

Dimostrazione. Per compattezza di $[0, 1]$, possiamo prendere una suddivisione $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = 1$ di $[0, 1]$ t.c. per ogni $i = 0, \dots, n-1$ $\gamma([t_i, t_{i+1}]) \subseteq U_i$ dove U_i è una palla in D su cui ω ammette una primitiva. Per $t \in [t_0, t_1]$, scegliamo una primitiva $F_0 : U_0 \rightarrow \mathbb{C}$ e poniamo $f(t) = F_0(\gamma(t))$. Scegliamo poi una primitiva $F_1 : U_1 \rightarrow \mathbb{C}$ t.c. $F_1(\gamma(t_1)) = F_0(\gamma(t_1))$. Poniamo ora $f(t) = F_1(\gamma(t))$ per ogni $t \in [t_1, t_2]$ e continuiamo per induzione. Per costruzione f è continua (continua su un ricoprimento chiuso che si raccorda

sui punti di intersezione) ed è una primitiva lungo γ . Siano $f_1, f_2 : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ due primitive lungo γ di ω . Allora per ogni $t_0 \in [0, 1]$ esistono $\varepsilon > 0$, U intorno connesso di $\gamma(t_0)$ t.c. $f_1(t) = F(\gamma(t))$, $f_2(t) = G(\gamma(t))$ per ogni $t \in (t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon)$ dove $F, G : U \rightarrow \mathbb{C}$ sono primitive locali di ω . Poiché $F - G$ è costante, $f_1 - f_2$ è costante su $(t_0 - \varepsilon, t_0 + \varepsilon)$. Dunque $f_1 - f_2$ è localmente costante ed è perciò costante per connessione di $[0, 1]$. \square

Definizione 6.6.18. Sia ω una 1-forma chiusa su D , $\gamma : [0, 1] \rightarrow D$ continua. Poniamo $\int_{\gamma} \omega = f(1) - f(0)$ dove f è una primitiva di ω lungo γ . Si noti che la definizione è ben posta grazie alla proposizione 6.6.17.

Fatto 6.6.19.

- (i) $\int_{\gamma_1 * \gamma_2} \omega = \int_{\gamma_1} \omega + \int_{\gamma_2} \omega$;
- (ii) $\int_{\bar{\gamma}} \omega = - \int_{\gamma} \omega$;
- (iii) se γ è differenziabile a tratti, riotteniamo la definizione già data. Infatti, prendiamo $0 = t_0 < \dots < t_n = 1$ t.c. per ogni $i = 0, \dots, n-1$ $\gamma_i = \gamma|_{[t_i, t_{i+1}]}$ sia differenziabile e $\gamma([t_i, t_{i+1}]) \subseteq U_i$ su cui ω ha una primitiva

F_i . Allora con la definizione 6.6.1 abbiamo che $\int_{\gamma} \omega = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{\gamma_i} \omega$ che, per

il lemma 6.6.8, è uguale a $\sum_{i=0}^{n-1} (F_i(\gamma(t_{i+1})) - F_i(\gamma(t_i)))$. Con la definizione

6.6.18 abbiamo invece che $\int_{\gamma} \omega = \sum_{i=0}^{n-1} \int_{\gamma_i} \omega = \sum_{i=0}^{n-1} (f(t_{i+1}) - f(t_i)) = \sum_{i=0}^{n-1} (F_i(\gamma(t_{i+1})) - F_i(\gamma(t_i)))$.

Teorema 6.6.20. (Invarianza omotopica) Sia ω una 1-forma chiusa su $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto. Siano $\gamma_1, \gamma_2 : [0, 1] \rightarrow D$ cammini omotopi a estremi fissi. Allora

$$\int_{\gamma_1} \omega = \int_{\gamma_2} \omega.$$

Dimostrazione. Sia $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow D$ l'omotopia a estremi fissi tra γ_1 e γ_2 . Vogliamo costruire $G : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ continua t.c. per ogni $(t_0, s_0) \in [0, 1]^2$ esiste un intorno U di $H(t_0, s_0)$ in D e una primitiva $F : U \rightarrow \mathbb{C}$ di ω su U con $G(t, s) = F(H(t, s))$ per ogni (t, s) in un intorno di (t_0, s_0) (G è una primitiva di ω lungo H). Per compattezza di $[0, 1] \times [0, 1]$, esiste una suddivisione $0 = t_0 < \dots < t_n = 1, 0 = s_0 < \dots < s_m = 1$ t.c. $H([t_i, t_{i+1}] \times [s_j, s_{j+1}]) \subseteq U_{i,j} \subseteq D$ aperto connesso su cui ω ammette una primitiva. Fissiamo $s_0 = 0$ e occupiamoci della prima riga di quadratini. Scegliamo $F_{0,0} : U_{0,0} \rightarrow \mathbb{C}$

primitiva di ω su $U_{0,0}$ e per ogni $(t, s) \in [t_0, t_1] \times [s_0, s_1]$ poniamo $G(t, s) = F_{0,0}(H(t, s))$. Tra tutte le primitive di ω su $U_{1,0}$, scegliamo quella che coincide con $F_{0,0}$ su $H(t_1, s_0)$ (unica perché $U_{1,0}$ connesso) e chiamiamola $F_{1,0}$. È facile verificare che $F_{0,0}(t_1, s) = F_{1,0}(t_1, s)$ per ogni $s \in [s_0, s_1]$. Dunque possiamo porre $G(t, s) = F_{1,0}(H(t, s))$ per ogni $t \in [t_1, t_2], s \in [s_0, s_1]$. Proseguiamo così definendo G su tutti i quadratini della forma $[t_i, t_{i+1}] \times [s_0, s_1]$, ottenendo G definita su $[0, 1] \times [s_0, s_1]$. Poi proseguiamo su $[0, 1] \times [s_1, s_2]$: se facciamo in modo che la definizione coincida con quella della riga sotto in un punto (t_i, s_1) , coinciderà anche sui lati $[t_i, t_{i+1}] \times \{s_1\}$ e $\{t_i\} \times [s_1, s_2]$. Allora per induzione possiamo definire G su tutto $[0, 1] \times [0, 1]$. Notiamo ora che $G(0, s)$ è una primitiva di ω lungo il cammino costante $H(0, s)$ e pertanto è costante. In particolare $G(0, 0) = G(0, 1)$. Analogamente $G(1, 0) = G(1, 1)$. Inoltre $G(t, 0)$ è una primitiva di ω lungo γ_1 e $G(t, 1)$ è una primitiva di ω lungo γ_2 , per cui

$$\int_{\gamma_1} \omega = G(1, 0) - G(0, 0) = G(1, 1) - G(0, 1) = \int_{\gamma_2} \omega. \quad \square$$

Corollario 6.6.21. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ semplicemente connesso, ω una 1-forma su D . Allora ω è chiusa $\iff \omega$ è esatta.

Dimostrazione. (\Leftarrow) Sempre vera.

(\Rightarrow) Dato $\gamma : [0, 1] \rightarrow D$ un laccio chiuso, per semplice connessione di D $\gamma \sim C_{\gamma(0)}$ (il cammino costante in $\gamma(0)$). Dunque per invarianza omotopica

$$\int_{\gamma} \omega = \int_{C_{\gamma(0)}} \omega = 0. \quad \text{Dunque } \omega \text{ è esatta.} \quad \square$$

Teorema 6.6.22. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto, ω una 1-forma su D . Allora sono fatti equivalenti:

- (i) ω è chiusa;
- (ii) $\int_{\partial R} \omega = 0$ per ogni rettangolo $R \subseteq D$;
- (iii) $\int_{\gamma} \omega = 0$ per ogni laccio continuo omotopo al laccio costante.

Dimostrazione. (i) \Rightarrow (iii) segue dall'invarianza omotopica.

(iii) \Rightarrow (ii) è ovvio.

(ii) \Rightarrow (i) è il corollario 6.6.15. \square

Definizione 6.6.23. Ricordiamo che ogni cammino chiuso $\gamma : [0, 1] \rightarrow D$ definisce un loop $\hat{\gamma} : S^1 \rightarrow D$ e γ si dice *liberamente omotopo* a α se esiste $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow D$ continua con $H(t, 0) = \gamma(t), H(t, 1) = \alpha(t)$ per ogni $t \in [0, 1]$, $H(0, s) = H(1, s)$ per ogni $s \in [0, 1]$ (cioè $H(\cdot, s)$ è un cammino chiuso per ogni $s \in [0, 1]$). Però non chiediamo $H(0, s), H(1, s)$ costanti in s .

Ricordiamo che γ è liberamente omotopa a $\alpha \iff \hat{\gamma}$ è omotopo a $\hat{\alpha} \iff \gamma \sim \beta * \alpha * \bar{\beta}$ per qualche cammino β che congiunge $\gamma(0)$ a $\alpha(0)$.

Esempio 6.6.24. In $\mathbb{C} \setminus \{0\}$, $\gamma(t) = e^{2\pi it}$, $\alpha(t) = 5 \cdot e^{2\pi it}$, $t \in [0, 1]$ sono liberamente omotopi.

Fatto 6.6.25. Se ω è una 1-forma chiusa su D e γ e α sono cammini chiusi su D liberamente omotopi, allora $\int_{\gamma} \omega = \int_{\alpha} \omega$. Infatti γ è omotopo a estremi fissi a $\beta * \alpha * \bar{\beta}$, per cui $\int_{\gamma} \omega = \int_{\beta * \alpha * \bar{\beta}} \omega = \int_{\beta} \omega + \int_{\alpha} \omega + \int_{\bar{\beta}} \omega = \int_{\alpha} \omega$.

6.7 Forme chiuse di classe C^1

Definizione 6.7.1. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un aperto, $\omega = P dx + Q dy$ 1-forma su D si dice C^1 se $P, Q : D \rightarrow \mathbb{C}$ sono di classe C^1 . In questo caso poniamo formalmente $d\omega = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy$ dove $dx dy$ è un simbolo formale.

Teorema 6.7.2. (Formula di Green, o Green-Riemann, o Stokes) Sia ω una 1-forma C^1 su D , $R \subseteq D$ rettangolo. Allora $\int_{\partial R} \omega = \int_R d\omega$.

Dimostrazione. $\int_R d\omega = \int_R \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy = \int_R \frac{\partial Q}{\partial x} dx dy - \int_R \frac{\partial P}{\partial y} dx dy = \int_{b_1}^{b_2} \left(\int_{a_1}^{a_2} \frac{\partial Q}{\partial x}(x, y) dx \right) dy - \int_{a_1}^{a_2} \left(\int_{b_1}^{b_2} \frac{\partial P}{\partial y}(x, y) dy \right) dx = \int_{b_1}^{b_2} (Q(a_2, y) - Q(a_1, y)) dy - \int_{a_1}^{a_2} (P(x, b_2) - P(x, b_1)) dx = \int_{b_1}^{b_2} Q(a_2, y) dy - \int_{b_1}^{b_2} Q(a_1, y) dy - \int_{a_1}^{a_2} Q(x, b_2) dx + \int_{a_1}^{a_2} Q(x, b_1) dx = \int_{\gamma_2} \omega - \int_{\bar{\gamma}_4} \omega - \int_{\bar{\gamma}_3} \omega + \int_{\gamma_1} \omega = \int_{\gamma_1} \omega + \int_{\gamma_2} \omega + \int_{\gamma_3} \omega + \int_{\gamma_4} \omega. \quad \square$

Teorema 6.7.3. Sia ω una 1-forma C^1 su D . Allora ω è chiusa $\iff d\omega = 0$.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Se ω è chiusa, per ogni $p \in D$ esiste $U \subseteq D$ aperto, $p \in U$ con $\omega = dF = \frac{\partial F}{\partial x} dx + \frac{\partial F}{\partial y} dy$ su U . F è C^2 perché ω è C^1 . Per un noto teorema, $\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 F}{\partial y \partial x}$, dunque $d\omega = \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right) \right) dx dy = 0$.

(\Leftarrow) Sia $R \subseteq D$ un rettangolo. Allora $\int_{\partial R} \omega = \int_R d\omega = 0$, per cui ω è chiusa per il corollario 6.6.15. \square

6.8 Le funzioni olomorfe sono analitiche

Abbiamo visto che analitica \Rightarrow olomorfa. Quanto segue è di interesse indipendente e servirà per dimostrare l'implicazione opposta, cioè

$$\text{olomorfa} \Rightarrow \text{analitica}$$

(in particolare, l'esistenza della derivata prima complessa implica l'esistenza delle derivate di qualsiasi ordine).

Teorema 6.8.1. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa. Allora $f(z) dz$ è una 1-forma chiusa su D .

Dimostrazione. Assumendo $f \in C^1$, $\omega = f(z) dz = f(z) dx + if(z) dy$ è C^1 e $d\omega = \left(\frac{\partial if}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy = \left(i \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{\partial f}{\partial y} \right) dx dy$. Poiché f è olomorfa, $\frac{\partial f}{\partial x} = df(1) = f'$, mentre $\frac{\partial f}{\partial y} = df(i) = i df(1) = if' \Rightarrow d\omega = (if' - if') dx dy = 0$.

Adesso facciamo il caso generale.

Sia f olomorfa, per assurdo $f(z) dz$ non è chiusa. Allora esiste un rettangolo

$R \subseteq D$ t.c. $\int_{\partial R} \omega = \alpha(R) \neq 0$. D'ora in poi, se \bar{R} è un qualsiasi rettangolo, poniamo $\alpha(\bar{R}) = \int_{\partial \bar{R}} \omega$. Dividiamo R in quattro rettangoli uguali A_1, A_2, A_3, A_4 con i lati paralleli a quelli di R e aventi un vertice in comune nel centro di R . $\alpha(R) = \int_{\partial R} \omega = \int_{\partial A_1} \omega + \int_{\partial A_2} \omega + \int_{\partial A_3} \omega + \int_{\partial A_4} \omega = \alpha(A_1) + \alpha(A_2) +$

$\alpha(A_3) + \alpha(A_4)$ ed esiste perciò un A_i t.c. $|\alpha(A_i)| \geq \frac{|\alpha(R)|}{4}$. Poniamo R_1 uguale a questo A_i . Iterando la costruzione di R_1 , otteniamo per induzione una successione di rettangoli inscatolati $R \supseteq R_1 \supseteq R_2 \supseteq R_3 \supseteq \dots \supseteq R_n \supseteq \dots$ con $|\alpha(R_n)| \geq \frac{|\alpha(R)|}{4^n}$. Ora prendiamo $z_0 \in \bigcap_{n \in \mathbb{N}} R_n \neq \emptyset$ in quanto intersezione

decrecente di compatti chiusi non vuoti. Poiché f è olomorfa, abbiamo $f(z) = f(z_0) + f'(z_0)(z - z_0) + \varepsilon(z)|z - z_0|$, dove $\lim_{z \rightarrow z_0} |\varepsilon(z)| = 0$, per cui $\alpha(R_n) =$

$\int_{\partial R_n} (f(z_0) + f'(z_0)(z - z_0) + \varepsilon(z)|z - z_0|) dz = \int_{\partial R_n} f(z_0) dz + \int_{\partial R_n} f'(z_0)(z - z_0) dz + \int_{\partial R_n} \varepsilon(z)|z - z_0| dz$. dz e $(z - z_0) dz$ ammettono primitive z e $(z - z_0)^2/2$, dunque sono esatte, in particolare chiuse, quindi i primi due integrali fanno 0.

Perciò $\alpha(R_n) = \int_{\partial R_n} \varepsilon(z)|z - z_0| dz$. Ora, poiché $\lim_{z \rightarrow z_0} \varepsilon(z) = 0$, possiamo

scegliere $\delta > 0$ t.c. $|z - z_0| < \delta \Rightarrow |\varepsilon(z)| \leq \frac{|\alpha(R)|}{4(a+b)^2}$, dove a, b sono le lunghezze dei lati di R . Poiché $z_0 \in R_n$ e $\text{diam}(R_n) \leq \frac{a+b}{2^n}$, basta scegliere n opportuna e

avremo che $|\varepsilon(z)| \leq \frac{|\alpha(R)|}{4(a+b)^2}$ per ogni $z \in R_n$. Per tale n , se $z \in \partial R_n$, $|z - z_0| \leq$

$$\begin{aligned} \text{diam}(R_n) &\leq \frac{a+b}{2^n}, \text{ per cui } |\alpha(R_n)| = \left| \int_{\partial R_n} \varepsilon(z) |z - z_0| dz \right| \leq \int_0^{\frac{2(a+b)}{2^n}} |\varepsilon(\gamma(t))| \cdot \\ |\gamma(t) - z_0| dt &\leq \frac{2(a+b)}{2^n} \cdot \frac{|\alpha(R)|}{4(a+b)^2} \cdot \frac{(a+b)}{2^n} = \frac{1}{2} \frac{|\alpha(R)|}{4^n}, \text{ il che contraddice} \\ |\alpha(R_n)| &\geq \frac{|\alpha(R)|}{4^n}. \end{aligned} \quad \square$$

Corollario 6.8.2. $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa \Rightarrow per ogni $p \in D$ esistono un aperto $U \subseteq D$, $p \in U$ e $F : U \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con $F' = f|_U$.

Dimostrazione. $f(z) dz$ chiusa \Rightarrow esistono U come nell'enunciato, $F : U \rightarrow \mathbb{C}$ con $dF = f(z) dz$ su U , cioè F è olomorfa e $F' = f$ su U . \square

Corollario 6.8.3. $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa $\Rightarrow \int_{\gamma} f(z) dz = 0$ per ogni γ laccio in D omotopicamente banale.

Proposizione 6.8.4. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ continua, D aperto, e f olomorfa su $D \setminus r$, r una retta orizzontale. Allora $f(z) dz$ è chiusa.

