Appunti Algebra 1

APPUNTI DEL CORSO DI ALGEBRA 1 TENUTO
DALLA PROF. DEL CORSO E DAL PROF. LOMBARDO

Diego Monaco
d.monaco2@studenti.unipi.it

Anno Accademico 2022-23

Indice

1 Automorfismi **4**
1.1 Automorfismi di G 4
1.2 Automorfismi interni 4
1.3 Azione di un gruppo su un insieme 9
1.4 Azione di coniugio 13
1.5 Applicazioni ai p-gruppi 14
1.6 Teorema di Cauchy 15
1.7 Azione di coniugio su un sottogruppo 16
1.8 Teorema di Cayley 17
1.9 Permutazioni 20
1.10 Classi di coniugio in S_n 26

Ringraziamenti

Federico Allegri, Pietro Crovetto, Davide Ranieri, Francesco Sorce.

§1 Automorfismi

§1.1 Automorfismi di G

Dato un gruppo G possiamo definire l'insieme degli automorfismi di G come segue:

$$\mathrm{Aut}(G) = \{\varphi : G \longrightarrow G | \, \varphi \, \text{isomorfismo}\}$$

si verifica facilmente che $(\mathrm{Aut}(G), \circ)$ è un gruppo, e in particolare $\mathrm{Aut}(G) \leqslant S(G)$, ovvero il gruppo delle permutazioni di G. Si osserva che $id \in \mathrm{Aut}(G)$, $\varphi \in \mathrm{Aut}(G) \implies \varphi^{-1} \in \mathrm{Aut}(G)$ e $\varphi, \psi \in \mathrm{Aut}(G) \implies \varphi \circ \psi \in \mathrm{Aut}(G)$.

Esempio 1.1 (Esempi di automorfismi)
Esempi di insiemi di automorfismi:

- $\mathrm{Aut}(\mathbb{Z}) = \{\pm id\}$.
- $\mathrm{Aut}(\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}) \cong \mathbb{Z}/n\mathbb{Z}^*$.
- $\mathrm{Aut}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}) \cong S_3$.
- $\mathrm{Aut}(\underbrace{\mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \times \ldots \times \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}}_{n \text{ volte}}) \cong GL_n(\mathbb{F}_p)$

§1.2 Automorfismi interni

Definizione 1.2. Dato un gruppo G possiamo definire l'omomorfismo di **coniugio**:

$$\varphi_g : G \longrightarrow G : x \longmapsto gxg^{-1}$$

dove l'elemento gxg^{-1} si dice **coniugato** di g.

Proposizione 1.3
Valgono i seguenti fatti:

(1) $\varphi_g \in \mathrm{Aut}(G)$, $\forall g \in G$.

(2) $\{\varphi_g | g \in G\} = \mathrm{Inn}(G) \trianglelefteq \mathrm{Aut}(G)$.[a]

[a] $\mathrm{Inn}(G)$ si definisce **gruppo degli automorfismi interni**.

Dimostrazione. Proviamo le due affermazioni:

(1) Per verificare che φ_g è un automorfismo bisogna verificare che φ_g è ben definita, ma ciò segue dalla chiusura di g per l'operazione. Verifichiamo che sia un omomorfismo:

$$\varphi_g(xy) = gxyg^{-1} = gxg^{-1}gyg^{-1} = \varphi_g(x)\varphi_g(y) \qquad \forall x, y \in G$$

ci resta da verificare che sia una bigezione. Partiamo dalla surgettività, vogliamo verificare che $\forall y \in G$, $\exists g \in G$:

$$\varphi_g(x) = y$$

in tal caso basta prendere $x = gyg^{-1} \in G$. Per l'iniettività si osserva:

$$\ker \varphi_g = \{x \in G | \varphi_g(x) = e\} = \{x \in G | gxg^{-1} = e \iff x = e\} = \{e\}$$

pertanto φ_g è iniettivo.

