Topologia Algebrica

Zitto e studia.

Parigi 1905
H. Poincarè

Professore:
Gilberto Bini

Scriba:
Gabriele Bozzola

Topologia Algebrica	**2016/2017**

Lezione 1: 29 Settembre

Agomenti: General introduction. Homology of a complex. Singular homology.

1.1 Introduzione

1.1.1 Richiami di geometria

Definitione 1.1 *Un* ***anello*** *è un insieme $\mathcal{R}$ dotato di due operazioni $+$ e $\cdot$ tali che $\mathcal{R}$ sia un gruppo abeliano con l'addizione, sia un monoide con la moltiplicazione (ovvero la moltiplicazione è associativa e possiede un elemento neutro) e goda della proprietà distributiva rispetto all'addizione.*

Definitione 1.2 *Sia $\mathcal{R}$ un anello commutativo*[1] *si definisce l'* ***$\mathcal{R}$-modulo*** *il gruppo abeliano $\mathcal{M}$ equipaggiato con un'operazione di somma tale che $\forall v, w \in \mathcal{M}$ e $\forall a, b \in \mathcal{R}$ vale che:*

- $a(v + w) = av + aw$
- $(a + b)v = av + bv$
- $(ab)v = a(bv)$

Osservazione 1.3 *Se $\mathcal{R}$ è un campo allora l'$\mathcal{R}$-modulo è uno spazio vettoriale.*

Osservazione 1.4 *Ogni gruppo abeliano è uno $\mathbb{Z}$-modulo in modo univoco.*

Definitione 1.5 *Siano $(X, \cdot)$ e $(Y, \star)$ due gruppi, un* ***omomorfismo*** *è un'applicazione f tra X e Y che preserva la struttura di gruppo, cioè:*

$$\forall u, v \in X \quad f(u \cdot v) = f(u) \star f(v)$$

Osservazione 1.6 *Da questa definizione si trova immediatamente che gli omomorfismi si comportano bene nei confronti dell'inverso, cioè $\forall v \in X$ vale che $f(v^{-1}) = f(v)^{-1}$.*

Voglio studiare gli omomorfismi tra $\mathbb{Z}$-moduli.

Definitione 1.7 *Sia $\varphi : \mathcal{M} \to \mathcal{N}$ un omomorfismo tra gli $\mathcal{R}$-moduli $\mathcal{M}$ e $\mathcal{N}$, allora si definisce il* ***nucleo*** *e l'****immagine****:*

$$\mathrm{Ker}(\varphi) := \{\, m \in \mathcal{M} \mid \varphi(m) = 0 \,\} \qquad \mathrm{Im}(\varphi) := \{\, m \in \mathcal{M} \mid \varphi(m) = 0 \,\}$$

[1] Si può rilassare questa ipotesi e costruire moduli destri e sinistri.

Osservazione 1.8 Ker(φ) *e* Im(φ) *sono $\mathcal{R}$-sottomoduli.*

Posso fare composizioni di omomorfismi, come:

$$\mathcal{M}_1 \xrightarrow{\varphi_1} \mathcal{M}_2 \xrightarrow{\varphi_2} \mathcal{M}_3$$

Se vale $\varphi_2 \circ \varphi_1 = 0$ allora $\mathrm{Im}(\varphi_1) \subseteq \mathrm{Ker}(\varphi_2)$.

Dimostrazione: Se $u \in \mathrm{Im}\varphi_2$ allora $\exists v \in \mathcal{M}_2$ tale che $\varphi_1(v) = u$, ma $\varphi_2(u) = \varphi_2(\varphi_1(v)) = (\varphi_2 \circ \varphi_1)(v) = 0$ quindi $u \in \mathrm{Ker}(\varphi_2)$. ∎

Definitione 1.9 *Siano $\mathcal{M}$ un $\mathcal{R}$-modulo e $\mathcal{N}$ un suo sottomodulo, allora il* ***modulo quozionete*** *di $\mathcal{M}$ con $\mathcal{N}$ e definito da:*

$$\mathcal{M}/_{\mathcal{N}} := \mathcal{M}/_{\sim} \quad \textit{dove} \sim \textit{ è definita da: } x \sim y \Leftrightarrow x - y \in \mathcal{N}$$

Siccome Im(φ) è sottomodulo di Ker(φ) allora posso prendere il quoziente:

$$\mathrm{Ker}(\varphi_2)/_{\mathrm{Im}(\varphi_1)}$$

Questo è un sottomodulo.