Dimostrazione. Sia $R \subseteq D$ rettangolo, vogliamo $\int_{\partial R} \omega = 0$. Se $R \cap r = \emptyset$, segue da quanto già visto. Se $R \cap r \neq \emptyset$, supponiamo senza perdita di generalità che un lato orizzontale di r giaccia su r (se r taglia R da qualche parte a metà, si separa R in due rettangoli con lati giacenti su R : è ovvio che l'integrale lungo il bordo di R è la somma degli integrali lungo i bordi degli integrali ottenuti). Allora possiamo costruire una successione di rettangoli R_n in questo modo: un lato orizzontale coincide con il lato orizzontale di R che non giace su r , i lati verticali sono contenuti nei lati verticali di R e il rimanente lato orizzontale si avvicina al crescere di n al lato di R che giace su r . R_n "tende" a R . Allora, usando che f è continua, si vede facilmente che $\int_{\partial R} f(z) dz = \lim_{n \rightarrow +\infty} \int_{\partial R_n} f(z) dz = 0$ in quanto $\int_{\partial R_n} f(z) dz = 0$ per ogni n (sempre perché $R_n \subseteq D \setminus r$). \square

Per proseguire nella dimostrazione che le funzioni olomorfe sono analitiche, avremo bisogno di una definizione e di alcune sue proprietà. Sia $a \in \mathbb{C}$, $x_0 = 1 + a$. Ricordiamo che $\pi_1(\mathbb{C} \setminus \{a\}, x_0) \simeq \mathbb{Z}$. Fissiamo un isomorfismo canonico $f : \pi_1(\mathbb{C} \setminus \{a\}, x_0) \rightarrow \mathbb{Z}$ che manda $[\gamma]$ in 1, dove γ è una parametrizzazione di $\partial B(a, 1)$ che percorre la circonferenza in senso antiorario. Ricordiamo anche che $[S^1, \mathbb{C} \setminus \{a\}]$ indica le classi di omotopia (libera) di mappe continue da S^1 in $\mathbb{C} \setminus \{a\}$. Abbiamo visto che esiste una bigezione naturale

$$\begin{aligned} \Omega(x_0, x_0) &\longrightarrow \Omega(S^1, x_0) \\ \gamma &\longmapsto \hat{\gamma} \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc}
[0, 1] & \xrightarrow{\gamma} & \mathbb{C} \setminus \{a\} \\
\downarrow \pi & \nearrow \hat{\gamma} & \\
S^1 \simeq [0, 1] / \sim & &
\end{array}$$

Questa bigezione induce un omomorfismo

$$\begin{aligned}
\partial : \pi_1(\mathbb{C} \setminus \{a\}, x_0) &\longrightarrow [S^1, \mathbb{C} \setminus \{a\}] \\
[\gamma] &\longmapsto [\hat{\gamma}]
\end{aligned}$$

Inoltre ∂ è suriettiva e $\partial([\gamma]) = \partial([\gamma']) \iff [\gamma]$ e $[\gamma']$ sono coniugati in $\pi_1(\mathbb{C} \setminus \{a\}, x_0)$, che però è abeliano, dunque ∂ è iniettiva. Definiamo $\psi : [S^1, \mathbb{C} \setminus \{a\}] \longrightarrow \mathbb{Z}$ come $\psi = f \circ \partial^{-1}$.

Definizione 6.8.5. Sia $\gamma : [0, 1] \longrightarrow \mathbb{C} \setminus \{a\}$ un cammino chiuso in x_0 . Chiamiamo INDICE DI γ RISPETTO AD a l'intero $\psi([\hat{\gamma}]) =: I(\gamma, a)$ dove $\hat{\gamma} : S^1 \longrightarrow \mathbb{C} \setminus \{a\}$ è la mappa indotta da γ .

Teorema 6.8.6. Sia $\gamma : [0, 1] \longrightarrow \mathbb{C} \setminus \{a\}$ un cammino chiuso. Allora $I(\gamma, a) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{1}{z-a} dz$.

Dimostrazione. Abbiamo già visto che $\frac{1}{z-a}$ è olomorfa in $\mathbb{C} \setminus \{a\} \Rightarrow \omega = \frac{1}{z-a} dz$ è chiusa \Rightarrow possiamo integrare ω lungo curve γ continue. Inoltre, abbiamo già visto che, se γ' è liberamente omotopo a γ , $\int_{\gamma} \omega = \int_{\gamma'} \omega$. Quindi la seguente mappa è ben definita:

$$\begin{aligned}
\varphi : [S^1, \mathbb{C} \setminus \{a\}] &\longrightarrow \mathbb{C} \\
[\hat{\gamma}] &\longmapsto \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \omega
\end{aligned}$$

Ci resta da dimostrare $\varphi = \psi$, cioè $\varphi([\hat{\gamma}]) = \psi([\hat{\gamma}])$ per ogni $[\hat{\gamma}] \in [S^1, \mathbb{C} \setminus \{a\}]$. Notiamo che $[S^1, \mathbb{C} \setminus \{a\}] = \{[\hat{\gamma}_n] \mid \gamma_n : [0, 1] \longrightarrow \mathbb{C} \setminus \{a\}, \gamma_n(t) = a + e^{2\pi i n t}\} \Rightarrow \psi([\hat{\gamma}_n]) = n$. Abbiamo già visto d'altro canto che $\int_{\gamma_n} \frac{1}{z-a} dz = 2\pi i n$, da cui la tesi. \square

Osservazione 6.8.7. Per definizione, $\omega = \frac{1}{z-a} dz$ è chiusa, cioè localmente esatta. Le primitive locali di ω sono date dalle branche di $\log(z-a)$. Una primitiva di ω lungo γ è una funzione continua $f : [0, 1] \longrightarrow \mathbb{C}$ t.c. $e^{f(t)} = \gamma(t) - a \Rightarrow I(\gamma, a) = \frac{1}{2\pi i} (f(1) - f(0))$.

Elenchiamo ora alcune proprietà dell'indice.

Osservazione 6.8.8. Siano γ, γ' due curve C^0 in $\mathbb{C} \setminus \{a\}$, γ liberamente omotopo a γ' : Allora $I(\gamma, a) = I(\gamma', a)$.

Proposizione 6.8.9. Sia $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ una curva chiusa C^0 . La funzione

$$\begin{aligned} \mathbb{C} \setminus \text{Im } \gamma &\longrightarrow \mathbb{Z} \\ z &\longmapsto I(\gamma, z) \end{aligned}$$

è continua e localmente costante (in particolare, è costante su ogni componente connessa di $\mathbb{C} \setminus \text{Im } \gamma$).

Dimostrazione. Fissiamo $a \in \mathbb{C} \setminus \text{Im } \gamma$. Mostriamo che per ogni $h \in \mathbb{C}$, $|h|$ sufficientemente piccolo, $I(\gamma, a+h) = I(\gamma, a)$. Sia $0 < \delta_0 < \min\{|\gamma(t) - a| \mid t \in [0, 1]\} \neq 0$ perché $a \notin \mathbb{C} \setminus \text{Im } \gamma$. Per ogni $h \in \mathbb{C}$ t.c. $|h| < \delta_0$ abbiamo:

$$I(\gamma, a+h) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{1}{z - (a+h)} dz = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{dz}{(z-h) - a}.$$
Facciamo un cambio di variabile: $z' = z - h$. Otteniamo che $I(\gamma, a+h) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma'} \frac{1}{z' - a} dz'$ dove $\gamma'(t) = \gamma(t) - h$ per $t \in [0, 1]$. Per concludere, mostreremo che è uguale a $\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{1}{z - a} dz$ perché γ e γ' sono liberamente omotopi. $\gamma \sim \gamma'$ tramite l'omotopia $F(t, s) = \gamma(t) - sh$ per ogni $t, s \in [0, 1] \Rightarrow I(\gamma, a+h) = I(\gamma', a) = I(\gamma, a)$. \square

Proposizione 6.8.10. Sia $a \in \mathbb{C}$. Sia γ una curva chiusa C^0 t.c. $\text{Im } \gamma \subset D \subset \mathbb{C} \setminus \{a\}$, D è un aperto semplicemente connesso. Allora $I(\gamma, a) = 0$.

Dimostrazione. $\omega = \frac{1}{z-a} dz$ è chiusa in $D \Rightarrow \omega$ è esatta $\Rightarrow \int_{\gamma} \omega = 0 \Rightarrow I(\gamma, a) = 0$. \square

Esercizio 6.8.11. Sia γ una curva chiusa C^0 , $a \in \mathbb{C} \setminus \text{Im } \gamma$. Allora $I(\gamma, a) = 0$ per tutti gli a in una componente connessa illimitata di $\mathbb{C} \setminus \text{Im } \gamma$.

Esempio 6.8.12. Sia $\gamma : t \mapsto Re^{it}$ con $R > 0$ e $t \in [0, 2\pi]$. Per $|z| < R$, $I(\gamma, z) = 1$. Per $|z| > R$, $I(\gamma, z) = 0$.

Proposizione 6.8.13. Sia $f : \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq R\} \rightarrow \mathbb{C}$ una mappa continua, sia $\gamma(t) = f(Re^{2\pi it})$ per $t \in [0, 1]$. Se $a \notin \text{Im}(\gamma)$ e $I(\gamma, a) \neq 0$ allora esiste $z \in \mathbb{C}$, $|z| < R$ t.c. $f(z) = a$.

Dimostrazione. Per assurdo assumiamo che $f(z) \neq a$ per ogni $|z| < R$. Allora $f(z) \neq a$ per ogni $|z| \leq R$ visto che $a \notin \text{Im } \gamma$. Definiamo $F(t, s) = f(tRe^{2\pi is})$ per ogni $t, s \in [0, 1]$. F ci dà un'omotopia tra γ e un cammino costante in $f(0)$. Infatti F è continua, $F(1, s) = \gamma(s)$, $F(0, s) = f(0)$, $F(t, 0) = F(t, 1)$ e $F(t, s) \in \mathbb{C} \setminus \{a\}$ per ogni t, s . γ è dunque omotopo al cammino costante in $f(0)$
 $\Rightarrow \int_{\gamma} \frac{1}{z-a} dz = 0$, ma $I(\gamma, a) \neq 0$, assurdo. \square

Definizione 6.8.14. Siano γ_1, γ_2 due curve C^0 . Allora Poniamo

$$\begin{aligned}\gamma_1 \gamma_2 : t &\longmapsto \gamma_1(t) \gamma_2(t) \\ \gamma_1 + \gamma_2 : t &\longmapsto \gamma_1(t) + \gamma_2(t)\end{aligned}$$

Teorema 6.8.15. Siano γ_1, γ_2 due curve C^0 chiuse t.c. $0 \notin \text{Im } \gamma_1 \cup \text{Im } \gamma_2$. Allora $I(\gamma_1 \gamma_2, 0) = I(\gamma_1, 0) + I(\gamma_2, 0)$.

Dimostrazione. Sia $\omega = \frac{dz}{z}$ e $\gamma_i : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0\}$, $i = 1, 2$. Sia $f_i : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ continua t.c. $e^{f_i(t)} = \gamma_i(t)$ per ogni $t \in [0, 1]$, $i = 1, 2$. Allora $\gamma_1(t) \gamma_2(t) = e^{f_1(t)} e^{f_2(t)} = e^{f_1(t) + f_2(t)} \Rightarrow f = f_1 + f_2$ è una primitiva di ω lungo $\gamma_1 \gamma_2$.
 $I(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{f_1(1) + f_2(1) - f_1(0) - f_2(0)}{2\pi i} = \frac{f_1(1) - f_1(0)}{2\pi i} + \frac{f_2(1) - f_2(0)}{2\pi i} = I(\gamma_1, 0) + I(\gamma_2, 0)$. \square

Teorema 6.8.16. Siano γ_1, γ curve chiuse C^0 t.c. $0 \notin \text{Im } \gamma_1 \cup \text{Im } \gamma$. Assumiamo che $0 < |\gamma_1(t)| < |\gamma(t)|$ per ogni $t \in [0, 1]$. Allora $I(\gamma_1 + \gamma, 0) = I(\gamma, 0)$.

Dimostrazione. $\gamma(t) + \gamma_1(t) = \gamma(t) \left(1 + \frac{\gamma_1(t)}{\gamma(t)}\right) = \gamma(t) \beta(t)$. $I(\gamma_1 + \gamma, 0) = I(\gamma \beta, 0) = I(\gamma, 0) + I(\beta, 0)$. Notiamo che $I(\beta, 0) = 0$, infatti $|\beta(t) - 1| = \left|1 + \frac{\gamma_1(t)}{\gamma(t)} - 1\right| = \left|\frac{\gamma_1(t)}{\gamma(t)}\right| < 1 \Rightarrow \text{Im } \beta \subset D(1, 1)$, un aperto semplicemente connesso che non contiene 0, dunque $I(\beta, 0) = 0$. \square

Teorema 6.8.17. (Formula integrale di Cauchy) Sia $D \subset \mathbb{C}$ un aperto, $a \in D$, sia $\gamma : [0, 1] \rightarrow D$ un cammino chiuso omotopicamente banale, con $a \notin \text{Im } \gamma$. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa. Allora $\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(z)}{z-a} dz = I(\gamma, a) f(a)$.

Dimostrazione. Per ogni $z \in D$ sia $g(z) = \begin{cases} \frac{f(z) - f(a)}{z-a} & \text{se } z \neq a \\ f'(a) & \text{se } z = a \end{cases}$. g è continua in D ed è olomorfa in $D \setminus r$ dove r è la retta orizzontale che passa per

a. Per la proposizione 6.8.4, $g(z) dz$ è chiusa in D . Visto che γ è omotopicamente banale in D e $g(z) dz$ è chiusa in D , abbiamo che $\int_{\gamma} g(z) dz = 0$.

$$0 = \int_{\gamma} g(z) dz = \int_{\gamma} \frac{f(z) - f(a)}{z - a} dz = \int_{\gamma} \frac{f(z)}{z - a} dz - f(a) \int_{\gamma} \frac{1}{z - a} dz.$$
Dividendo per $2\pi i$ otteniamo la tesi. \square

Esempio 6.8.18. Sia $R > 0$ t.c. $B(a, R) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z - a| \leq R\} \subset D$ e sia γ una parametrizzazione di $\partial B(a, R)$ in senso antiorario. Applicando la formula integrale di Cauchy otteniamo che $\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(z)}{z - a} dz = f(a)$ ($I(\gamma, a) = 1$) per ogni $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa.

Osservazione 6.8.19. La formula integrale di Cauchy implica il teorema di Cauchy. Infatti, se f è olomorfa su un aperto $D \subset \mathbb{C}$, vogliamo $\omega = f(z) dz$ chiusa in D . Sia γ omotopicamente banale in D e $a \notin \text{Im } \gamma$. Sia $F(z) = (z - a)f(z)$. Appliciamo la formula integrale di Cauchy a $F(z)$:

$$0 = F(a)I(\gamma, a) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{F(z)}{z - a} dz = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f(z) dz.$$
Abbiamo $\int_{\gamma} \omega = 0$ per ogni γ omotopicamente banale con $\text{Im } \gamma \subset D$, dunque per il teorema 6.6.22 ω è chiusa.

Teorema 6.8.20. (Olomorfa \Rightarrow analitica) Sia f olomorfa nel disco aperto $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| < R\}$ per $0 < R \leq +\infty$. Allora f è analitica in $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| < R\}$. In particolare, esiste una serie di potenze $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ con raggio di convergenza

$$\rho \geq R \text{ t.c. } f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n \text{ per } |z| < R.$$

Dimostrazione. Sia $0 < r_0 < R$. Definiamo $\gamma : t \mapsto r_0 e^{2\pi i t}$ per ogni $t \in [0, 1]$. Sia $z \in \mathbb{C}$ t.c. $|z| < r_0$ (per notazione, $|z| = r$). Allora $I(\gamma, z) = 1$ e la formula integrale di Cauchy ci dice che $f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w - z} dw$. No-

tiamo che $\frac{1}{w - z} - \frac{1}{w} \frac{\left(\frac{z}{w}\right)^{n+1}}{1 - \frac{z}{w}} = \frac{1}{w} \frac{1 - \left(\frac{z}{w}\right)^{n+1}}{1 - \frac{z}{w}} = \frac{1}{w} \sum_{k=0}^n \left(\frac{z}{w}\right)^k \cdot \frac{1}{w - z} =$
 $\frac{1}{w} \sum_{k=0}^n \left(\frac{z}{w}\right)^k + \frac{1}{w} \frac{\left(\frac{z}{w}\right)^{n+1}}{1 - \frac{z}{w}}.$ Sostituiamolo dentro la formula con l'integrale per

$$f(z) \text{ per ottenere } f(z) = \frac{1}{2\pi i} \left[\int_{\gamma} \frac{f(w)}{w} \sum_{k=0}^n \left(\frac{z}{w}\right)^k dw + \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w} \frac{\left(\frac{z}{w}\right)^{n+1}}{1 - \frac{z}{w}} dw \right] =$$

$$\frac{1}{2\pi i} \left[\sum_{k=0}^n z^k \left(\int_{\gamma} \frac{f(w)}{w^{k+1}} dw \right) + \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w} \frac{\left(\frac{z}{w}\right)^{n+1}}{1 - \frac{z}{w}} dw \right].$$
 Definiamo $a_k = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w^{k+1}} dw$,

$$\begin{aligned}
R_n &= \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w} \left(\frac{z}{w} \right)^{n+1} dw. \text{ Abbiamo ottenuto } f(z) = \sum_{k=0}^n a_k z^k + R_n. \text{ De-} \\
&\text{finiamo } M(r_0) = \sup\{|f(\gamma(t))| \mid t \in [0, 1]\}. \quad R_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w} \left(\frac{z}{w} \right)^{n+1} dw = \\
&\frac{1}{2\pi i} \int_0^1 \frac{f(\gamma(t))}{\gamma(t)} \left(\frac{z}{\gamma(t)} \right)^{n+1} r_0 2\pi i e^{2\pi i t} dt. \quad |R_n| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{|f(\gamma(t))|}{|\gamma(t)|} \left| \frac{z}{\gamma(t)} \right|^{n+1} r_0 2\pi dt. \\
&|z| = r < r_0 = |\gamma(t)| \Rightarrow \left| 1 - \frac{z}{\gamma(t)} \right| \geq 1 - \frac{r}{r_0}. \quad |R_n| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{|f(\gamma(t))|}{r_0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{n+1} r_0 2\pi dt \leq \\
&M(r_0) \frac{\left(\frac{r}{r_0} \right)^{n+1}}{1 - \frac{r}{r_0}}. \quad \text{Quindi, poich\'e } r/r_0 < 1, |R_n| \rightarrow 0 \text{ per } n \rightarrow +\infty \Rightarrow \\
&f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k \text{ per } |z| < R. \text{ Osserviamo che } a_k = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w^{k+1}} dw \text{ \textbf{\'e} indi-} \\
&\text{pendente da } r_0 \text{ per ogni } 0 < r_0 < R. \text{ Usando stime analoghe alle precedenti} \\
&\text{otteniamo } |a_k| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^1 \frac{|f(\gamma(t))|}{|\gamma(t)|^{k+1}} r_0 2\pi dt \leq \frac{M(r_0)}{r_0^k}. \\
&|a_k| \leq \frac{M(r_0)}{r_0^k} (\star)
\end{aligned}$$

Per la proposizione 6.2.8 $\sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k$ converge uniformemente per $|z| \leq r$ per ogni $r < r_0$ e converge assolutamente per $|z| < r_0$ per ogni $0 < r_0 < R \Rightarrow$ il raggio di convergenza della serie \textbf{\'e} $\rho \geq R$. \square

Osservazione 6.8.21. $f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k z^k \Rightarrow 2\pi i f(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\int_{\gamma} \frac{f(w)}{w^{k+1}} dw \right) z^k =$

$$\int_{\gamma} f(w) \left(\sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{w^{k+1}} \right) dw.$$

Corollario 6.8.22. Sia $D \subset \mathbb{C}$ un aperto. Una funzione f \textbf{\'e} olomorfa in $D \iff f$ \textbf{\'e} analitica in D . In particolare, la serie di Taylor di f in $a \in D$ ha raggio di convergenza $\rho \geq \sup\{r > 0 \mid \{z \in \mathbb{C} \mid |z - a| < r\} \subseteq D\}$.