(2) Verifichiamo che $\mathrm{Inn}(G) \trianglelefteq \mathrm{Aut}(G)$; mostriamo prima che $\mathrm{Inn}(G)$ è un sottogruppo di $\mathrm{Aut}(G)$, infatti: $id = \varphi_e \in \mathrm{Inn}(G)$, $\forall g_1, g_2 \in G$ vale che $\varphi_{g_1} \circ \varphi_{g_2} = \varphi_{g_1 g_2} \in \mathrm{Inn}(G)$, infatti:

$$\varphi_{g_1} \circ \varphi_{g_2}(x) = \varphi_{g_1}(g_2 x g_2^{-1}) = g_1 g_2 x g_2^{-1} g_1^{-1} = \varphi_{g_1 g_2}(x)$$

infine, $(\varphi_g)^{-1} = \varphi_{g^{-1}} \in \mathrm{Inn}(G)$:

$$(\varphi_g)^{-1} \circ \varphi_g(x) = (\varphi_g)^{-1}(g x g^{-1}) = x \iff (\varphi_g)^{-1} = \varphi_{g^{-1}}$$

e analogamente per l'inversa a destra. Per verificare la normalità bisogna mostrare che:

$$f \circ \mathrm{Inn}(G) \circ f^{-1} \subseteq \mathrm{Inn}(G) \qquad \forall f \in \mathrm{Aut}(G)$$

ovvero:

$$f \circ \varphi_g \circ f^{-1} \in \mathrm{Inn}(G) \qquad \forall f \in \mathrm{Aut}(G), \forall \varphi_g \in \mathrm{Inn}(G)$$

si osserva che $f \circ \varphi_g \circ f^{-1} = \varphi_{f(g)} \in \mathrm{Inn}(G)$, infatti:

$$f \circ \varphi_g \circ f^{-1}(x) = f(\varphi_g(f^{-1}(x))) = f(g(f^{-1}(x))g^{-1}) =$$

$$= f(g) f(f^{-1}(x)) f(g^{-1}) = f(g) x (f(g))^{-1} = \varphi_{f(g)}$$

□

Osservazione 1.4 — Se G è abeliano, allora $\mathrm{Inn}(G) = \{id\}$, infatti:

$$g x g^{-1} = g g^{-1} x = x \qquad \forall x \in G, \forall g \in G$$

Proposizione 1.5
Dato un gruppo G si ha:

$$\mathrm{Inn}(G) \cong G/Z(G)$$

Dimostrazione. Per dimostrare il teorema ci basta trovare un omomorfismo surgettivo da G in $\mathrm{Inn}(G)$ e poi sfruttare il Primo Teorema di Omomorfismo. Sia:

$$\phi : G \longrightarrow \mathrm{Inn}(G) : g \longmapsto \varphi_g$$

tale applicazione è chiaramente ben definita, ed è surgettiva per come abbiamo definito $\mathrm{Inn}(G)$. Verifichiamo che è un omomorfismo:

$$\phi(g_1 g_2) = \varphi_{g_1 g_2} = \varphi_{g_1} \circ \varphi_{g_2} = \phi(g_1) \circ \phi(g_2) \qquad \forall g \in G$$

dove la penultima uguaglianza è vera per quanto visto nella dimostrazione del (2) della proposizione precedente. A questo punto, per il primo teorema di omomorfismo si ha che:

$$\begin{tikzcd} G \arrow[r, two heads, "\phi"] \arrow[d, two heads, "\pi_{\ker\phi}"'] & \mathrm{Inn}(G) \\ G/\ker\phi \arrow[ur, "\sim"] & \end{tikzcd}$$

dunque:

$$\frac{G}{\ker\phi} \cong \mathrm{Inn}(G)$$

non ci resta che osservare:

$$\ker\phi = \{g \in G | \phi(g) = \varphi_g = id\} = \{g \in G | gxg^{-1} = x, \forall x \in G\} = \\ = \{g \in G | gx = xg, \forall x \in G\} = Z(G)$$

□

Osservazione 1.6 — L'isomorfismo trovato è del tipo $gZ(G) \longmapsto \varphi_g$, ricordiamo che è ben definito per il Primo Teorema di Omomorfismo.

Osservazione 1.7 — Si ricorda che se ${G}/{Z(G)}$ è ciclico, allora G è abeliano (e quindi ${G}/{Z(G)}$ è banale), infatti, sia:

$${G}/{Z(g)} = \langle gZ(G)\rangle$$

Presi $g_1, g_2 \in G$, si ha che $g_1Z(G) = g^{k_1}Z(G)$ e $g_2Z(G) = g^{k_2}Z(G)$, da cui:

$$g^{-k_1}g_1Z(G) = Z(G) \iff g^{-k_1}g_1 \in Z(G)$$

ovvero $\exists z_1 \in Z(G) : g_1 = g^{k_1}z_1$ e analogamente $g_2 = g^{k_2}z_2$, da cui:

$$g_1g_2 = g^{k_1}z_1g^{k_2}z_2 = g^{k_1}g^{k_2}z_1z_2 = g^{k_1+k_2}z_1z_2$$

e contemporaneamente:

$$g_2g_1 = g^{k_2}z_2g^{k_1}z_1 = g^{k_2}g^{k_1}z_2z_1 = g^{k_2+k_1}z_2z_1 = g^{k_1+k_2}z_1z_2$$

dove nell'ultimo passaggio si è sfruttato il fatto che $k_1, k_2 \in \mathbb{Z}$ e $z_1, z_2 \in Z(G)$. Da ciò segue che G è abeliano.