A questo punto ci sono due possibilità:

1. $\mathrm{Ker}(\varphi_2)/\mathrm{Im}(\varphi_1) = 0$, che significa che $\mathrm{Ker}(\varphi_2) = \mathrm{Im}(\varphi_1)$ in quanto non ci sono elementi di $\mathrm{Ker}(\varphi_2)$ fuori da $\mathrm{Im}(\varphi_1)$.
2. $\mathrm{Ker}(\varphi_2)/\mathrm{Im}(\varphi_1) \neq 0$, cioè $\exists v \in \mathrm{Ker}(\varphi_2)$ tale che $v \notin \mathrm{Im}(\varphi_1)$ e quindi $\mathrm{Im}(\varphi_1) \subsetneq \mathrm{Ker}(\varphi_2)$.

Nel primo caso si dice che la successione dei moduli $\mathcal{M}$ e delle applicazioni φ è **esatta** in $\mathcal{M}_2$, nel secondo caso la successione è detta **complesso di moduli**.

Sostanzialmente il modulo quoziente quantifica la non esattazza nel punto $\mathcal{M}_2$ della successione.

Definitione 1.10 $H(\mathcal{M}_\bullet) = \mathrm{Ker}(\varphi_2)/\mathrm{Im}(\varphi_1)$ *è detto* ***modulo di omologia*** *del complesso $M_\bullet = M_1 \longrightarrow M_2 \longrightarrow M_3$ con le applicazioni φ_1 e φ_2.*

Per questo $H(\mathcal{M}_\bullet)$ quantifica quanto il complesso $\mathcal{M}.$ non è esatto.

Questo deriva da un problema topologico concreto.

Definitione 1.11 *La coppia $(X, \mathcal{T})$ è detta spazio topologico (generalmente si omette la $\mathcal{T}$) se $\mathcal{T}$ è una topologia, cioè se è una collezione di insiemi di X tali che:*

1. $\emptyset, X \in \mathcal{T}$
2. $\bigcup_{n\in\mathbb{N}} A_n \in \mathcal{T}$ *se* $A_n \in \mathcal{T}\ \forall n \in \mathbb{N}$
3. $A \cap B \in \mathcal{T}$ *se* $A, B \in \mathcal{T}$

1.1.2 Omomorfismo tra $\mathbb{R}$ e $\mathbb{R}^N$

È noto che $\mathbb{R} \not\simeq \mathbb{R}^N$ per $n \geq 2$, infatti basta che tolgo un punto a $\mathbb{R}$ che diventa sconnesso mentre $\mathbb{R}^N$ rimane connesso anche togliendogli un punto.

Tuttavia vale anche che $\mathbb{R}^2 \not\simeq \mathbb{R}^N$ per $n \geq 3$, infatti:

Dimostrazione: Per assurdo $f : \mathbb{R}^2 \overset{\rightarrow}{\sim} \mathbb{R}^N$ è un omomorfismo con $n \geq 3$, tolgo un punto da $\mathbb{R}^2$:

$$\forall p \in \mathbb{R}^2 \quad f : \mathbb{R}^2 \setminus \{ p \} \overset{\rightarrow}{\sim} \mathbb{R}^N \setminus \{ f(p) \}$$

Ma: $\mathbb{R}^2 \setminus \{ p \} \simeq \mathbb{R} \times \mathcal{S}^1$ con la mappa che manda $\underline{x} \mapsto \left(||\underline{x}||, \frac{\underline{x}}{||\underline{x}||} \right)$. Ma quindi il gruppo fondamentale deve essere isomorfo: $\pi_1(\mathbb{R} \times \mathcal{S}^1) \simeq \pi_1(\mathbb{R} \times \mathcal{S}^{n-1})$ ma $\pi_1(\mathbb{R} \times \mathcal{S}^1) = \mathbb{Z}$ e $\pi_1(\mathbb{R} \times \mathcal{S}^{n-1}) = \{ 1 \}$ quindi non possono essere isomorfi. ■

Ho quindi dedotto proprietà geometriche a partire da considerazioni algebriche.