Dimostrazione. Segue da quanto visto nella dimostrazione del teorema precedente. \square

Corollario 6.8.23. Se f \textbf{\'e} olomorfa su D aperto, allora f \textbf{\'e} C^{∞} in D e per ogni $n \geq 0$ $f^{(n)}$ \textbf{\'e} olomorfa in D .

Dimostrazione. f olomorfa $\Rightarrow f$ analitica $\Rightarrow f \in C^\infty$ e $f^{(n)}$ analitica $\Rightarrow f^{(n)}$ olomorfa. \square

Corollario 6.8.24. Sia f olomorfa in D aperto. Sia $R > 0$ t.c. $B(a, R) \subset D$. Sia γ la curva che parametrizza $\partial B(a, R)$ in senso antiorario. Allora $f^{(n)}(a) = \frac{n!}{2\pi i} \int_\gamma \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz$.

Dimostrazione. $\frac{f^{(n)}(a)}{n!} = a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz$. \square

Teorema 6.8.25. (Teorema di Morera) Sia f una funzione continua in un aperto D . Se $\omega = f(z) dz$ è chiusa in D , allora f è olomorfa in D .

Dimostrazione. ω è chiusa in D . Per definizione, per ogni $a \in D$ esiste un intorno aperto U di a t.c. $\omega = dF$ in U , F di classe C^1 in U . $f(z) dz = \omega = dF = \frac{\partial F}{\partial z} dz + \frac{\partial F}{\partial \bar{z}} d\bar{z} \iff f(z) = \frac{\partial F}{\partial z}, \frac{\partial F}{\partial \bar{z}} = 0$. $\frac{\partial F}{\partial \bar{z}} = 0 \iff F$ soddisfa le condizioni di Cauchy-Riemann $\Rightarrow F$ olomorfa $\Rightarrow F'$ olomorfa per il corollario 6.8.23, ma $F' = f$. \square

Corollario 6.8.26. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ continua, D aperto. Se f è olomorfa in $D \setminus r$, r retta orizzontale, allora f è olomorfa in D .

Dimostrazione. Segue dal teorema di Morera e dalla proposizione 6.8.4. \square

6.9 Alcuni risultati sulle funzioni olomorfe

Adesso enunciamo una serie di risultati importanti sulle funzioni olomorfe. Cominciamo con una caratterizzazione.

Teorema 6.9.1. Sia $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione, $D \subset \mathbb{C}$ un aperto. Le seguenti sono equivalenti:

- (i) f è olomorfa in D ;
- (ii) f è analitica in D ;
- (iii) $f \in C^1$ e soddisfa le condizioni di Cauchy-Riemann in D ;
- (iv) f è continua in D e olomorfa in $D \setminus r$, r retta orizzontale;
- (v) f è continua e $\omega = f(z) dz$ è chiusa in D .

Dimostrazione. Segue da quanto visto finora. \square

Corollario 6.9.2. (Disuguaglianze di Cauchy) Sia $a \in \mathbb{C}$, $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n(z-a)^n$

con raggio di convergenza $\rho > 0$. Allora per ogni $0 < r < \rho$ $a_n = \frac{f^{(n)}(a)}{n!}$ e $|a_n|r^n \leq M(r)$ dove $M(r) = \sup\{|f(z)| \mid |z-a| = r\}$.

Dimostrazione. Vista nelle dimostrazioni precedenti. \square

Teorema 6.9.3. (Teorema di Liouville) Una funzione intera limitata è costante.

Dimostrazione. Visto che f è intera, $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n$ con raggio di convergenza $\rho = +\infty \Rightarrow |a_n|r^n \leq M(r)$ per ogni $r \geq 0$. f limitata \Rightarrow esiste $M > 0$ t.c. $|f(z)| \leq M$ per ogni $z \in \mathbb{C} \Rightarrow M(r) \leq M$ per ogni $r > 0 \Rightarrow |a_n| \leq \frac{M}{r^n}$ per ogni $r > 0$ e $n \geq 0$. Mandando $r \rightarrow +\infty$, $|a_n| \rightarrow 0$ per ogni $n \geq 1 \Rightarrow f(z) = a_0$ costante. \square

Vediamo un'interessante applicazione del teorema di Liouville.

Teorema 6.9.4. (Teorema fondamentale dell'algebra) Sia $P(z) \in \mathbb{C}[z]$ un polinomio non costante. Allora esso ammette almeno uno zero.

Dimostrazione. Per assurdo, $P(z) \neq 0$ per ogni $z \in \mathbb{C} \Rightarrow \frac{1}{P(z)}$ è intera. $P(z) = a_n z^n + a_{n-1} z^{n-1} + \dots + a_1 z + a_0$ con $a_n \neq 0$, quindi possiamo riscrivere $P(z)$ come $P(z) = z^n \left(a_n + \frac{a_{n-1}}{z} + \frac{a_{n-2}}{z^2} + \dots + \frac{a_0}{z^n} \right)$. Per $|z| \rightarrow +\infty$, $|P(z)| \rightarrow +\infty$ poiché $|P(z)| = |z|^n \left| a_n + \frac{a_{n-1}}{z} + \frac{a_{n-2}}{z^2} + \dots + \frac{a_0}{z^n} \right|$ e $|z|^n \rightarrow +\infty$, $\left| a_n + \frac{a_{n-1}}{z} + \frac{a_{n-2}}{z^2} + \dots + \frac{a_0}{z^n} \right| \rightarrow |a_n| > 0$. Allora $\left| \frac{1}{P(z)} \right| \rightarrow 0 \Rightarrow$ esiste $R > 0$ t.c. $\left| \frac{1}{P(z)} \right|$ è limitata per ogni $|z| > R$. Ma $\left| \frac{1}{P(z)} \right|$ è limitata su $\{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq R\}$, quindi $\left| \frac{1}{P(z)} \right| \Rightarrow \frac{1}{P(z)}$ è limitata. Applicando il teorema di Liouville a $\frac{1}{P(z)}$ otteniamo che essa è costante, quindi $P(z)$ è costante, assurdo. \square

Definizione 6.9.5. Sia $D \subset \mathbb{C}$ un aperto e $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ una funzione continua. Diciamo che f ha la *proprietà del valore medio* (pvm d'ora in avanti) se per ogni $a \in D$ esiste $r_0 > 0$ t.c.

(i) $\{z \mid |z-a| < r_0\} \subseteq D$;

(ii) $f(a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\theta}) d\theta$ per ogni $0 \leq r < r_0$.

Osservazione 6.9.6. Se f ha la pvm, $\Re f$ e $\Im f$ hanno la pvm.

Osservazione 6.9.7. f olomorfa $\Rightarrow f$ ha la pvm. Infatti, sia f olomorfa in D e $a \in D$ e scegliamo $r_0 > 0$ t.c. $\{z \mid |z - a| \leq r_0\} \subseteq D$. Per la formula integrale di Cauchy su $\gamma : t \mapsto a + re^{i\theta}, t \in [0, 2\pi]$ abbiamo che

$$f(a) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(z)}{z - a} dz = \frac{1}{2\pi i} \int_0^{2\pi} \frac{f(a + re^{i\theta})}{a + re^{i\theta} - a} rie^{i\theta} d\theta \text{ per ogni } 0 \leq r < r_0.$$

Teorema 6.9.8. (Principio del massimo modulo) Sia $D \subset \mathbb{C}$ un aperto, $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ continua che ha la pvm. Se $|f|$ ha un massimo relativo in $a \in D$ (cioè $|f(z)| \leq |f(a)|$ per ogni z sufficientemente vicino ad a), allora f è costante in un intorno di a .

Dimostrazione. Se $f(a) = 0$, $|f(z)| \leq |f(a)| = 0$ per ogni z sufficientemente vicino ad $a \Rightarrow f(z) = 0$ per ogni z sufficientemente vicino ad $a \Rightarrow f$ è costante in un intorno di a . Se $f(a) \neq 0$, $f(a) = \alpha e^{i\beta} \Rightarrow e^{-i\beta} f(a) \in \mathbb{R}$ e $e^{-i\beta} f(a) > 0$. Quindi, a meno di rimpiazzare f con $e^{-i\beta} f$, possiamo assumere $f(a) \in \mathbb{R}$ e $f(a) > 0$. Per notazione, $u = \Re f, v = \Im f$. Adesso scegliamo $r_0 > 0$ t.c.

(i) $B(a, r_0) = \{z \in \mathbb{C} \mid |z - a| \leq r_0\} \subset D$;

(ii) $f(a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\theta}) d\theta$ per ogni $0 \leq r < r_0$;

(iii) $|f(z)| \leq |f(a)|$ per ogni $z \in B(a, r_0)$.

Definiamo $M(r) = \sup\{|f(z)| \mid |z - a| = r\} < +\infty$ per ogni $0 \leq r < r_0$. (iii)

$\Rightarrow M(r) \leq |f(a)| = f(a)$ per ogni $0 \leq r < r_0$. Per (ii), $f(a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(a +$

$re^{i\theta}) d\theta$ per ogni $0 \leq r < r_0$. Ma allora $f(a) = |f(a)| \leq \int_0^{2\pi} |f(a + re^{i\theta})| d\theta =$

$\int_0^{2\pi} M(r) d\theta = M(r) \Rightarrow f(a) = M(r)$ per ogni $0 \leq r < r_0$. $\int_0^{2\pi} M(r) d\theta =$

$M(r) = f(a) = \int_0^{2\pi} f(a + re^{i\theta}) d\theta$, ma poiché $f(a) \in \mathbb{R}$ possiamo integrare

solo la parte reale, dunque $\int_0^{2\pi} M(r) d\theta = \int_0^{2\pi} u(a + re^{i\theta}) d\theta \Rightarrow \int_0^{2\pi} [M(r) -$

$u(a + re^{i\theta})] d\theta = 0$. Sia $g(\theta) = M(r) - u(a + re^{i\theta})$. Allora $\int_0^{2\pi} g(\theta) d\theta = 0$,

ma per definizione $M(r) \geq |f(a + re^{i\theta})| \geq |u(a + re^{i\theta})| \Rightarrow g(\theta) \geq 0 \Rightarrow g = 0$

per ogni $\theta \in [0, 2\pi]$, quindi $M(r) = u(a + re^{i\theta})$ per ogni $\theta \in [0, 2\pi]$. $M(r) \geq$

$|f(a + re^{i\theta})| = (u(a + re^{i\theta})^2 + v(a + re^{i\theta})^2)^{1/2} = (M(r)^2 + v(a + re^{i\theta})^2)^{1/2} \Rightarrow$

$v(a + re^{i\theta}) = 0$ per ogni $\theta \in [0, 2\pi]$ e $0 \leq r < r_0$. Concludendo, per ogni z t.c. $|z - a| < r_0$ abbiamo $f(z) = \Re(f)(z) = u(z) = M(|z - a|) = f(a)$. \square

Corollario 6.9.9. Sia $D \subset \mathbb{C}$ un aperto connesso e limitato. Sia f continua su \overline{D} che ha la pvm in D . Sia $M = \sup\{|f(z)| \mid z \in \partial D\}$. Allora:

(i) $|f(z)| \leq M$ per ogni $z \in D$;

(ii) se esiste $a \in D$ t.c. $|f(a)| = M$, allora f è costante.

Dimostrazione. Definiamo $M' = \sup\{|f(z)| : z \in \overline{D}\}$. Allora $M \leq M' < \infty$ ed esiste almeno un punto $a \in \overline{D}$ tale che $|f(a)| = M'$ (che esiste perché D limitato $\Rightarrow \overline{D}$ compatto). Distinguiamo i due casi, a seconda se a sia in D o meno.

Caso 1: $a \in D$. Per il principio del massimo modulo si ha che f è costante in un intorno di a . Sia allora

$$D' = \{z \in D : |f(z)| = |f(a)| = M'\}$$

Bisogna dimostrare che $D' = D$. In primo luogo si vede che D' è chiuso. Riptendo il ragionamento della seconda parte del teorema sopra citato, si ottiene che se esiste a' tale che $|f(a')| = M' = |f(a)|$ allora vale $f(z) = f(a')$ per i z nella palla $|z - a'| < r'_0$. Allora D' è anche aperto e dunque uguale a D .

Poiché f è continua in \overline{D} , è anche costante in tale insieme e si ottengono entrambi i punti.

Caso 2: $a \notin D$. Allora a si trova sul bordo di D . Allora $M \geq |f(a)| = M'$, e per costruzione si aveva $M \leq M'$. Dunque si ha che $M' = M$, che implica solo il primo punto. \square

Corollario 6.9.10. (Principio del massimo modulo per funzioni olomorfe) Sia f olomorfa su $D \subset \mathbb{C}$ aperto connesso. Se f non è costante, allora $|f|$ non ha massimo relativo in D . Inoltre, se D è limitato e f è continua in \overline{D} , allora $|f|$ assume massimo in ∂D .

Dimostrazione. f olomorfa su $D \Rightarrow f$ ha la pvm. Se $|f|$ ha massimo relativo in D , per il principio del massimo modulo esiste $a \in D$ t.c. f è costante in un intorno di a , dunque per prolungamento analitico f è costante in D . Assumiamo D limitato, per il corollario 6.9.9 $|f(z)| \leq M = \sup\{|f(z)| : z \in \partial D\}$, che è un massimo perché ∂D è chiuso e D limitato ci dà ∂D limitato, quindi ∂D è compatto. Dunque $|f(z)|$ assume massimo in ∂D . \square

Osservazione 6.9.11. Sia f olomorfa in $\{z \in \mathbb{C} : |z| < r\}$ e continua in $\{|z| \leq r\}$. Allora $|f(z)| \leq M(r) = \sup\{|f(z)| : |z| = r\}$ per ogni z t.c. $|z| \leq r$.

Teorema 6.9.12. (*Lemma di Schwarz*). Sia f olomorfa sul disco $|z| < 1$ tale che $f(0) = 0$ e $|f(z)| < 1$ in tale disco. Allora valgono:

- (i) $|f(z)| \leq |z|$ per $|z| < 1$;
- (ii) $|f'(0)| \leq 1$;
- (iii) Se esiste $z_0 \neq 0$ tale che $|f(z_0)| = |z_0|$ oppure $|f'(0)| = 1$, allora esiste $\lambda \in \mathbb{C}$ di modulo unitario tale che $f(z) = \lambda z$.

Dimostrazione. Sia $f(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n$ l'espansione di Taylor nell'origine. Definiamo inoltre la funzione:

$$g(z) = \begin{cases} \frac{f(z)}{z} & 0 < |z| < 1 \\ a_1 = f'(0) & z = 0 \end{cases}$$

Allora $g(z) = \sum_{n \geq 1} a_n z^{n-1}$ per $|z| < 1$. Dunque g è analitica (e olomorfa) nel disco unitario. Fissiamo z nel disco unitario e $|z| < r < 1$. Abbiamo per l'osservazione 6.9.11 che $|g(z)| \leq M(r) = \sup\{|g(z)| \mid |z| = r\} = \sup\{|f(z)/z| \mid |z| = r\} \leq 1/r$. Mandando r a 1 otteniamo che per $|z| < 1$, $|g(z)| \leq 1$. Di conseguenza, nello stesso dominio, $|f(z)| \leq |z|$. Inoltre si deve avere $|g(0)| \leq 1$, cioè $|f'(0)| \leq 1$.

Supponiamo esista a tale che $|a| < 1$ e $|g(a)| = 1$ (ed esiste se e solo se esiste uno z_0 come nelle ipotesi). Per il principio di massimo modulo, g è costante, cioè $g(z) = \lambda$. \square

6.10 Funzioni armoniche

Definizione 6.10.1. Indichiamo con Δ l'operatore $\left(\frac{\partial}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial}{\partial y}\right)^2$. In alcuni testi è indicato con $\nabla \cdot \nabla$ o ∇^2 ed è chiamato *operatore di Laplace* o *laplaciano* e corrisponde alla divergenza del gradiente.