Osservazione 1.8 — Dunque $\mathrm{Inn}(G)$ ciclico $\implies {G}/{Z(G)}$ ciclico $\implies G$ abeliano da cui:

$$\mathrm{Inn}(G) \cong {G}/{Z(G)} \cong \{e\}$$

Osservazione 1.9 — $N \trianglelefteq G \iff \forall\varphi_g \in \mathrm{Inn}(G)$ si ha $\varphi_g(N) = N$ (o anche $\varphi_g(N) \subseteq N$). Equivalentemente, i sottogruppi normali di G sono i sottogruppi **invarianti** per automorfismi interni (ovvero sono tali che $gNg^{-1} = N$, $\forall g \in G$). Se $N \trianglelefteq G$, si può considerare:

$$\mathrm{Inn}(G) \longrightarrow \mathrm{Aut}(N) : \varphi_g \longmapsto \varphi_{g|N}$$

con $\varphi_{g|N} : N \longrightarrow N$ che è un automorfismo, infatti rimane iniettivo, la surgettività segue dal fatto che $\varphi_g(N) = N$, e infine, essendo φ_g un omomorfismo su tutti gli elementi di G, lo sarà in particolare anche su tutti gli elementi di N. Dunque quando si ha un sottogruppo normale, ogni automorfismo interno si restringe a un automorfismo di N.

Abbiamo visto che i sottogruppi normali sono invarianti per automorfismi interni, possiamo generalizzare quest'idea e considerare i sottogruppi invarianti per automorfismi:

Definizione 1.10. Dato un sottogruppo $H \leqslant G$, esso si dice **caratteristico** se è invariante per automorfismi:

$$f(H) = H \qquad \forall f \in \operatorname{Aut}(G)$$

Anche in questo caso basta verificare che $f(H) \subseteq H$, $\forall f \in \operatorname{Aut}(G)$, perché si ha anche che:

$$f^{-1}(H) \subseteq H$$

da cui si ottiene:

$$f(f^{-1}(H)) \subseteq f(H)$$

Osservazione 1.11 — Si osserva che se H è caratteristico in G, allora è invariante per tutti gli automorfismi di G (e quindi in particolare quelli interni), dunque se H è caratteristico in G, allora è anche normale. Il viceversa è falso.

Osservazione 1.12 — Se H è caratteristico in G (dunque normale), si può scrivere un'applicazione:

$$\operatorname{Aut}(G) \longrightarrow \operatorname{Aut}(H) : f \longmapsto f_{|H}$$

dove $f_{|H}$ è un automorfismo di H.

Osservazione 1.13 — Si osserva che se H è l'unico sottogruppo di G di un certo ordine, allora H è caratteristico in G (segue immediatamente dal fatto che gli automorfismi preservano gli ordini degli elementi).

Esercizio 1.14. Il centro di un gruppo, $Z(G)$ è un sottogruppo caratteristico.

Soluzione. Per dimostrare che $Z(G)$ è caratteristico è sufficiente far vedere che:

$$f(Z(G)) \subseteq Z(G) \qquad \forall f \in \operatorname{Aut}(G)$$

ovvero:

$$f(z) \in Z(G) \qquad \forall f \in \operatorname{Aut}(G), \forall z \in Z(G)$$

dunque bisogna verificare che:

$$gf(z) = f(z)g \qquad \forall g \in G$$

poiché f è un automorfismo, allora $\exists h \in G : f(h) = g$, dunque:

$$gf(z) = f(h)f(z) = f(hz) = f(zh) = f(z)f(h) = f(z)g \qquad \forall g \in G$$

□

Esempio 1.15

Sia $G = \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} = \{(\overline{0},\overline{0}),(\overline{1},\overline{0}),(\overline{0},\overline{1}),(\overline{1},\overline{1})\}$, G ha ordine 4 ed ha tre sottogruppi ciclici di ordine 2:

$$H_1 = \langle(\overline{1},\overline{0})\rangle \qquad H_2 = \langle(\overline{0},\overline{1})\rangle \qquad H_3 = \langle(\overline{1},\overline{1})\rangle$$