Definitione 1.12 *Si definisce il* ***gruppo fondamentale*** *di uno spazio topologico X connesso per archi attorno al punto $x_0 \in X$*

$$\pi_1(X, x_0) = {\{ g : \mathcal{S}^1 \to X \mid g \text{ continua}, g(1) = x_0 \}}/_{\sim}$$

e $\sim$ è la relazione di omotopia: $g_1 \sim g_2$ se $\exists G : \mathcal{S}^1 \times I \to X$ tale che $G(z, 0) = g_1(z), G(z, 1) = g_2(z), G(1, t) = x_o$.

Ora voglio mostrare per assurdo che non esiste omomorfismo tra $\mathbb{R}^3$ e $\mathbb{R}^N$.

Dimostrazione: Come nel caso precedente tolgo q da $\mathbb{R}^3$ e $f(q)$ da $\mathbb{R}^3$, quindi ottengo l'omomorfismo tra $\mathbb{R} \times \mathcal{S}^2 \simeq \mathbb{R} \times \mathcal{S}^{n-1}$, ma i gruppi fondamentali associati sono banali, quindi sono isomorfi, e non è posisbile replicare il ragionamento utilizzato sopra. ■

Poincaré introdusse i gruppi di omotopia superiore.

Definitione 1.13 *Si definiscono i* ***gruppi di omotopia superiore*** *di uno spazio topologico X attorno al punto x_0 per $k \geq 2$:*

$$\pi_k(X)(X, x_0) = {\{ g : \mathcal{S}^k \to X \mid g(p_0) = x_0, p_o \in \mathcal{S}^k \}}/_{\sim}$$

Studiare i gruppi di omotopia superiore è un problema aperto della topologia moderna. Tuttavia si sa che:

1. $\pi_k(\mathcal{S}^m) = 1 \quad \text{per} \quad 1 \leq k < m$
2. $\pi_m(\mathcal{S}^m) \simeq \mathbb{Z} \quad \text{per} \quad k = m$
3. $\pi_1(\mathcal{S}^2) = 1$
4. $\pi_2(\mathcal{S}^2) \simeq 1$

Anche se non so calcolare i gruppi di omotopia superiore non vorrei buttarli via...

1.1.3 Omologia

Uso la teoria dell'omologia che mi permette di semplificare i problemi. Ci sono varie possibilità:

- Omologia simpliciale
- Omologia cellulare
- Omologia singolare
- Omologia persistente[1]

Ma cosa è l'omologia?

Definitione 1.14 *In $\mathbb{R}^{k+1}$ si definisce il* ***simplesso standard*** Δ_k *l'insieme:*

$$\Delta_k = \{ (x_1, x_2, \dots) \in \mathbb{R}^{k+1} \mid \forall i \quad 0 \leq x_i \leq 1 \ e \ \sum_{i=1}^{k+1} x_i = 1 \}$$

Osservazione 1.15 *Alcuni esempi sono:*

- Δ_0 *è un punto.*
- Δ_1 *è un segmento omeomorfo a* $[0, 1]$. *[FIGURA]*

Definitione 1.16 *Dato uno spazio topologico X si definisce il* ***k-simplesso singolare*** *in X come un'applicazione continua $g : \Delta_k \to X$.*

Spesso conviene identificare il k-simplesso con la sua immagine in X. In quesot modo uno 0-simplesso è un punto in X, mentre un 1-simplesso singolare potrebbe essere sia un segmento che un punto (se la mappa è costante). Siccome il simplesso deforma è detto singolare.