Definizione 6.10.2. Sia $D \subseteq \mathbb{R}^2$ un aperto. Una funzione $u \in C^2(D)$ si dice **ARMONICA** se $\Delta u = 0$.

Teorema 6.10.3. Se f olomorfa su D è t.c. $f = u + iv$, $u, v \in C^2(D)$, allora u, v sono armoniche.

Dimostrazione. $\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$. Usando le condizioni di Cauchy-Riemann abbiamo che $\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y}$. Per un noto teorema, le derivate parziali commutano, dunque usando di nuovo le condizioni di CR abbiamo che $\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial y} = \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial y} \left(-\frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$. Otteniamo quindi $\Delta u = 0$. La dimostrazione per v è analoga. \square

Teorema 6.10.4. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ un aperto semplicemente connesso, $u \in C^2(D)$ una funzione armonica. Allora esiste $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con $\Re(f) = u$ e tale funzione è definita univocamente a meno di una costante additiva puramente immaginaria.

Dimostrazione. Consideriamo la 1-forma $\omega = P dx + Q dy = -\frac{\partial u}{\partial y} dx + \frac{\partial u}{\partial x} dy$.

$d\omega = \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y}\right) dx dy = \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) dx dy = \Delta u dx dy = 0$. Dato che u è C^2 , ω è C^1 , dunque per il teorema 6.7.3 è chiusa. Essendo D semplicemente connesso, per il corollario 6.6.21 ω è esatta, quindi $\omega = dv$ per qualche funzione v , il che significa che $\frac{\partial v}{\partial x} = -\frac{\partial u}{\partial y}$, $\frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial u}{\partial x}$, dunque ponendo $f = u + iv$ abbiamo che le condizioni di Cauchy-Riemann sono soddisfatte, quindi, affinché f sia olomorfa con $\Re(f) = u$ e unicamente definita a meno di costanti additive immaginarie, ci manca solo che v sia a valori reali e univocamente definita a meno di costanti additive reali. Dato che le sue derivate parziali sono a valori reali (per le condizioni di CR), v è uguale a una funzione a valori reali più una costante. Considerando solo le costanti con parte immaginaria nulla si ha la tesi. \square

6.11 Serie di Laurent

Definizione 6.11.1. Una SERIE DI LAURENT è un'espressione del tipo

$$\sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n z^n.$$

Ad essa possiamo associare due serie di potenze, $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ e $\sum_{n < 0} a_n z^n$. Assumiamole assolutamente convergenti con raggio di convergenza finito e non nullo. Si definiscono ρ_1 come il raggio di convergenza della prima serie e ρ_2 come il reciproco del raggio di convergenza della seconda. Consideriamo anche $f_1(z) = \sum_{n \geq 0} a_n z^n$, $f_2(z) = \sum_{n < 0} a_n z^n$. f_1 è chiaramente analitica nella palla di raggio ρ_1 . Invece f_2 converge assolutamente per $|z| > \rho_2$.

Proposizione 6.11.2. f_2 è olomorfa in $|z| > \rho_2$.

Dimostrazione. Sia $z = 1/u$, $g(u) = f_2(1/u) = \sum_{k > 0} a_{-k} u^k$, che converge assolutamente per $|u| < 1/\rho_2$. Inoltre

$$f_2'(z) = -g' \left(\frac{1}{z} \right) \frac{1}{z^2} = \sum_{n < 0} n a_n z^{n-1}.$$

Poiché f_2' esiste f_2 è olomorfa. \square

Proposizione 6.11.3. Sia $f(z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n z^n$ una serie di Laurent. Supponiamo che:

- (i) $\sum_{n \geq 0} a_n z^n$ e $\sum_{n < 0} a_n z^{-n}$ assolutamente convergenti
- (ii) $\rho_2 < \rho_1$

Allora la somma $f(z)$ è olomorfa per $\rho_2 < |z| < \rho_1$ e la serie converge normalmente in $r_2 \leq |z| \leq r_1$ con $\rho_2 < r_2 < r_1 < \rho_1$.

Definizione 6.11.4. Diciamo che una funzione $f(z)$ definita sulla corona circolare $\rho_2 < r_2 < r_1 < \rho_1$ ha un'*espansione di Laurent* se esiste una serie di Laurent che converge in tale corona e tale che la sua somma sia uguale a f in ogni suo punto.

Osservazione 6.11.5. Se f ha un'espansione di Laurent, f è olomorfa nella corona.

Teorema 6.11.6. Sia $a \in \mathbb{C}$ e sia f olomorfa nella corona circolare

$$A = \{z \in \mathbb{C} : 0 < \rho_2 < |z - a| < \rho_1 < \infty\}.$$

Allora f ha un'espansione di Laurent, cioè esplicitamente per $z \in A$:

$$f(z) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} a_n (z - a)^n \text{ con } a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(w)}{(w - a)^{n+1}} dw$$

Dimostrazione. Senza perdita di generalità, prendiamo $a = 0$. Scegliamo $\rho_2 < r'_2 < r_2 < r_1 < \rho_1$, $\gamma_1(t) = r_1 e^{2\pi i t}$, $\gamma_2(t) = r_2 e^{2\pi i t}$. Sia $B = \{z : r'_2 \leq |z| \leq r'_1\}$, $r_2 \leq |z| \leq r_1$, e $r > 0$ tale che $\overline{B(z, r)} \subseteq \{w : r'_2 < |w| < r'_1\}$. Si prenda α parametrizzazione del bordo di $B(z, r)$, in senso antiorario. Si ha per ogni forma chiusa in $A \setminus B(z, r)$ ω che

$$\int_{\gamma_1} \omega - \int_{\gamma_2} \omega - \int_{\alpha} \omega = 0$$

Questo segue dal fatto che il loop $l_2 * \alpha_1 * l_1 * \gamma_2 * \bar{l}_1 * \alpha_2 * \bar{l}_2 * \bar{\gamma}_1$ è banale in $A \setminus \{0\}$.

Lungo γ_1 si ha che $|\gamma_1(t)| = r_1 > |z|$, per cui se $w = \gamma_1(t)$, si ha che:

$$\frac{f(w)}{w - z} = \frac{f(w)}{w(1 - z/w)} = \frac{f(w)}{w} \frac{1}{1 - z/w} = \frac{f(w)}{w} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z}{w}\right)^n = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n f(w)}{w^{n+1}}$$

La convergenza di tale serie nella corona tra r_2 e r_1 è normale, dunque uniforme, e si può scambiare serie e integrale in:

$$\int_{\gamma_1} \frac{f(w) dw}{z - w} = \int_{\gamma_1} \left(\sum_{n \geq 0} \frac{z^n f(w)}{w^{n+1}} \right) dw = \sum_{n \geq 0} z^n \int_{\gamma_1} \frac{f(w)}{w^{n+1}} dw = \sum_{n \geq 0} b_n z^n$$

$$\text{con } b_n = \int_{\gamma_1} \frac{f(w)}{w^{n+1}} dw.$$

Poichè essere liberamente omotopi su A è equivalente a esserlo su $\mathbb{C} \setminus \{0\}$, allora l'integrale di b_n si può anche fare su un qualunque loop γ liberamente omotopo a γ_1 .

Ripetendo il ragionamento su γ_2 (occhio a un segno nella serie geometrica!), si ottiene che

$$-\int_{\gamma_2} \frac{f(w) dw}{z-w} = \sum_{n<0} b_n z^n$$

$$\text{con } b_n = \int_{\gamma_2} \frac{f(w)}{w^{n+1}} dw = \int_{\gamma} \frac{f(w)}{w^{n+1}} dw.$$

Allora per la formula di Cauchy, si ha che

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\alpha} \frac{f(w)}{w-z} dw = \frac{1}{2\pi i} \left(\int_{\gamma_1} \frac{f(w)}{w-z} dw - \int_{\gamma_2} \frac{f(w)}{w-z} dw \right) = \frac{1}{2\pi i} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n z^n.$$

□

Corollario 6.11.7. Sia $A = \{\rho_2 < |z| < \rho_1\}$, $f : A \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa. Allora $f = f_1 + f_2$, con $f_1 : B(0, \rho_1) \rightarrow \mathbb{C}$ e $f_2 : \mathbb{C} \setminus B(0, \rho_2) \rightarrow \mathbb{C}$ e sono olomorfe. Richiedendo che $\lim_{|z| \rightarrow +\infty} |f_2(z)| = 0$, tale scrittura è unica.

Dimostrazione. Per l'esistenza, basta scrivere f come serie di Laurent e assegnare a f_1 e f_2 le somme sugli indici negativi e non negativi. Supponiamo che tale scomposizione si possa fare in due modi, con f_1 e f_2 , e dall'altra parte g_1 e g_2 . Definisco la funzione olomorfa $F : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ come $f_1 - g_1$ dentro la palla di raggio ρ_1 e come $g_2 - f_2$ fuori dalla palla di raggio ρ_2 . Tale funzione è ben definita in quanto le differenze sono uguali nella corona. Inoltre vale che $\lim_{|z| \rightarrow \infty} F(z) = 0$. Dunque F è limitata e per Liouville è costante. Dunque $f_1 = g_1$ e $f_2 = g_2$. □

Teorema 6.11.8. La serie di Laurent è unica.

Dimostrazione. Per semplicità sia $z_0 = 0$, $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con $D = \{z, \rho_2 < |z| < \rho_1\}$ con sviluppo $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n z^n$.

Fissiamo $k \in \mathbb{Z}$. Sia γ un loop in D con $I(\gamma, 0) = 1$ e calcoliamo

$$\int_{\gamma} \frac{f(z)}{z^{k+1}} dz = \int_{\gamma} \frac{\sum a_n z^n}{z^{k+1}} dz = \int_{\gamma} \left(\sum a_n z^{n-k-1} \right) dz = \sum a_n \int_{\gamma} z^{n-k-1} dz.$$

dove l'ultima uguaglianza è giustificata dalla convergenza uniforme della serie. Ora, $z^j dz$ è esatta su $\mathbb{C} \setminus \{0\}$ per $j \neq -1$, per cui se $n - k - 1 \neq -1$, si ha che

$$\int_{\gamma} z^{n-k-1} dz = 0 \quad \text{per } n \neq k.$$

Per cui

$$\int \frac{f(z)}{z^{k+1}} dz = a_k \int_{\gamma} \frac{1}{z} dz = 2\pi i a_k.$$

Per cui gli a_k sono univocamente determinati da f . □

Definizione 6.11.9. Data una palla B centrata in z_0 , $f : B \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con sviluppo di Laurent con coefficienti a_n , il residuo di f in z_0 è

$$\text{Res}(f, z_0) = a_{-1}$$

6.12 Singolarità

Teorema 6.12.1. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto, $f : D \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa, con $z_0 \in \mathbb{C}$. Allora f si estende a una funzione olomorfa $g : D \rightarrow \mathbb{C}$ se e solo se f è limitata in un intorno di z_0 .

Dimostrazione. Il (\Rightarrow) è facile, infatti se g è olomorfa, è continua, dunque localmente limitata. Per l'altra freccia, sia ε tale che $B = B(z_0, \varepsilon) \subseteq D$ e $|f(z)| \leq M$ per $z \in B \setminus \{z_0\}$. Sappiamo che f ha uno sviluppo in serie di Laurent su $B \setminus \{z_0\}$:

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

con $|a_n| \leq \frac{M(R)}{R^n} \leq \frac{M}{R^n}$, $R < \varepsilon$, $M(R) = \sup\{|f(z)| \text{ t.c. } |z - z_0| = R\}$. Se $n < 0$, $\lim_{R \rightarrow 0^+} M/R^n = 0$, per cui $a_n = 0$. Allora la serie di Laurent ha solo termini con esponente non negativo, quindi f si estende a tale funzione olomorfa. \square

Definizione 6.12.2. Nel caso descritto nel teorema precedente, z_0 si chiama singolarità *eliminabile* o *rimuovibile* di f . In caso contrario, si chiama *singolarità isolata*.

Definizione 6.12.3. Sia z_0 singolarità isolata di $f : D \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con sviluppo di Laurent $\sum a_n (z - z_0)^n$ in un piccolo disco puntato centrato in z_0 . Allora z_0 si dice:

- (i) *polo di ordine n_0* se $X = \{n < 0 \mid a_n \neq 0\}$ è finito e $n_0 = -\min(X)$;
- (ii) *singolarità essenziale* se X è infinito.

Osservazione 6.12.4. Il fatto che se $a_n \neq 0$ per qualche $n < 0$ allora la singolarità non è eliminabile può essere visto nel seguente modo: sia $g(z) = f(z)(z - z_0)^{|n_0|-1}$, $a_{n_0} \neq 0$, $n_0 < 0$. Se f fosse estendibile, lo sarebbe anche g . Se b_n è il coefficiente n -esimo dello sviluppo di Laurent di g , avremmo $b_{-1} = a_{n_0} \neq 0$. Ma

$$b_{-1} = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{g(w)}{(w - z_0)^{-1+1}} dw = 0$$

poiché g olomorfa anche in z_0 .

Proposizione 6.12.5. Sia z_0 una singolarità isolata di $f : D \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$, con D aperto, $z_0 \in D$, f olomorfa. Sono fatti equivalenti:

- (i) z_0 è un polo di ordine n_0 di f ;
- (ii) $f(z) = g(z)/(z - z_0)^{n_0}$, con g olomorfa su D e $g(z_0) \neq 0$.
- (iii) $1/f$ si estende a una funzione olomorfa $k : U \rightarrow \mathbb{C}$ in un intorno di z_0 , con z_0 zero di ordine n_0 per k .

Dimostrazione. ($i \Rightarrow ii$). Si ha che $f_z = \sum_{n \geq n_0} a_n (z - z_0)^n$ e $a_{-n_0} \neq 0$. Allora semplicemente si raccoglie il $(z - z_0)^{-n_0}$ e quello che rimane è una serie di potenze, cioè la nostra funzione olomorfa g .

($ii \Rightarrow iii$). In un intorno di z_0 , g non si annulla, quindi è ben definita e olomorfa $k = 1/f = (z - z_0)^{n_0}/g(z)$, che ha in z_0 uno zero di ordine n_0 .

($iii \Rightarrow i$). Se $k(z) = h(z)(z - z_0)^{n_0}$, $h(z_0) \neq 0$ in una palla bucata centrata in z_0 , si ha

$$f(z) = \frac{(z - z_0)^{-n_0}}{h(z)} = \sum_{n \geq -n_0} a_{n+n_0} (z - z_0)^n.$$

dove $1/h(z)$ è analitica. □

Definizione 6.12.6. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto. Una funzione meromorfa su D è una funzione olomorfa $f : D \setminus S \rightarrow \mathbb{C}$, dove S è un insieme discreto (e chiuso in D) e per ogni $z_0 \in S$, f ha un polo in z_0 .

Esercizio 6.12.7. Rapporti di funzioni olomorfe sono meromorfi.

Teorema 6.12.8. (di Weierstrass). Sia z_0 una singolarità essenziale per $f : D \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$. Allora per ogni intorno $U \subseteq D$ di z_0 , l'insieme $f(U \setminus \{z_0\})$ è denso in \mathbb{C} .

Dimostrazione. Per assurdo, se $f(U \setminus \{z_0\})$ non è denso, esiste un complesso a con $B(a, R) \cap f(U \setminus \{z_0\}) = \emptyset$, $R > 0$.

Sia $g : U \setminus \{z_0\} \rightarrow \mathbb{C}$, $g(z) = \frac{1}{f(z) - a}$. Si ha dunque $|g(z)| \leq 1/R$, per $z \in U$. Allora z_0 è una singolarità eliminabile per g , che si estende dunque ad una funzione olomorfa (che denotiamo comunque con g) su U . Ma allora f avrebbe un polo in z_0 , che è contro le ipotesi. □

Osservazione 6.12.9. Se una funzione ha una singolarità essenziale in z_0 , allora non ammette limite per $z \rightarrow z_0$.

6.12.1 Teorema dei Residui

Definizione 6.12.10. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ chiuso con parte interna non vuota, e sia $\Gamma = \partial D$. Diciamo che D ha bordo C^1 a tratti se per ogni componente connessa Γ_i di Γ , esiste una curva in Γ_i che sia C^1 a tratti, surgettiva e iniettiva eccetto al più che negli estremi.