Voglio costruire un complesso di gruppi abeliani e definire l'omologia singolare come l'omologia di tale complesso.

$S.$ è il compesso, cioè: $\cdots \to S_{k+1}(X) \to S_k() \to S_{k-1} \to \cdots \to S_0(X)$, dove

$$S_k(X) = \{\text{combinazioni lineari finite a coefficienti interi:} \\ \sum_g n_g g \mid n_g \in \mathbb{Z}, g \ k-\text{simplessi singolari di } X\}$$

$S_k(X)$ è un gruppo abeliano con l'operazione somma definita naturalmente:

$$\sum_g n_g g + \sum_h n_h = \sum_g n_g g + \sum_g n_g^\star = \sum_g (n_g + n_g^\star) g$$

Ad esempio:

$$(n_1 g_1 + n_2 g_2 + 2n_3 g_3) + (m_1 g_1 + m_4 g_4) = (n_1 + m_1) g_1 + n_2 g_2 + 2n_3 g_3 + m_4 g_4$$

[1] Questa ha numerose applicazioni pratiche.

Questa è una somma con tutte le giuste proprietà. Lo zero è la catena con tutti i coefficienti nulli, mentre l'inverso è la catena con i coefficienti opposti. Queste catene sono chiamate **k-catene singolari**.

Ad esempio: Se $k = 0$ $S_0(X)$ sono catene di punti ($g_0 : \Delta_0 \to X$)

$$S_0(X) = \{ \sum n_i p_i \mid n_i \in \mathbb{Z},\ p_i \in X \}$$

Ora devo introdurre le applicazioni tra i vari S_k, queste applicazioni saranno il bordo.

Definisco $h : \Delta_1 \to X$ in modo tale che $h(\Delta) = \alpha$ dove α è un arco, ovvero una funzione da un intervallo $I = [0, 1]$ a X tale che $\alpha(0) = x_0$ e y_0.

[FIGURA]

Posso ottenere una 0-catena prendendo i punti estremi dell'arco.

Definitione 1.17 *Sia Δ_k un k-simplesso standard con $k \geq 0$ si definisce l'operatore **faccia** come la mappa ${F_i}^k$ da Δ_{k-1} a Δ_k tale che ${F_i}^k(\Delta_{k-1})$ è una faccia di Δ_k.*

Ad esempio per $k = 2$ $\Delta_2 = \{ (x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \mid x_1 + x_2 + x_3 = 1,\ 0 \leq x_i \leq 1\ \forall i \}$, si definisce la base $e_0 = (1, 0, 0)$ $e_1 = (0, 1, 0)$ $e_2 = (0, 0, 1)$, voglio vedere il bordo del triangolo come facce. [FIGURA, CONSIDERAZIONI]

Esercizio 1 *Dimostrare che se $[\cdot,\cdot]$ indica l'inviluppo convesso allora:*

1. *Per $j > i$ vale che ${F_i}^{k+1} \circ {F_i}^k = [e_0, \ldots, e_i, \ldots, e_j, \ldots, e_k]$.*
2. *Per $j \leq i$ vale che ${F_i}^{k+1} \circ {F_i}^k = [e_0, \ldots, e_j, \ldots, e_{i+1}, \ldots, e_k]$.*

Dato un k-simplesso singolare $\sigma : \Delta_k \to X$ si definisce la mappa $\sigma^{(i)} = \sigma \circ {F_i}^k$.

[FIGURA]

Definitione 1.18 *Si definisce il **bordo** di un k-simplesso singolare come $\partial_k\sigma = \sum_{i=0}^{k} (-)^i \sigma^{(i)}$.*

Per $k = 1$ $\partial_1\sigma = p_1 - p_0$ infatti $\sigma^0 = \sigma \circ {F_0}^1 = \sigma(1) = p_1$ e $\sigma^0 = \sigma \circ {F_1}^1 = \sigma(0) = p_0$.[2]

Allora definisco $\partial_k : S_k(X) \to S_{k-1}(X)$ infatti per linearità $\partial_k \left(\sum_g n_g g \right) = \sum_g n_g \partial_k g$.