Le componenti di bordo di un tale D si possono orientare canonicamente come segue: diciamo che $\gamma : J \rightarrow \Gamma_i$ con J intervallo reale è positiva se per tutti i t_0 per cui $\gamma'(t_0)$ è definita, il vettore $-i\gamma'(t_0)$ punta all'esterno di D in $\gamma(t_0)$. Il significato di "punta all'esterno" a livello intuitivo è chiaro, a livello formale un vettore v punta all'esterno di D in $z_0 \in \partial D$ se esiste un $\varepsilon > 0$ tale che $\{t \in (-\varepsilon, \varepsilon) : z_0 + tv \in D\} = (\varepsilon, 0]$. In questi casi, se $R \subseteq D$ è un dominio con bordo C^1 , $\Gamma = \partial R \Gamma_1 \cup \dots \cup \Gamma_k$, con parametrizzazioni positive $\gamma_i : J_i \rightarrow \Gamma_i$, e ω è una 1-forma su D , poniamo

$$\int_{\partial R} \omega = \sum_{i=1}^k \int_{\gamma_i} \omega$$

Teorema 6.12.11. Sia $D \subseteq \mathbb{C}$ aperto, $f : D \setminus S \rightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con S chiuso e discreto in D . Sia $R \subseteq D$ compatto e con bordo C^1 atratti, per cui $R \cap S = \{z_1, \dots, z_k\}$ è finito, $\partial R \cap S \neq \emptyset$. Allora

$$\int_{\partial R} f(z) dz = 2\pi i \sum_{i=1}^k \text{Res}(f, z_i)$$

Dimostrazione. Limitiamoci al caso in cui R è omeomorfo a un disco, il caso generale è simile ma non verrà mai usato nelle applicazioni, per cui non viene dimostrato. Abbiamo dunque f olomorfa in $D \setminus S$ con $R \cap S = \{z_1, \dots, z_k\}$ singolarità isolate. Sia $\gamma = \partial R$ (percorso in senso antiorario) e $\beta = \gamma * l_k * \bar{\alpha}_k * \bar{l}_k * l_{k-1} * \bar{\alpha}_{k-1} * \bar{l}_{k-1} * \dots * l_1 * \bar{\alpha}_1 * \bar{l}_1$, dove α_i è una piccola circonferenza intorno a z_i percorsa in senso antiorario e gli l_i sono tratti che uniscono un punto di γ a gli α_i . È possibile scegliere gli α_i e l_i di modo che β sia omotopicamente banale in $R \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$. Poiché f è olomorfa su $R \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$, $f(z) dz$ è chiusa su $R \setminus \{z_1, \dots, z_k\}$ e poiché β è banale

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{\beta} f(z) dz = \int_{\gamma} f(z) dz + \sum_{i=1}^k \left(\int_{\bar{l}_i} f(z) dz + \int_{\bar{\alpha}_i} f(z) dz + \int_{l_i} f(z) dz \right) = \\ &= \int_{\gamma} f(z) dz + \sum_{i=1}^k \int_{\bar{\alpha}_i} f(z) dz. \text{ Dunque } \int_{\gamma} f(z) dz = - \sum_{i=1}^k \int_{\bar{\alpha}_i} f(z) dz = \\ &= \sum_{i=1}^k \int_{\alpha_i} f(z) dz = 2\pi i \sum_{i=1}^k \text{Res}(f, z_i). \quad \square \end{aligned}$$

Vediamo ora come effettuare il calcolo dei residui. Se z_0 è un polo semplice di f , allora $f(z) = \frac{a_{-1}}{z - z_0} + \sum_{n \geq 0} a_n (z - z_0)^n$, per cui $(z - z_0)f(z) = a_{-1} + \sum_{n \geq 0} a_n (z - z_0)^{n+1}$ e $\text{Res}(f, z_0) = a_{-1} = \lim_{z \rightarrow z_0} (z - z_0)f(z)$. Dunque, se $f =$

p/q , p, q olomorfe, $p(z_0) \neq 0$ e z_0 è uno zero semplice di q , si ha $\text{Res}(f, z_0) = \lim_{z \rightarrow z_0} \frac{(z - z_0)p(z)}{q(z)} = \frac{p(z_0)}{q'(z_0)}$ in quanto $q(z) = q(z) - q(z_0)$.

Esempio 6.12.12. $f(z) = \frac{e^{iz}}{z^2 + 1}$ ha singolarità in $z = \pm i$, che sono poli semplici in quanto zeri semplici di $z^2 + 1$. Dunque $\text{Res}(f, i) = \frac{e^{iz}}{2z} \Big|_{z=i} = -\frac{i}{2e}$,
 $\text{Res}(f, -i) = \frac{e^{iz}}{2z} \Big|_{z=-i} = \frac{ie}{2}$.


Per i poli di ordine superiore una strategia possibile è la seguente: se f ha un polo di ordine k in z_0 , si pone $g(z) = (z - z_0)^k f(z)$, che si estende a una funzione olomorfa anche in z_0 . $f(z) = a_{-k}(z - z_0)^{-k} + \dots + a_{-1}(z - z_0)^{-1} + \sum_{n \geq 0} a_n(z - z_0)^n \Rightarrow g(z) = a_{-k} + a_{-k+1}(z - z_0) + a_{-k+2}(z - z_0)^2 + \dots + a_{-1}(z - z_0)^{k-1} + \dots$
 $\Rightarrow \text{Res}(f, z_0) = a_{-1} = \frac{g^{(k-1)}(z_0)}{(k-1)!}$.

Esempio 6.12.13. $f(z) = \frac{e^{iz}}{z(z^2 + 1)^2}$ ha un polo semplice in 0 e due poli doppi in $\pm i$. Calcoliamo il residuo in i : $g(z) = (z - i)^2 f(z) = \frac{e^{iz}}{z(z + i)^2}$. $g^{(k-1)}(z) = g'(z) = \frac{ize^{iz}(z + i) - e^{iz}((z + i) + 2z)}{z^3(z + i)^3}$, dunque $\text{Res}(f, i) = \frac{g'(i)}{1!} = -\frac{3}{4e}$.

Vediamo ora alcune applicazioni utili del teorema dei residui. Verrà riportata la prima come esempio e le altre saranno lasciate come esercizio (eventualmente con qualche aiuto se ci sono degli inghippi a cui stare attenti) perché l'approccio è sostanzialmente identico.

Esempio 6.12.14. Calcolare $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos x}{x^2 + 1} dx = \lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{-R}^R \frac{\cos x}{x^2 + 1} dx$. Per $x \in \mathbb{R}$, $\frac{\cos x}{x^2 + 1} = \Re \left(\frac{e^{ix}}{x^2 + 1} \right)$. La funzione $\frac{e^{iz}}{z^2 + 1}$ ha poli semplici in $\pm i$. Sia $\Omega_R = \{z \mid |z| \leq R, \Im(z) \geq 0\}$, $R > 1$. Una parametrizzazione di $\partial\Omega_R$ è $\gamma_R = \alpha_R * \beta_R$ dove $\alpha_R : [-R, R] \rightarrow \mathbb{C}, \alpha_R(t) = t$ e $\beta_R : [0, \pi] \rightarrow \mathbb{C}, \beta_R(t) = Re^{it}$. Per il teorema dei residui, se $f(z) = \frac{e^{iz}}{z^2 + 1}$, $\int_{\alpha_R} f(z) dz + \int_{\beta_R} f(z) dz = \int_{\partial\Omega_R} f(z) dz = 2\pi i \text{Res}(f, i) = 2\pi i \left(-\frac{i}{2e} \right) = \frac{\pi}{e}$. Osserviamo che $\int_{\alpha_R} f(z) dz = \int_{-R}^R f(\alpha(t)) \alpha'(t) dt = \int_{-R}^R f(t) dt = \int_{-R}^R \frac{\cos t + i \sin t}{t^2 + 1} dt$, la cui parte reale è l'integrale richiesto (prima di passare al limite). Dunque $\int_{-R}^R \frac{\cos t}{1 + t^2} dt = \Re \left(\int_{\alpha_R} f(z) dz \right) = \Re \left(\int_{\partial\Omega_R} f(z) dz - \int_{\beta_R} f(z) dz \right) = \frac{\pi}{e} - \Re \left(\int_{\beta_R} f(z) dz \right)$. Adesso mostriamo che $\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{\beta_R} f(z) dz = 0$, da

cui $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\cos t}{1+t^2} dt = \frac{\pi}{e}$. $\beta_R(t) = Re^{it} = R(\cos t + i \sin t)$, per cui $e^{i\beta_R(t)} = e^{iR(\cos t + i \sin t)} = e^{iR \cos t} \cdot e^{-R \sin t}$, il cui modulo è $e^{-R \sin t}$, dunque $|f(\beta_R(t))\beta'_R(t)| = \left| \frac{e^{i\beta_R(t)}}{\beta_R(t)^2 + 1} iRe^{it} \right| = \frac{Re^{-R \sin t}}{|R^2 e^{2it} + 1|} \leq \frac{R}{|R^2 e^{2it}| - 1} = \frac{R}{R^2 - 1}$, per cui $\left| \int_{\beta_R} f(z) dz \right| = \left| \int_0^\pi f(\beta_R(t))\beta'_R(t) dt \right| \leq \int_0^\pi \frac{R}{R^2 - 1} dt = \frac{R\pi}{R^2 - 1} \rightarrow 0$ per $R \rightarrow +\infty$, come voluto.

Attenzione: per "complessificare" $\frac{\cos x}{x^2 + 1}$ si sarebbe potuto prendere $\frac{\cos z}{z^2 + 1}$. Il problema è che $\left| \frac{\cos z}{z^2 + 1} \right|$ non è stimabile facilmente lungo β_R , per cui $\int_{\beta_R} \frac{\cos z}{z^2 + 1} dz \not\rightarrow 0$ per $R \rightarrow +\infty$ ($\cos(it) = \cosh t$). Dunque meglio la scelta fatta di prendere $\cos t = \Re(e^{it})$. 

In modo analogo si calcola $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{P(x)}{Q(x)} dx$ dove P, Q sono polinomi, $Q(x) \neq 0$ per ogni $x \in \mathbb{R}$ e $\deg Q \geq \deg P + 2$.

Esercizio 6.12.15. Calcolare $\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{1+x^4} dx$.

Esercizio 6.12.16. Calcolare $\int_0^{+\infty} \frac{1}{1+x^n} dx$, $n \geq 2$. Hint: se n è pari si può svolgere come l'esercizio precedente, se n è dispari c'è un polo in $z_0 = -1$ che dà fastidio. Considerare allora $D_R = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| \leq R, 0 \leq \arg z \leq 2\pi/n\}$. In questo caso, l'unico polo di cui preoccuparsi è $z_0 = e^{i\frac{\pi}{n}}$.


Per svolgere il prossimo esercizio servono i seguenti due lemmi.

Lemma 6.12.17. Sia f meromorfa con polo semplice in 0 e sia $\gamma_\varepsilon : [0, \pi] \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0\}$, $\gamma_\varepsilon(t) = \varepsilon \cdot e^{it}$, $\varepsilon > 0$. Allora $\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \int_{\gamma_\varepsilon} f(z) dz = \pi i \text{Res}(f, 0)$.

Dimostrazione. $f(z) = \frac{a_{-1}}{z} + g(z)$, g olomorfa in un intorno di 0 con primitiva G . Allora $\int_{\gamma_\varepsilon} f(z) dz = \int_{\gamma_\varepsilon} \frac{a_{-1}}{z} dz + \int_{\gamma_\varepsilon} g(z) dz = \pi i a_{-1} + G(\gamma_\varepsilon(\pi)) - G(\gamma_\varepsilon(0))$. È chiaro che $G(\gamma_\varepsilon(\pi)) - G(\gamma_\varepsilon(0)) \rightarrow G(0) - G(0) = 0$ per $\varepsilon \rightarrow 0$, da cui segue la tesi. \square

Lemma 6.12.18. Sia f meromorfa su \mathbb{C} con la seguente proprietà: detto $M(R) = \max\{|f(z)| \mid |z| = R, \Im(z) \geq 0\}$, $\lim_{R \rightarrow +\infty} M(R) = 0$. Allora, se $\gamma_R(y) = Re^{it}$, $t \in [0, \pi]$, si ha $\lim_{R \rightarrow +\infty} \int_{\gamma_R} f(z) e^{iz} dz = 0$.

Dimostrazione. Se $z = \gamma_R(t) = R \cos t + iR \sin t$, $e^{iz} = e^{iR \cos t} \cdot e^{i^2 R \sin t} = e^{iR \cos t} \cdot e^{-R \sin t}$, da cui $|e^{iz}| = e^{-R \sin t}$. Dunque $\left| \int_{\gamma_R} f(z) e^{iz} dz \right| \leq \int_0^\pi |f(\gamma_R(t))| \cdot e^{i\gamma_R(t)} \cdot \gamma_R'(t) dt = \int_0^\pi |f(\gamma_R(t))| \cdot |e^{i\gamma_R(t)}| \cdot |Rie^{it}| dt \leq \int_0^\pi M(R) \cdot e^{-R \sin t} \cdot R dt = M(R) \int_0^\pi e^{-R \sin t} \cdot R dt$. Per concludere basta vedere che l'ultimo integrale è limitato indipendentemente da R . Ora, su $[0, \pi/2]$ la funzione $\frac{\sin t}{t}$ è limitata dal basso da una costante positiva K (in quanto si estende con continuità in 0 a una funzione strettamente positiva e $[0, \pi/2]$ è compatto. Allora $\int_0^\pi R e^{-R \sin t} dt = 2 \int_0^{\pi/2} R e^{-R \sin t} dt = 2R \int_0^{\pi/2} e^{-R \frac{\sin t}{t} \cdot t} dt \leq 2R \int_0^{\pi/2} e^{-RKt} dt = 2R \left[-\frac{e^{-RKt}}{RK} \right]_0^{\pi/2} = \frac{2}{K} [-e^{-RK\pi/2} + 1] \leq 2/K$. \square

Attenzione: se non ci fosse il termine e^{iz} servirebbe $\lim_{R \rightarrow +\infty} RM(R) = 0$; quel fattore oscillante rende sufficiente la condizione più debole. 

Esercizio 6.12.19. Calcolare $\int_0^{+\infty} \frac{\sin x}{x} dx$ dove estendiamo $\frac{\sin x}{x}$ in 0 ponendola uguale a 1. Hint: integrare lungo il bordo della semicorona circolare $C_R = \{z \mid \Im(z) \geq 0, 1/R \leq |z| \leq R\}$.

Vediamo ora un'applicazione più teorica del teorema dei residui: la derivata logaritmica.

Definizione 6.12.20. Sia f meromorfa su un aperto $\Omega \subseteq \mathbb{C}$ e sia z_0 uno zero o un polo di f , per cui $f(z) = (z - z_0)^k g(z)$, $g(z_0) \neq 0, k \neq 0$. La DERIVATA LOGARITMICA DI f è $\frac{f'}{f}$ (si chiama così perché $d(\log f(z)) = \frac{f'(z)}{f(z)} dz$).

La derivata logaritmica è olomorfa eccetto al più nei poli o negli zeri di f . Vediamo come si comporta vicino a z_0 . Si ha $f'(z) = k(z - z_0)^{k-1} g(z) + (z - z_0)^k g'(z) \Rightarrow \frac{f'(z)}{f(z)} = \frac{k}{z - z_0} + \frac{g'(z)}{g(z)}$. g'/g è olomorfa vicino a z_0 , perciò f'/f ha un polo semplice in z_0 e $\text{Res}(f'/f, z_0) = k$.

Corollario 6.12.21. Sia f meromorfa su Ω , e sia $R \subseteq \Omega$ una regione compatta con bordo C^1 a tratti. Allora R contiene un numero finito di zeri e poli di f (discreti in un compatto) e supponiamo che nessuno di essi sia in ∂R , Allora $\int_{\partial R} \frac{f'(z)}{f(z)} dz = 2\pi i(Z - P)$ dove Z è il numero di zeri contati con molteplicità e P è il numero di poli contati con molteplicità.

Dimostrazione. Segue dal teorema dei residui e dal conto appena fatto. \square

Teorema 6.12.22. (Rouché) Sia $f : \Omega \longrightarrow \mathbb{C}$ olomorfa e $R \subseteq \Omega$ compatta con bordo C^1 a tratti. Sia $g : \Omega \longrightarrow \mathbb{C}$ olomorfa con $|g(z)| < |f(z)|$ per ogni $z \in \partial R$. Allora f e $f + g$ hanno lo stesso numero di zeri (contati con molteplicità) in R .

Dimostrazione. Da $|g(z)| < |f(z)|$ per ogni $z \in \partial R$ si deduce che f , e più in generale $h_t = f + tg$, $t \in [0, 1]$, non si annulla su ∂R . Inoltre per ogni $t \in [0, 1]$ h_t è olomorfa. Applicando il corollario 6.12.21 a h_t otteniamo che, se Z_t è il numero di zeri di h_t , $Z_t = \frac{1}{2\pi i} \int_{\partial R} \frac{h'_t}{h_t}(z) dz$. Al variare di t , il membro di destra varia in maniera continua, mentre quello di sinistra è un intero, perciò Z_t è costante $\Rightarrow Z_0 = Z_1$, che è la tesi. \square

Ecco dunque un'altra dimostrazione di una nostra vecchia conoscenza.

Teorema 6.12.23. (Teorema fondamentale dell'algebra [con stima sul modulo delle radici]) Sia $p(z) = z^n + a_{n-1}z^{n-1} + \dots + a_1z + a_0$, $a_i \in \mathbb{C}$, $n \geq 1$. Se $M = \max\{|a_i|\}$, allora p ammette n radici (contate con molteplicità) nel disco di raggio $M + 1$ centrato nell'origine.

Dimostrazione. Sia $g(z) = p(z) - z^n = \sum_{i=0}^{n-1} a_i z^i$. Allora per $|z| = M + 1$ $|g(z)| = \left| \sum_{i=0}^{n-1} a_i z^i \right| \leq \sum_{i=0}^{n-1} |a_i| |z|^i \leq M \sum_{i=0}^{n-1} |z|^i = M \frac{|z|^n - 1}{|z| - 1} = |z|^n - 1 < |z^n|$. Allora possiamo applicare il teorema di Rouché a $g(z)$ e $f(z) = z^n$ per ottenere la tesi visto che z^n ha chiaramente un unico zero, 0, con molteplicità n . \square

7 Di nuovo spazi proiettivi

7.1 Mutua posizione

Si ricordino le definizioni viste nel capitolo 5. Useremo senza specificarla ogni volta la convenzione $\dim V = n + 1$.

Definizione 7.1.1. Sia $\{e_0, \dots, e_n\}$ una base di V . Diremo che $\{e_0, \dots, e_n\}$ è un RIFERIMENTO PROIETTIVO.

Notazione: indichiamo un punto come $P = [x_0, \dots, x_n]$. $F_0 = [e_0], F_1 = [e_1], \dots, F_n = [e_n]$ sono i cosiddetti *punti fondamentali* rispetto al riferimento proiettivo fissato. $U = [e_0 + \dots + e_n]$ è il *punto unità* rispetto al riferimento proiettivo fissato.

Osservazione 7.1.2. Le coordinate omogenee, viste nel capitolo 5, non sono uniche, ma sono determinate a meno di moltiplicare per uno scalare non nullo. Per riferimenti proiettivi che si ottengono l'uno dall'altro moltiplicando per uno scalare non nullo, il sistema di coordinate omogenee è lo stesso.

In $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$, chiamiamo *riferimento proiettivo standard* quello dato dalla base canonica di \mathbb{K}^{n+1} . Se $P = [x_0, \dots, x_n] \in \mathbb{P}^n(\mathbb{K})$, chiamiamo x_0, \dots, x_n le *coordinate proiettive standard* di P .