Devo mostrare che ∂_k è un omomorfismo.

Dimostrazione:

$$\partial_k \left(\sum_g n_g g + \sum_g m_g g \right) = \partial_k \left(\sum_g (m_g + n_g) g \right) = \sum_g (m_g + n_g) \partial_k g =$$

$$= \sum_g n_g \partial_k g + \sum_g m_g \partial_k g = \partial_k \left(\sum_g n_g g \right) + \partial_k \left(\sum_g m_g g \right)$$

[2] Tecnicamente si intende $p_0 = \partial_1\sigma^{(0)}(1)$ e $p_1 = \partial_0\sigma^{(1)}(1)$.

■

Quindi il complesso è costituito da:

$$\dots \xrightarrow{\partial_{k+1}} S_k(X) \xrightarrow{\partial_k} S_{k-1}(X) \xrightarrow{\partial_{k-1}} \dots$$

Devo verificare che $\partial_k \circ \partial_{k+1} =$. Spesso come notazione si pone $\partial^2 = 0$.
Dimostrazione: Se σ è un k-complesso singolare $\sigma : \Delta_k \to X$:

$$\begin{aligned}
&\partial_k \circ \partial_{k+1}\sigma = \partial_k \left(\sum_{j=0}^{k+1} (-)^j (\sigma \circ F_j{}^{k+1}) \right) = \sum_{j=0}^{k+1} (-)^j \partial_k (\sigma \circ F_j{}^{k+1}) &&= \\
&= \sum_{j=0}^{k+1} (-)^j \sum_{i=0}^{k} (-)^i (\sigma \circ F_j{}^{k+1}) \circ F_i{}^k = \sum_{j=0}^{k+1} \sum_{i=0}^{k} (-)^{j+i} \sigma \circ F_j{}^{k+1} \circ F_j{}^k &&= \\
&= \sum_{0 \leq i < j \leq k+1} (-)^{i+j} \sigma \circ F_j{}^{k+1} \circ F_i{}^k + \sum_{0 \leq j < i \leq k} (-)^{i+j} \sigma \circ F_j{}^{k+1} \circ F_i^k &&= \\
&= \sum_{0 \leq i < j \leq k+1} (-)^{i+j} \sigma \circ F_j{}^{k+1} \circ F_i{}^k + \sum_{0 \leq j < i \leq k} (-)^{i+j} \sigma \circ F_{i+1}^{k+1} \circ F_j{}^k &&= \\
&= 0
\end{aligned}$$

■

Topologia Algebrica **2016/2017**

Lezione 2: 4 Ottobre

Agomenti: Banane

Topologia Algebrica **2016/2017**

Lezione 3: 6 Ottobre

Agomenti: Banane

3.1.4 Richiami sul gruppo fondamentale

Definitione 3.19 *Sia X uno spazio topologico e $x_0 \in X$ un suo punto, allora la coppia (X, x_0) è detta spazio topologico puntato.*

Definitione 3.20 *Sia (X, x_0) uno spazio topologico puntato e $f : I \to X$ una mappa continua tale che $f(0) = f(1) = x_0$ $\forall t \in I$, si dice che una funzione continua g è **omotopicamente equivalente** a f ($g \sim_H f$) se esiste una funzione continua $F : I \times I \to X$ tale che;*

- $F(0, x) = f(x)$ $\forall x \in I$
- $F(1, x) = g(x)$ $\forall x \in I$
- $F(s, 0) = x_0$ $\forall s \in I$
- $F(s, 1) = x_0$ $\forall s \in I$

La relazione $\sim_H$ è detta relazione di omotopia e si dimostra essere una relazione di equivalenza.

[FIGURA]

Si definisce l'insieme;

$$\pi_i(X, x_0) = {\{ f : I \to X \mid f \text{ continua}, f(0) = f(1) = x_0 \}}\big/_{\sim_H}$$