Definizione 7.1.3. Sia W un sottospazio vettoriale di V . Chiamiamo $\mathbb{P}(W)$ il SOTTOSPAZIO PROIETTIVO di $\mathbb{P}(V)$ associato a W .

Osservazione 7.1.4. $\text{codim } \mathbb{P}(V) = \dim \mathbb{P}(V) - \dim \mathbb{P}(W) = (\dim V - 1) - (\dim W - 1) = \dim V - \dim W = \text{codim } W$.

Definizione 7.1.5. Chiamiamo *iperpiani* di $\mathbb{P}(V)$ i sottospazi di codimensione 1.

Osservazione 7.1.6. Sia $\{e_0, \dots, e_n\}$ una base di V . Siano $a_0, a_1, \dots, a_n \in \mathbb{K}$ con $(a_0, \dots, a_n) \neq (0, \dots, 0)$. Consideriamo l'equazione lineare omogenea $a_0 X_0 + \dots + a_n X_n = 0$ (*). Essa definisce un sottospazio vettoriale W di V , che è un iperpiano vettoriale in V . Notiamo che i punti $P = [v] \in \mathbb{P}(V)$ le cui coordinate omogenee soddisfano (*) sono esattamente quelli per cui $v \in W$, quindi (*) è l'equazione dell'iperpiano $\mathbb{P}(W)$.

Esercizio 7.1.7. Consideriamo i seguenti punti di $\mathbb{P}^2(\mathbb{R})$: $P = [1/2, 1, 1], Q = [1, 1/3, 4/3], R = [2, -1, 2]$. Domanda: esiste una retta proiettiva che li contiene?

Soluzione Poniamo $v = (1/2, 1, 1), w = (1, 1/3, 4/3)$. Chiaramente non esiste $\lambda \in \mathbb{R}^*$ t.c. $v = \lambda w$, quindi $P \neq W$. Inoltre, v e w sono linearmente indipendenti, quindi $W = \text{span}\{v, w\}$ è un sottospazio vettoriale di V di dimensione 2, e $[v], [w] \in \mathbb{P}(W)$, che è una retta in quanto a dimensione $\dim W - 1 = 1$. Quindi resta solo da verificare se $R \in \mathbb{P}(W)$. In generale, $[x_0, x_1, x_2] \in \mathbb{P}(W)$

se e solo se $0 \neq (x_0, x_1, x_2) \in W$, cioè $(x_0, x_1, x_2), v, w$ devono essere linearmente dipendenti. La condizione è dunque $\det \begin{pmatrix} x_0 & 1/2 & 1 \\ x_1 & 1 & 1/3 \\ x_2 & 1 & 4/3 \end{pmatrix} = 0$, quindi $x_0 + x_1/3 - 5x_2/6 = 0$. Verificare che le coordinate di R soddisfino l'equazione.

Notazione: sia $i \in \{0, 1, \dots, n\}$; chiamiamo *i-esimo iperpiano coordinato* H_i di $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ l'iperpiano definito dall'equazione $X_i = 0$. Più in generale, data una matrice $A \in M(t \times (n+1), \mathbb{K})$ possiamo definire un sistema lineare omogeneo

$$A \begin{pmatrix} X_0 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} = 0 \quad (**). \quad \text{Sono le equazioni cartesiane nella base } \{e_0, \dots, e_n\} \text{ di}$$

un sottospazio vettoriale W di V . Ragionando come nell'osservazione 7.1.6 otteniamo che sono le stesse equazioni cartesiane del sottospazio proiettivo $\mathbb{P}(W) \subset \mathbb{P}(V)$ nel riferimento proiettivo $\{e_0, \dots, e_n\}$.

Attenzione: un sottospazio proiettivo $\mathbb{P}(W)$ non ammette un unico sistema di equazioni cartesiane.



Osservazione 7.1.8. $\text{rk } A = r \Rightarrow \dim W = \dim V - r \Rightarrow \dim \mathbb{P}(W) = \dim \mathbb{P}(V) - r$.

Lemma 7.1.9. Siano $\mathbb{P}(W_1)$ e $\mathbb{P}(W_2)$ due sottospazi proiettivi di $\mathbb{P}(V)$. Allora $\mathbb{P}(W_1) \cap \mathbb{P}(W_2) = \mathbb{P}(W_1 \cap W_2)$.

Dimostrazione. Poiché le equazioni che definiscono i sottospazi proiettivi sono le stesse che definiscono i sottospazi vettoriali corrispondenti, l'affermazione è ovvia. In particolare, se A_1 e A_2 sono le matrici che danno le equazioni che definiscono i sottospazi in origine, il sottospazio intersezione è definito dalle equazioni date dalla matrice a blocchi $A = \begin{pmatrix} A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}$. \square

Esercizio 7.1.10. In $\mathbb{P}^2(\mathbb{C})$ consideriamo le rette $r_1 : ax_1 - x_2 + 3ix_0 = 0, r_2 : -iax_0 + x_1 - ix_2 = 0, r_3 : 3ix_2 + 5x_0 + x_1 = 0$. Calcolare $r_1 \cap r_2 \cap r_3$ al variare di $a \in \mathbb{C}$.

Soluzione Ragionando come nella dimostrazione del lemma 7.1.9, l'equazione

$$\text{che definisce l'intersezione delle tre rette è } \begin{pmatrix} 3i & a & -1 \\ -ia & 1 & -i \\ 5 & 1 & 3i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = 0. \quad \text{Dato}$$

che siamo nello spazio proiettivo, cerchiamo soluzioni non banali, che esistono se e solo se il determinante della matrice ottenuta è 0. L'equazione che si ottiene è $3a^2 + 4ai + 7 = 0$, che ha come radici i e $-7i/3$. Per quei due valori la matrice ha rango 2 (si veda il minore $\begin{pmatrix} 1 & -i \\ 1 & 3i \end{pmatrix}$), quindi l'intersezione ha dimensione

$2 - 2 = 0$, cioè è un punto, e sostituendoli si possono cercarne le coordinate omogenee. In tutti gli altri casi la matrice ha rango 3, dunque l'intersezione ha dimensione $2 - 3 = -1$, cioè è l'insieme vuoto.

Definizione 7.1.11. Diciamo che due sottospazi $\mathbb{P}(W_1), \mathbb{P}(W_2)$ di $\mathbb{P}(V)$ sono INCIDENTI se $\mathbb{P}(W_1) \cap \mathbb{P}(W_2) \neq \emptyset$, SGHEMBI altrimenti.

Osservazione 7.1.12.

(i) Se $\{W_i\}_{i \in I}$ è una famiglia di sottospazi vettoriali di V , allora $\bigcap_{i \in I} \mathbb{P}(W_i) =$

$$\mathbb{P}\left(\bigcap_{i \in I} W_i\right).$$

(ii) Sia J un sottoinsieme non vuoto di $\mathbb{P}(V)$ e sia

$$\mathfrak{F} = \{\mathbb{P}(W) \subset \mathbb{P}(V) \mid J \subset \mathbb{P}(W)\}$$

cioè \mathfrak{F} è la famiglia di tutti i sottospazi proiettivi che contengono J . Allora associamo il sottospazio proiettivo associato a J :

$$L(J) = \bigcap_{\mathbb{P}(W) \in \mathfrak{F}} \mathbb{P}(W)$$

cioè $L(J)$ è il più piccolo sottospazio proiettivo di $\mathbb{P}(V)$ che contiene J .

(iii) Per $S \subseteq \mathbb{P}(V)$:

$$L(S) = S \Leftrightarrow S = \mathbb{P}(T) \text{ per } T \text{ sottospazio vettoriale } \subset V$$

(iv) **Notazione:** Se $J = \{P_1, \dots, P_t\}$ è un insieme finito di punti, scriviamo

$$L(J) = L(P_1, \dots, P_t)$$

(v) Sia $P_i = [v_i]$ per $i = 1, \dots, t$. Allora $L(P_1, \dots, P_t) = \mathbb{P}(\langle v_1, \dots, v_t \rangle) \Rightarrow \dim \langle v_1, \dots, v_t \rangle \leq t \Rightarrow \dim L(P_1, \dots, P_t) \leq t - 1$.

Definizione 7.1.13. Assumiamo come prima che $P_i = [v_i]$ per $i = 1, \dots, t$. Allora diciamo che i punti P_1, \dots, P_t sono linearmente indipendenti se i vettori v_1, \dots, v_t sono linearmente indipendenti (cioè se $\dim L(P_1, \dots, P_t) = t - 1$).

Osservazione 7.1.14.

- (i) Siano $P = [v]$, $Q = [w]$ due punti di $\mathbb{P}(V)$. Allora P e Q sono linearmente indipendenti se e solo se sono distinti. Infatti $P = [v] \neq Q = [w] \Leftrightarrow \exists \lambda \in \mathbb{K}^*$ tale che $w = \lambda v \Leftrightarrow \{v, w\}$ sono linearmente indipendenti.
- (ii) Se $P \neq Q \Leftrightarrow L(P, Q)$ è una retta allora dati due punti distinti P, Q per essi passa una e una sola retta, cioè $L(P, Q)$.
- (iii) Siano $P, Q, R \in \mathbb{P}(V)$ distinti. Allora P, Q, R sono linearmente indipendenti \Leftrightarrow non sono allineati. In questo caso $L(P, Q, R)$ è un piano, ed è l'unico piano che contiene P, Q, R .

Esempio 7.1.15. In $\mathbb{P}^2(\mathbb{R})$ siano $P = [\frac{1}{2}, 1, 1]$, $Q = [1, \frac{1}{3}, \frac{4}{3}]$, $R = [2, 1, -2]$. Allora P, Q, R sono allineati.

Osservazione 7.1.16. $P_1, \dots, P_t \in \mathbb{P}(V)$. Se P_1, \dots, P_t sono linearmente indipendenti allora $t \leq \dim V = n + 1$.

Definizione 7.1.17. Siano $P_1, \dots, P_t \in \mathbb{P}(V)$ punti. Diciamo che essi sono in POSIZIONE GENERALE se:

- Caso $t \leq n + 1$: essi sono linearmente indipendenti
- Caso $t > n + 1$: per ogni possibile scelta di $n + 1$ punti tra essi, otteniamo un sottoinsieme costituito da punti linearmente indipendenti

Osservazione 7.1.18. Se P_1, \dots, P_t sono in posizione generale e $t > n + 1$, allora $L(P_1, \dots, P_t) = \mathbb{P}(V)$.

Esempio 7.1.19. Sia e_0, \dots, e_n un riferimento proiettivo di $\mathbb{P}(V)$. Allora $F_0 = [e_0], F_1 = [e_1], \dots, F_n = [e_n], U = [e_0 + \dots + e_n]$ sono in posizione generale.

Lemma 7.1.20. Sia V uno spazio vettoriale di dimensione $n + 1$. Siano $P_0, \dots, P_{n+1} \in \mathbb{P}(V)$ punti in posizione generale. Allora $\{P_0, \dots, P_{n+1}\}$ definisce un riferimento proiettivo e_0, \dots, e_n per cui P_0, \dots, P_n sono i suoi punti fondamentali e P_{n+1} è il suo punto unità.

Dimostrazione. Assumiamo che $P_i = [v_i]$ per $i = 0, \dots, n + 1$. Per ipotesi v_0, \dots, v_n sono vettori linearmente indipendenti. Di conseguenza $\exists a_0, \dots, a_n \in \mathbb{K}$ tali che:

$$v_{n+1} = a_0 v_0 + \dots + a_n v_n$$

Osserviamo che $a_i \neq 0 \forall i = 0, \dots, n$ perché i punti P_0, \dots, P_{n+1} sono in posizione generale. Se ad esempio si ha $a_0 = 0$, allora avremmo che $\{v_{n+1}, v_1, \dots, v_n\}$ è un insieme costituito da vettori linearmente dipendenti, e dunque P_{n+1}, P_1, \dots, P_n sono linearmente dipendenti, da cui si ha una contraddizione.

Definiamo il riferimento proiettivo associato a P_0, \dots, P_{n+1} :

$$e_0 = a_0 v_0, e_1 = a_1 v_1, \dots, e_n = a_n v_n \Rightarrow v_{n+1} = e_0 + \dots + e_n$$

Allora concludiamo:

$$P_i = [v_i] = [a_i v_i] = [e_i] \forall i \Rightarrow P_{n+1} = [v_{n+1}] = [e_0 + \dots + e_n]$$

□

Esempio 7.1.21. Consideriamo i seguenti punti in $\mathbb{P}^3(\mathbb{R})$:

$$P_1 = [1, 0, 1, 2], \quad P_2 = [0, 1, 1, 1], \quad P_3 = [2, 1, 2, 2], \quad P_4 = [1, 1, 2, 3]$$

Abbiamo che $t = \#\{P_1, P_2, P_3, P_4\} = 4 = \dim V$. Allora P_1, \dots, P_4 sono in posizione generale se e solo se sono linearmente indipendenti.

Esercizio 7.1.22. Verificare se P_1, \dots, P_4 sono linearmente indipendenti e calcolare $\dim L(P_1, P_2, P_3, P_4)$.

Osservazione 7.1.23. Visto che ogni sottospazio vettoriale W di V ammette una base, abbiamo che $\mathbb{P}(W) = L(P_1, \dots, P_t)$, dove $P_i = [v_i]$ per $i = 0, \dots, t$ e v_1, \dots, v_t è una base di W . Allora, come prima, sia $\dim V = n + 1$, e fissiamo un sottospazio vettoriale W di V di dimensione $k + 1$. Siano $P_0 = [v_0], \dots, P_k = [v_k] \in \mathbb{P}(W)$ in posizione generale, dunque v_0, \dots, v_k formano una base di W . Di conseguenza, per ogni punto $P = [v] \in \mathbb{P}(W)$, abbiamo che $v = \lambda_0 v_0 + \dots + \lambda_k v_k$ per certi $\lambda_0, \dots, \lambda_k \in \mathbb{K}$. Fissiamo adesso un riferimento proiettivo e_0, \dots, e_n di $\mathbb{P}(V)$. Allora:

$$P = [x_0, \dots, x_n], \quad P_i = [y_{i0}, \dots, y_{in}]$$

Per $i = 0, \dots, k$. Possiamo dunque riscrivere $v = \lambda_0 v_0 + \dots + \lambda_k v_k$ nella forma:

$$\begin{aligned} x_0 &= \lambda_0 y_{00} + \lambda_1 y_{10} + \dots + \lambda_k y_{k0} \\ x_1 &= \lambda_0 y_{01} + \lambda_1 y_{11} + \dots + \lambda_k y_{k1} \\ &\vdots \\ x_n &= \lambda_0 y_{0n} + \lambda_1 y_{1n} + \dots + \lambda_k y_{kn} \end{aligned}$$

Definizione 7.1.24. Siano S_1 e S_2 sottospazi proiettivi di $\mathbb{P}(V)$. Allora chiamiamo SOTTOSPAZIO SOMMA di S_1 e S_2 il sottospazio proiettivo

$$L(S_1, S_2) = L(S_1 \cup S_2)$$

Lemma 7.1.25. Se $S_1 = \mathbb{P}(W_1)$ e $S_2 = \mathbb{P}(W_2)$ allora $L(S_1, S_2) = L(S_1 \cup S_2) = \mathbb{P}(W_1 + W_2)$.

Dimostrazione. Sia $L(S_1, S_2) = \mathbb{P}(W)$ per un qualche W sottospazio vettoriale di V . Per definizione, $L(S_1, S_2)$ è il più piccolo sottospazio proiettivo che contiene S_1 e S_2 . Allora abbiamo che

$$\begin{aligned} S_1 \subset L(S_1, S_2) &\Rightarrow W_1 \subset W \\ S_2 \subset L(S_1, S_2) &\Rightarrow W_2 \subset W \end{aligned}$$

da cui si ottiene che $W_1 + W_2 \subset W$, e dunque $\mathbb{P}(W_1 + W_2) \subseteq \mathbb{P}(W) = L(S_1, S_2)$.
D'altro canto:

$$\begin{aligned} W_1 \subset W_1 + W_2 &\Rightarrow S_1 = \mathbb{P}(W_1) \subset \mathbb{P}(W_1 + W_2) \\ W_2 \subset W_1 + W_2 &\Rightarrow S_2 = \mathbb{P}(W_2) \subset \mathbb{P}(W_1 + W_2) \end{aligned}$$

E dunque, dato che $L(S_1, S_2)$ è il più piccolo sottospazio che contiene S_1 e S_2 , si conclude che $L(S_1, S_2) \subseteq \mathbb{P}(W_1 + W_2)$. \square

Definizione 7.1.26. Dalla formula di Grassmann, possiamo ricavare la FORMULA DI GRASSMANN PROIETTIVA:

$$\dim L(S_1, S_2) = \dim S_1 + \dim S_2 - \dim S_1 \cap S_2$$

Dimostrazione. Dalla formula di Grassmann otteniamo:

$$\begin{aligned} \dim L(S_1, S_2) &= \dim \mathbb{P}(W_1 + W_2) = \dim(W_1 + W_2) - 1 \\ &= \dim W_1 + \dim W_2 - \dim W_1 \cap W_2 - 1 \\ &= (\dim W_1 - 1) + (\dim W_2 - 1) - (\dim W_1 \cap W_2 - 1) \\ &= \dim S_1 + \dim S_2 - \dim S_1 \cap S_2 \end{aligned}$$

\square

Proposizione 7.1.27.

- (i) In un piano proiettivo due rette qualsiasi sono incidenti.
- (ii) In uno spazio proiettivo di dimensione 3, una retta e un piano qualsiasi sono incidenti, e due piani distinti hanno una retta in comune.

Dimostrazione. (i) Siano $S_1 = r_1$ e $S_2 = r_2$ due rette proiettive in un piano proiettivo. Allora $\dim S_1 \cap S_2 = \dim r_1 \cap r_2 \geq \dim r_1 + \dim r_2 - \dim \mathbb{P}(V) = 1 + 1 - 2 = 0$. Ma allora, se $\dim r_1 \cap r_2 \geq 0$, abbiamo che $r_1 \cap r_2 \neq \emptyset$.
(ii) Sia $S_1 = r_1$ una retta e $S_2 = p_2$ un piano. Allora come prima $\dim r_1 \cap p_2 \geq 1 + 2 - 3 = 0$ e dunque l'intersezione è non vuota.
Siano $S_1 = p_1$ e $S_2 = p_2$ due piani. Assumiamo che $S_1 \neq S_2$, allora $\dim S_1 \cap S_2 < 2$. D'altro canto $\dim S_1 \cap S_2 \geq 2 + 2 - 3 = 1 \Rightarrow 2 > \dim S_1 \cap S_2 \geq 1 \Rightarrow \dim S_1 \cap S_2 = 1$, dunque l'intersezione è una retta. \square

Esempio 7.1.28. Siano A, B, C, D punti di $\mathbb{P}^2(\mathbb{K})$ in posizione generale, e siano:

$$P = L(A, B) \cap L(C, D), \quad Q = L(A, C) \cap L(B, D), \quad R = L(A, D) \cap L(B, C)$$

Ci chiediamo se P, Q, R sono allineati oppure no. Prendiamo allora $\mathbb{P}(V) = \mathbb{P}^2(\mathbb{K})$ dove $\dim \mathbb{P}(V) = 2 = n$, il che implica che i 4 punti in posizione generale A, B, C, D determinino un riferimento proiettivo:

$$A = [e_0], \quad B = [e_1], \quad C = [e_2], \quad D = [e_0 + e_1 + e_2]$$

Adesso determiniamo esplicitamente le equazioni cartesiane delle rette definite sopra: $L(A, B) = L([1, 0, 0], [0, 1, 0])$ ha equazione cartesiana:

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & 1 & 0 \\ x_1 & 0 & 1 \\ x_2 & 0 & 0 \end{pmatrix} = 0$$

Dunque $L(A, B) = H_2 : x_2 = 0$. Allo stesso modo abbiamo che $L(C, D) = L([0, 0, 1], [1, 1, 1])$ ha equazione:

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & 0 & 1 \\ x_1 & 0 & 1 \\ x_2 & 1 & 1 \end{pmatrix} = 0$$

Cioè $x_1 - x_0 = 0$. Analogamente, $L(A, C) = L([1, 0, 0], [0, 0, 1]) = H_1 : x_1 = 0$. Infine:

$$L(B, D) = L([0, 1, 0], [1, 1, 1]) :$$

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & 0 & 1 \\ x_1 & 1 & 1 \\ x_2 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 0 \quad \text{cioè } x_0 - x_2 = 0$$

$$L(A, D) = L([1, 0, 0], [1, 1, 1]) :$$

$$\det \begin{pmatrix} x_0 & 1 & 1 \\ x_1 & 0 & 1 \\ x_2 & 0 & 1 \end{pmatrix} = 0 \quad \text{cioè } x_2 - x_1 = 0$$

$$L(B, C) = L([0, 1, 0], [0, 0, 1]) = H_0 : x_0 = 0$$

Allora abbiamo che $P = L(A, B) \cap L(C, D) = H_2 \cap L(C, D) \Rightarrow P = [1, 1, 0]$. Procedendo analogamente con Q ed R , otteniamo che:

$$P = [1, 1, 0], \quad Q = [1, 0, 1], \quad R = [0, 1, 1]$$

Poiché P, Q, R sono allineati \Leftrightarrow sono linearmente dipendenti $\Leftrightarrow \det \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} =$

0, otteniamo che P, Q, R non sono allineati, poiché il determinante della matrice è -2 .

Esercizio 7.1.29. Siano r_1, r_2 rette sghembe in $\mathbb{P}^3(\mathbb{K})$ e sia $P \in \mathbb{P}^3(\mathbb{K}) \setminus (r_1 \cup r_2)$. Provare che $\exists! \ell \subset \mathbb{P}^3(\mathbb{K})$ retta tale che $P \in \ell$, $\ell \cap r_1 \neq \emptyset$, $\ell \cap r_2 \neq \emptyset$.

Esercizio 7.1.30. Siano W_1, W_2, W_3 piani di $\mathbb{P}^4(\mathbb{K})$ tali che $W_i \cap W_j$ è un punto $\forall i \neq j$ e $W_1 \cap W_2 \cap W_3 = \emptyset$. Dimostrare che $\exists!$ un piano W_0 tale che $W_0 \cap W_i$ è una retta proiettiva $\forall i = 1, 2, 3$.

Esercizio 7.1.31. Siano r_1, r_2, r_3 rette di $\mathbb{P}^4(\mathbb{K})$ a due a due sghembe e non tutte contenute in un iperpiano. Allora $\exists!$ una retta ℓ che interseca tutte e tre le rette.

Teorema 7.1.32. (Desargues) Sia $\mathbb{P}(V)$ un piano proiettivo, e siano $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ punti distinti di $\mathbb{P}(V)$ a tre a tre non allineati. Consideriamo i triangoli T_1 e T_2 di $\mathbb{P}(V)$ di vertici rispettivamente A_1, A_2, A_3 e B_1, B_2, B_3 , e diciamo che T_1 e T_2 sono in prospettiva se e solo se esiste un punto O , detto "centro della prospettiva", distinto dagli A_i e B_j , tale che le rette $L(A_i, B_i)$ per $i = 1, 2, 3$ passino per O .

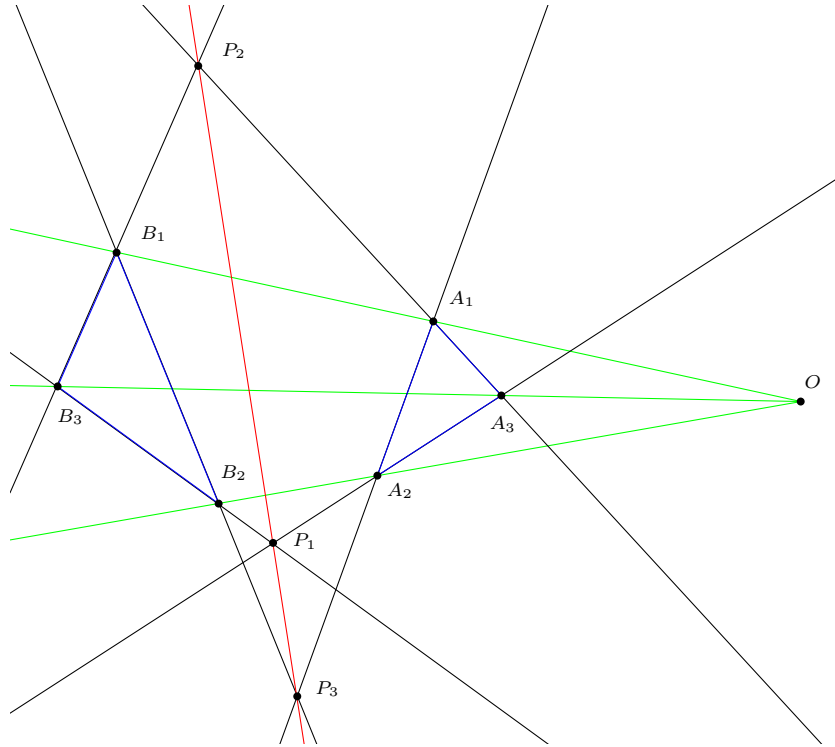
Allora T_1 e T_2 sono in prospettiva se e solo se i punti

$$P_1 = L(A_2, A_3) \cap L(B_2, B_3)$$

$$P_2 = L(A_3, A_1) \cap L(B_3, B_1)$$

$$P_3 = L(A_1, A_2) \cap L(B_1, B_2)$$

sono allineati.



Dimostrazione. È facile verificare che i punti P_1, P_2, P_3 sono distinti tra loro e distinti dai vertici di T_1 e T_2 . Si verifica che i punti A_1, B_1, P_3, P_2 sono in posizione generale, e dunque essi danno luogo ad un riferimento proiettivo di $\mathbb{P}(V)$, cioè:

$$A_1 = [e_0], \quad B_1 = [e_1], \quad P_3 = [e_2], \quad P_2 = [e_0 + e_1 + e_2]$$

Il punto A_2 appartiene alla retta $L(A, P_3) = H_1 : x_1 = 0$. Allora $A_2 = [b, 0, c]$ con $b, c \neq 0$ perché $A_2 \neq A_1$ e $A_2 \neq P_3$, dunque $A_2 = [b, 0, c] = [1, 0, a_2]$ con $a_2 \neq 0$.

Il punto A_3 appartiene a $L(A_1, P_2) : x_1 = x_2$, dunque poiché $A_3 \neq A_1$ abbiamo che $A_3 = [a, b, b] = [a_3, 1, 1]$ dove $b \neq 0$ e $a_3 \neq 1$ perché $A_3 = P_2$ è un punto unità. Ragionando allo stesso modo abbiamo

$$\begin{aligned} B_2 &= [0, 1, b_2], \quad b_2 \neq 0 \\ B_3 &= [1, b_3, 1], \quad b_3 \neq 1 \end{aligned}$$

Consideriamo i punti:

$$\begin{aligned} P_1 &= L(A_2, A_3) \cap L(B_2, B_3) \\ P'_1 &= L(A_2, A_3) \cap L(P_2, P_3) \\ P''_1 &= L(B_2, B_3) \cap L(P_2, P_3) \end{aligned}$$

Allora P_1, P_2, P_3 sono allineati $\Leftrightarrow P_1 = P'_1 = P''_1$. Infatti, se P_1, P_2, P_3 sono allineati allora $P_1 \in L(P_2, P_3) \Rightarrow P_1 = P'_1 = P''_1$. Viceversa, $P_1 = P'_1 = P''_1 \Rightarrow P_1 \in L(P_2, P_3)$.

Le coordinate omogenee di P'_1 e P''_1 sono:

$$P'_1 = [1, 1, 1 - a_2 a_3 + a_2], \quad P''_1 = [1, 1, 1 - b_2 b_3 + b_2]$$

E dunque P_1, P_2, P_3 allineati $\Leftrightarrow P'_1 = P''_1 \Leftrightarrow a_2(1 - a_3) = b_2(1 - b_3)$.

Esaminiamo adesso la condizione che T_1 e T_2 siano in prospettiva: le condizioni per cui esiste $O \in L(A_1, B_1) \cap L(A_2, B_2) \cap L(A_3, B_3)$ sono:

$$\begin{cases} x_2 = 0 \\ a_2 x_0 + b_2 x_1 - x_2 = 0 \\ (1 - b_3)x_0 + (1 - a_3)x_1 + (a_3 b_3 - 1)x_2 = 0 \end{cases}$$

Tale sistema ammette soluzione non nulla se e solo se

$$\det \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ a_2 & b_3 & -1 \\ 1 - b_3 & 1 - a_3 & a_3 b_3 - 1 \end{pmatrix} = 0$$

Cioè $a_2(1 - a_3) - b_2(1 - b_3) = 0$. Inoltre, se questa equazione è soddisfatta, abbiamo che $0 = [b_2, -a_2, 0] \Rightarrow 0 \neq A_i, 0 \neq B_i$. \square

7.2 Trasformazioni proiettive

Abbiamo visto che esistono due definizioni equivalenti di riferimento proiettivo. Cioè, dato $\mathbb{P}(V)$, un suo riferimento proiettivo è:

- Una base $\mathcal{B} = \{v_0, \dots, v_n\}$ di V (a meno di moltiplicazioni simultanee di tutti i v_i per un qualche $\lambda \in \mathbb{K}^*$).
- Una $(n+2)$ -upla di punti P_0, \dots, P_{n+1} di V in posizione generale.

Infatti, data \mathcal{B} si pone $P_i = [v_i]$ per $i = 0, \dots, n$ e $P_{n+1} = [v_0 + \dots + v_n]$. Viceversa, data una $(n+2)$ -upla definita come sopra, si ottiene la base associata $\{v_0, \dots, v_n\}$ tale che $P_i = [v_i]$ e $P_{n+1} = [v_0 + \dots + v_n]$. D'ora in avanti quando si parlerà di riferimento proiettivo ci si riferirà alla $(n+2)$ -upla definita come sopra.

Definizione 7.2.1. Siano $\mathbb{P}(V)$ e $\mathbb{P}(W)$ spazi proiettivi su \mathbb{K} . Una TRASFORMAZIONE PROIETTIVA $f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(W)$ è una funzione tale che $\exists \varphi : V \rightarrow W$ lineare iniettiva per cui $f([v]) = [\varphi(v)]$, $\forall v \in V \setminus \{0\}$. In tal caso f si dice INDOTTA da φ .

Osservazione 7.2.2. Se $\varphi : V \rightarrow W$ è lineare iniettiva, φ induce una ben definita $f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(W)$ come sopra, in quanto $[v] = [v'] \Rightarrow v = \lambda v'$, $\lambda \in \mathbb{K}^* \Rightarrow \varphi(v) = \varphi(\lambda v') = \lambda \varphi(v') \Rightarrow [\varphi(v)] = [\varphi(v')]$. Inoltre $v \neq 0 \Rightarrow \varphi(v) \neq 0$ per l'iniettività.

Osservazione 7.2.3. Una trasformazione proiettiva è necessariamente iniettiva, infatti: $f(P), f(Q), P = [v], Q = [v'] \Rightarrow [\varphi(v)] = [\varphi(v')] \Rightarrow \varphi(v) = \lambda \varphi(v') \Rightarrow \varphi(v) = \varphi(\lambda v') \Rightarrow v = \lambda v'$ (per l'iniettività di φ), per cui $[v] = [v']$, cioè $P = Q$.

Osservazione 7.2.4.

- $\text{id} : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(V)$ è una trasformazione proiettiva indotta da id_V .
- La composizione di trasformazioni proiettive è una trasformazione proiettiva, cioè se f è indotta da φ e g è indotta da ψ , allora $f \circ g$ è indotta da $\varphi \circ \psi$.

Definizione 7.2.5. Un ISOMORFISMO PROIETTIVO è una trasformazione proiettiva che ammette un'inversa che sia a sua volta una trasformazione proiettiva.

Osservazione 7.2.6. Poiché l'inversa insiemistica di una mappa lineare bigettiva è automaticamente lineare bigettiva, una trasformazione proiettiva è un isomorfismo proiettivo se e solo se è bigettiva (se f è indotta da φ , f^{-1} è indotta da φ^{-1}).

Osservazione 7.2.7. $\mathbb{P}(V)$ è isomorfo a $\mathbb{P}(W) \Leftrightarrow \exists f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(W)$ isomorfismo proiettivo $\Leftrightarrow \exists \varphi : V \rightarrow W$ isomorfismo lineare $\Leftrightarrow \dim V = \dim W \Leftrightarrow \dim \mathbb{P}(V) = \dim \mathbb{P}(W)$.

Definizione 7.2.8. Una trasformazione proiettiva $f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(V)$ si chiama PROIETTIVITÀ.

Osservazione 7.2.9. Una proiettività $f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(V)$ è automaticamente un isomorfismo se $\dim V < +\infty$, in quanto mappe lineari da V in sé sono automaticamente bigettive se V ha dimensione finita.

Lemma 7.2.10. Siano $f, g : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(W)$ trasformazioni proiettive indotte rispettivamente da φ e ψ . Allora sono equivalenti:

- (i) $f = g$
- (ii) f e g coincidono su un riferimento proiettivo
- (iii) $\exists \lambda \in \mathbb{K}^*$ con $\varphi = \lambda\psi$

Dimostrazione. (i) \Rightarrow (ii). Da fare.

(ii) \Rightarrow (iii). Sia $\{P_0, \dots, P_{n+1}\}$ il riferimento per cui $f(P_i) = g(P_i)$ per $i = 0, \dots, n+1$. Sia $\{v_0, \dots, v_n\}$ la base associata di V . Allora $f(P_i) = g(P_i) \Rightarrow \varphi(v_i) = \lambda_i \psi(v_i)$, $\lambda_i \in \mathbb{K}^*$ per ogni $i = 0, \dots, n$. Dobbiamo dimostrare che λ_i non dipende da i , così avremo $\varphi(v_i) = \lambda \psi(v_i) \forall i$ con λ fissato, per cui $\varphi = \lambda\psi$ su una base di V , e dunque su tutto V . Sia dunque che $\varphi(v_0) = \lambda_0 \psi(v_0), \dots, \varphi(v_n) = \lambda_n \psi(v_n)$ e, poiché $f(P_{n+1}) = g(P_{n+1})$, abbiamo che $\varphi(v_0 + \dots + v_n) = \lambda_{n+1} \psi(v_0 + \dots + v_n)$. Otteniamo quindi $\varphi(v_0) + \dots + \varphi(v_n) = \lambda_{n+1} \psi(v_0) + \dots + \lambda_{n+1} \psi(v_n) = \lambda_0 \psi(v_0) + \dots + \lambda_n \psi(v_n)$. Poiché ψ è iniettiva, abbiamo che $\psi(v_0), \dots, \psi(v_n)$ sono linearmente indipendenti, per cui confrontando i coefficienti di queste due combinazioni lineari otteniamo $\lambda_i = \lambda_{n+1}$ per ogni $i = 0, \dots, n$, dunque $\varphi(v_i) = \lambda_{n+1} \psi(v_i)$ per ogni i , e quindi $\varphi = \lambda_{n+1} \psi$.

(iii) \Rightarrow (i). Se $\varphi = \lambda\psi \forall v \in V \setminus \{0\}$ abbiamo:

$$f([v]) = [\varphi(v)] = [\lambda\psi(v)] = [\psi(v)] = g([v])$$

□

Se denotiamo con $\mathbb{P}GL(V)$ il gruppo:

$$GL(V)/\sim \quad \varphi \sim \psi \Leftrightarrow \varphi = \lambda\psi, \lambda \in \mathbb{K}^*$$

abbiamo che $\mathbb{P}GL(V) = GL(V)/_N$ con $N \triangleleft GL(V)$ e

$$N = \{\varphi : V \rightarrow V \mid \varphi = \lambda \text{id}, \lambda \in \mathbb{K}^*\}$$

allora valgono i seguenti teoremi.

Teorema 7.2.11. Il gruppo delle proiettività di $\mathbb{P}(V)$ è isomorfo a $\mathbb{P}GL(V)$.

Teorema 7.2.12. (fondamentale delle trasformazioni proiettive) Siano $\mathbb{P}(V)$ e $\mathbb{P}(W)$ spazi proiettivi della stessa dimensione, e siano $\{P_0, \dots, P_{n+1}\}$ e $\{Q_0, \dots, Q_{n+1}\}$ riferimenti proiettivi di $\mathbb{P}(V)$ e $\mathbb{P}(W)$ rispettivamente. Allora esiste unica $f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(W)$ trasformazione proiettiva con $f(P_i) = Q_i$ per $i = 0, \dots, n+1$.

Dimostrazione. L'unicità discende dal lemma visto sopra. Per quanto riguarda l'esistenza, siano $\{v_0, \dots, v_n\}$ e $\{w_0, \dots, w_n\}$ basi associate ai due riferimenti proiettivi, e sia $\varphi : V \rightarrow W$ l'isomorfismo lineare tale che $\varphi(v_i) = w_i$ per ogni i . Allora sia f indotta da φ . Per costruzione:

$$f(P_i) = f([v_i]) = [\varphi(v_i)] = [w_i] = Q_i \quad i = 0, \dots, n$$

Inoltre:

$$\begin{aligned} f(P_{n+1}) &= f([v_0 + \dots + v_n]) = [\varphi(v_0 + \dots + v_n)] \\ &= [\varphi(v_0) + \dots + \varphi(v_n)] = [w_0 + \dots + w_n] = Q_{n+1} \end{aligned}$$

□

D'ora in poi, visto che φ e ψ inducono la stessa f se e solo se $\varphi = \lambda\psi$, $\lambda \in \mathbb{K}^*$, scriveremo $f = [\varphi]$ per indicare che f è indotta da φ .

Esempio 7.2.13. (Prospettività) Sia $\mathbb{P}(V)$ spazio proiettivo su \mathbb{K} di dimensione 2, ad esempio $\mathbb{P}^2(\mathbb{K})$. Siano r, s rette distinte di $\mathbb{P}(V)$ e sia $o \in \mathbb{P}^2(V) \setminus (r \cup s)$. Abbiamo già visto che $r \cap s = \{A\}$ con $A \in \mathbb{P}^2(V)$. Dato $p \in r$, poiché $o \notin r$, abbiamo che $L(o, p)$ è una retta, ed è distinta da s perché $o \in L(o, p)$ e $o \notin s$. Dunque $L(o, p) \cap s$ consiste esattamente di un punto, che chiamiamo $\pi_o(p)$. Abbiamo così definito la PROSPETTIVITÀ di centro o :

$$\pi_o : r \rightarrow s$$

Per costruzione, $\pi_o(A) = A$.

Teorema 7.2.14. $\pi_o : r \rightarrow s$ è un isomorfismo proiettivo.

Dimostrazione. Dobbiamo dimostrare che π_o è indotta da un isomorfismo lineare tra H_r e H_s , dove $r = \mathbb{P}(H_r)$ e $s = \mathbb{P}(H_s)$, con H_r e H_s piani di V . Scegliamo $B \in r \setminus \{A\}$ e $c \in s \setminus (\{A\} \cup L(o, B))$. Con queste scelte, nessuna scelta in $\{A, B, C, o\}$ è costituita da punti allineati, per cui A, B, C, o è un riferimento proiettivo di $\mathbb{P}(V)$.

Sia v_A, v_B, v_C una base di V associata a A, B, C, o , così che v_A, v_B è una base di H_r e v_A, v_C è una base di H_s . Sia ora p il generico elemento di r , dunque $p = [\lambda v_A + \mu v_B]$. Vogliamo scrivere allora le coordinate omogenee di $\pi_o(p)$ rispetto a v_A, v_C . Abbiamo che:

$$L(o, p) = \mathbb{P}(\text{Span}_V \langle \lambda v_A + \mu v_B, v_A + v_B + v_C \rangle)$$

Cerchiamo $L(o, p) \cap s = \mathbb{P}(\text{Span}_V \langle \lambda v_A + \mu v_B, v_A + v_B + v_C \rangle \cap \text{Span} \langle v_A, v_C \rangle)$, ovvero, in altri termini, cerchiamo α, β tali che

$$\alpha(\lambda v_A + \mu v_B) + \beta(v_A + v_B + v_C) \in \text{Span} \langle v_A, v_C \rangle$$

Poniamo dunque $\alpha = 1$ e $\beta = -\mu$ per far sparire v_B a sinistra, ottenendo

$$\lambda v_A + \mu v_B - \mu(v_A + v_B + v_C) = (\lambda - \mu)v_A - \mu v_C$$

Dunque $\pi_o([\lambda v_A + \mu v_B]) = [(\lambda - \mu)v_A - \mu v_C]$. Perciò $\pi_o = [\varphi]$ dove $\varphi : H_r \rightarrow H_s$ è lineare e, rispetto alle basi $\{v_A, v_B\}$ di H_r e $\{v_A, v_C\}$ di H_s , φ è rappresentata dalla matrice

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \text{che ha } \det = -1 \neq 0$$

Dunque f è una trasformazione proiettiva. Infatti

$$\varphi(\lambda v_A + \mu v_B) = (\lambda - \mu)v_A - \mu v_B$$

è chiaramente lineare, e $\varphi(v_A)$ si ottiene ponendo $\lambda = 1$ e $\mu = 0$ e dà v_A , $\varphi(v_B)$ si ottiene ponendo $\lambda = 0$ e $\mu = 1$ e dà $-v_A, -v_B$. \square

Teorema 7.2.15. Siano $r, s \subseteq \mathbb{P}(V)$ rette proiettive distinte, e sia $\mathbb{P}(V)$ di dimensione 2. Sia inoltre $f : r \rightarrow s$ isomorfismo proiettivo. Allora f è una prospettività $\Leftrightarrow f(A) = A$ con $A = r \cap s$.

Dimostrazione. (\Rightarrow) Già osservato.

(\Leftarrow) Sia data $f : r \rightarrow s$ proiettiva con $f(A) = A$, e siano B, C su r tali che A, B, C sia un riferimento proiettivo di r . Ovviamente $f(B) \neq B$ e $f(C) \neq C$. Dunque $L(B, f(B))$ e $L(C, f(C))$ sono rette proiettive e sono distinte, altrimenti $B, C, f(B), f(C)$ sarebbero allineati e $r = s$. Dunque è ben definito $o = L(B, f(B)) \cap L(C, f(C))$. Ora, per costruzione:

$$\pi_o(B) = f(B), \pi_o(C) = f(C), \pi_o(A) = f(A)$$

Dunque f e π_o coincidono su un riferimento proiettivo di r , e $f = \pi_o$ è una prospettività. \square

7.3 Geometria proiettiva e affine

Lavoriamo in $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$. Consideriamo la funzione $j_i : \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ tal che $j_i(x_1, \dots, x_n) = [x_1 : \dots : 1 : \dots : x_n]$, dove 1 compare in posizione i -esima. j_i è la i -esima carta affine, che stabilisce una bigezione tra \mathbb{K}^n e $U_i = j_i(\mathbb{K}^n) = \{x_i \neq 0\} \subseteq \mathbb{P}^n(\mathbb{K})$.

Indicheremo con H_i l'iperpiano complementare a U_i . Notiamo anche che l'inversa di j_i è

$$j_i^{-1}([x_0 : \dots : x_n]) = \left(\frac{x_0}{x_i}, \dots, \frac{x_{i-1}}{x_i}, \frac{x_{i+1}}{x_i}, \dots, \frac{x_n}{x_i} \right)$$

Proposizione 7.3.1. Se $W \subseteq \mathbb{K}^n$ è un sottospazio affine, esiste unico $\overline{W} \subseteq \mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ sottospazio proiettivo con $j_0(W) = \overline{W} \cap U_0$. Allora \overline{W} si chiama chiusura proiettiva di W e $\dim \overline{W} = \dim W$.

Viceversa, se $K \subseteq \mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ è un sottospazio proiettivo non contenuto in H_0 , allora $K \cap U_0 = j_0(K')$ con K' sottospazio affine. Dunque c'è una corrispondenza biunivoca tra sottospazi affini di dimensione k e sottospazi proiettivi di dimensione k non contenuti in H_0 .

Dimostrazione. Sia K un sottospazio proiettivo di $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$ di dimensione k , con $K \not\subseteq H_0$. Sia $h = n - k$. Allora K è definito da un sistema di equazioni

$$\begin{cases} a_{1,0}x_0 + \cdots + a_{1,n}x_n = 0 \\ \vdots \\ a_{h,0}x_0 + \cdots + a_{h,n}x_n = 0 \end{cases}$$

che ha rango h . Vale che $j_0(x_1, \dots, x_n) \in K$ se e solo se $[1 : x_1 : \cdots : x_n] \in K$ se e solo se vale il sistema di equazioni sopra. Sostituendo gli x_0 si ritrova un sistema non omogeneo. Ora basta guardare il rango di questo sistema per vedere che l'insieme delle soluzioni è non vuoto.

Per il secondo punto, si parte dal sistema non omogeneo e si ritrova il sistema omogeneo introducendo la variabile x_0 . \square

Definizione 7.3.2. I punti di $\overline{W} \setminus W$ (con le notazioni appena introdotte) si dicono punti impropri o punti all'infinito di W . Si identificano \mathbb{K}^n con U_0 e W con $j_0(W) \subseteq U_0$. H_0 viene chiamato iperpiano all'infinito di $\mathbb{P}^n(\mathbb{K})$.

7.4 Spazi proiettivi di dimensione 1

In dimensione 1, un sistema di riferimento proiettivo consta di 3 punti distinti. Sia allora $\dim \mathbb{P}(V) = 1$ e P_1, P_2, P_3, P_4 punti di $\mathbb{P}(V)$ con i primi tre distinti. Allora P_4 ha coordinate $[\lambda, \mu]$. Si pone allora il birapporto

$$\beta(P_1, P_2, P_3, P_4) = \frac{\lambda}{\mu} \in \mathbb{K} \cup \{\infty\}$$

con la convenzione che la divisione per 0 fa infinito. Si tratta di una buona definizione perché le coordinate proiettive sono definite a meno di una costante moltiplicativa.

Teorema 7.4.1. Sia $f : \mathbb{P}(V) \rightarrow \mathbb{P}(W)$ trasformazione proiettiva tra spazi di dimensione unitaria. Allora con le notazioni introdotte sopra,

$$\beta(P_1, P_2, P_3, P_4) = \beta(f(P_1), f(P_2), f(P_3), f(P_4))$$

Dimostrazione. Poiché f è una trasformazione proiettiva tra spazi della stessa dimensione, è un isomorfismo proiettivo, per cui $f(P_i)$ per $i = 1, 2, 3$ è un riferimento proiettivo dello spazio in arrivo. Se $\{v_1, v_2\}$ è base associata a P_1, P_2, P_3 e $f = [\phi]$ con $\phi : V \rightarrow W$, allora $\{\phi(v_1), \phi(v_2)\}$ è una base associata agli f dei tre punti. Se v_4 è rappresentante di P_4 , si ha $v_4 = \lambda v_1 + \mu v_2$, per cui $P_4 = [\lambda : \mu]$ nel sistema di coordinate introdotto. Allora $f(P_4)$ è rappresentato da $\phi(v_4) = \lambda\phi(v_1) + \mu\phi(v_2)$. Per cui il birapporto è sempre λ/μ . \square

Teorema 7.4.2. Prendendo i quattro punti come sopra, siano $[\lambda_i : \mu_i]$ le coordinate di P_i . Allora

$$\beta(P_1, P_2, P_3, P_4) = \frac{(\lambda_1\mu_3 - \lambda_3\mu_1)(\lambda_2\mu_4 - \lambda_4\mu_2)}{(\lambda_1\mu_4 - \lambda_4\mu_1)(\lambda_3\mu_2 - \lambda_2\mu_3)}$$

In particolare se $P_i = j_0(z_i)$, allora

$$\beta(\dots) = \frac{(z_3 - z_1)(z_4 - z_2)}{(z_4 - z_1)(z_3 - z_2)}$$

Dimostrazione. Poiché il birapporto è invariante per trasformazioni proiettive, non è restrittivo supporre $\mathbb{P}(V) = \mathbb{P}'(\mathbb{K})$ con il riferimento standard. Allora se le coordinate dell'immagine del quarto sono $[\lambda : \mu]$ il birapporto è λ/μ . A questo punto per ottenere il birapporto in funzione dei dati iniziali bisogna esplicitare la funzione appena utilizzata. Per semplificare i conti è più conveniente cercare la trasformazione inversa, ed è un semplice conto. \square

Corollario 7.4.3. Sia $r \cong \mathbb{K}$ una retta affine di coordinata affine z . Sia $\bar{r} = \mathbb{P}^1(\mathbb{K})$ la sua chiusura proiettiva. Sia $H_0 = \{[0 : 1]\} = \{\infty\}$. Allora se $P_1, P_2, P_3 \in r$ hanno coordinate z_1, z_2, z_3 , si ha

$$\beta(j_0(P_1), j_0(P_2), j_0(P_3), \infty) = \frac{z_1 - z_3}{z_2 - z_3}$$

Dimostrazione. Una coordinata affine su \mathbb{K} è una funzione z tale che $z(x) = ax + b$, con $a \in \mathbb{K}^*$, $x \in \mathbb{K}$. Si mostra che il rapporto che si vuole dimostrare essere il birapporto non dipende dalla particolare coordinata scelta ed è uguale a $(x_1 - x_3)/(x_2 - x_3)$. A questo punto si sostituisce nella formula del teorema sopra. \square

Breve osservazione sul teorema precedente: un cambio di coordinate affine sulla retta induce un cambio di coordinate proiettivo sulla chiusura che fissa l'infinito.

Teorema 7.4.4. Siano $A, B, C \in \mathbb{P}^2(\mathbb{K})$ in posizione generale, $r \subseteq \mathbb{P}^2(\mathbb{K})$ retta che non passa per tali punti. Siano

$$A' = L(B, C) \cap r, \quad B' = L(C, A) \cap r, \quad C' = L(A, B) \cap r$$

e scegliamo i punti

$$A'' \in L(B, C), \quad B'' \in L(C, A), \quad C'' \in L(A, B),$$

distinti da A, B, C . Allora le rette $L(A, A''), L(B, B''), L(C, C'')$ sono concorrenti se e solo se

$$\beta(B, C, A'', A')\beta(C, A, B'', B')\beta(A, B, C'', C') = -1$$

Dimostrazione. Si scelgono coordinate per cui $A = [1 : 0 : 0]$, $B = [0 : 1 : 0]$, $C = [0 : 0 : 1]$, $r = \{ax_0 + bx_1 + cx_2 = 0\}$, e base associata $\{v_1, v_2, v_3\}$. I punti non appartengono alla retta, dunque a, b, c sono non nulli, e scegliendo la base $\{av_1, bv_2, cv_3\}$ si hanno le coordinate richieste.

Si ha $L(A, B) = \{x_2 = 0\}$, che intersecando con r dà $C' = [1 : -1 : 0]$. Si procede analogamente per gli altri punti. Si scelgono basi per le rette del tipo $L(B, C)$ in modo tale che $B = [1 : 0]$, $C = [0 : 1]$, $A' = [1 : -1]$. Se $A'' = [\lambda : \mu]$, si ottiene che il birapporto di questi punti è (usando la formula) $-\mu/\lambda = \alpha$. Si ottiene dunque che $L(A, A'') = \{\alpha x_1 + x_2 = 0\}$ e si rifanno gli stessi ragionamenti sulle altre due rette. A questo punto si osserva che le tre rette sono concorrenti se e solo se le soluzioni del sistema delle loro equazioni ha soluzioni non banali. E questo è a sua volta alla condizione sul determinante della matrice, che porta allora alla tesi. \square

Teorema 7.4.5. (di Ceva) Si consideri un triangolo del piano euclideo di vertici A, B, C . Siano A'' un punto sul lato opposto ad A , e allo stesso modo si prendano sui lati distinti i punti B'' e C'' . Allora le rette $L(A, A'')$, $L(B, B'')$, $L(C, C'')$ sono concorrenti se e solo se

$$\frac{\overline{BC''}}{\overline{AC''}} \frac{\overline{CA''}}{\overline{BA''}} \frac{\overline{AB''}}{\overline{CB''}} = 1.$$

Dimostrazione. Si usa il teorema precedente mettendo r all'infinito, cioè si identifica \mathbb{R}^2 con $j_0(\mathbb{R}^2)$. Si prende $r = H_0$. A questo punto si può applicare il teorema precedente, ricordando che le affinità preservano le lunghezze dei segmenti, cioè se z è una coordinata affine su $L(B, C)$, vale $\frac{z(B)-z(A'')}{z(C)-z(A'')} = -\frac{\overline{BA''}}{\overline{CA''}}$ \square

Riferimenti bibliografici

- [M] M. Manetti, *Topologia*, (2007)
- [C] H. Cartan, *Elementary theory of analytic functions of one or several complex variables*, (1963)
- [FFP] E. Fortuna, R. Frigerio, R. Pardini, *Geometria proiettiva - Problemi risolti e richiami di teoria*, (2011)

Ringraziamenti

Si ringraziano innanzitutto i professori Frigerio, Gandini e Sala per aver tenuto il corso e averci insegnato tante cose interessanti (alcune di più altre di meno). Un grazie anche a tutti quelli che hanno segnalato o segnaleranno i vari typo, in particolare coloro che hanno contribuito maggiormente e con regolarità durante l'anno: Andrea, Giorgio e Giovanni.

E infine grazie a chiunque abbia letto queste dispense e studiato da esse: ti ringraziamo per esserti affidato al nostro lavoro e speriamo che ti sia stato di aiuto.

Addio e grazie per tutto il pesce.