ed essendo G abeliano si ha $H_1, H_2, H_3 \trianglelefteq G$ (e quindi i sottogruppi sono invarianti per automorfismi interni). Tuttavia nessuno dei sottogruppi è caratteristico, infatti possiamo prendere un automorfismo non banale (e quindi non uno interno) e vedere come i sottogruppi di questo tipo non siano invarianti:

$$f = \begin{cases} (\overline{1},\overline{0}) \longmapsto (\overline{1},\overline{1}) \\ (\overline{0},\overline{1}) \longmapsto (\overline{0},\overline{1}) \end{cases}$$

la definizione della mappa data tuttavia non è completa, perché abbiamo stabilito solo dove vengono mandati i generatori, dobbiamo definire cosa faccia un elemento generico:

$$f((\overline{a},\overline{b})) = af((\overline{1},\overline{0})) + bf((\overline{0},\overline{1})) = (\overline{a},\overline{a}) + (\overline{0},\overline{b}) = (\overline{a},\overline{a+b})$$

a questo punto abbiamo definito completamente l'applicazione (rimarrebbe da verificare che f sia un omomorfismo), e si verifica facilmente che $f(H_1) = H_3$ quindi $H_1 \trianglelefteq G$, ma non caratteristico.

A questo punto è facile verificare che:

$$\mathrm{Aut}(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}) \cong S_3$$

infatti, ogni automorfismo del gruppo si ottiene fissando l'elemento neutro $(\overline{0},\overline{0}) \longmapsto (\overline{0},\overline{0})$, quindi il numero possibile di bigezioni è al più 3!, occorre verificare che tutte e 6 le funzioni sono omomorfismi. Dimostriamo invece che:

$$\boxed{\mathrm{Aut}(S_3) \cong S_3}$$

Per farlo, poiché S_3 non è abeliano, possiamo osservare che:

$$\mathrm{Inn}(S_3) \cong {}^{S_3}\!\big/_{Z(S_3)} \cong S_3$$

in quanto l'unico elemento che commuta con tutti gli altri in S_3 è l'identità, quindi $Z(S_3) = \{id\} \cong \{e\}$. Per quanto detto si ha $\mathrm{Inn}(S_3) \trianglelefteq \mathrm{Aut}(S_3)$ e quindi $\mathrm{Aut}(S_3)$ contiene una copia isomorfa di S_3 come sottogruppo normale, pertanto, se verifichiamo che $|\mathrm{Aut}(S_3)| \leq 6$ abbiamo concluso. Sia $f \in \mathrm{Aut}(S_3)$, f può al più scambiare i 3 elementi di ordine 2, d'altra parte, fissate le immagini di τ_1, τ_2, τ_3[1], i due 3-ciclci[2] sono completamente determinati, ciò significa che si hanno al più 3! automorfismi, dunque:

$$\mathrm{Aut}(S_3) = \mathrm{Inn}(S_3) \cong S_3 \implies \mathrm{Aut}(S_3) \cong S_3$$

[1] Con τ_i si intendono le trasposizioni che lasciano fisso l'elemento i.
[2] Come si vedrà $S_3 = \langle \tau_1, \tau_2, \tau_3 \rangle$

§1.3 Azione di un gruppo su un insieme

Definizione 1.16. Sia G un gruppo e X un insieme, un'**azione** di G su X è un omomorfismo:

$$\varphi : G \longrightarrow S(X) : g \longmapsto \varphi_g$$

dove $\varphi_g : X \longrightarrow X : x \longmapsto \varphi_g(x)$[3], con φ_g bigettiva, $\forall g \in G$. Si può definire un'azione anche come:

$$\varphi : G \times X \longrightarrow X : (g, x) \longmapsto \varphi_g(x)$$

Un'azione di G su X si indica con $G \circlearrowleft X$.

Esempio 1.17

Sia $X = G$, quindi $\varphi : G \longrightarrow S(G) : g \longmapsto \varphi_g$, con φ_g coniugio, φ è un'azione. Come si è visto nell'(1) della Proposizione 1.3 φ_g è un automorfismo di G (e quindi una bigezione), e φ è un omomorfismo. In questo caso si ha che:

$$\varphi_g(x) = gxg^{-1}$$

Esempio 1.18

Sia V un K-spazio vettoriale, sia:

$$\varphi : K^* \longrightarrow S(V) : \lambda \longmapsto \varphi_\lambda$$

con $\varphi_\lambda : V \longrightarrow V : \underline{v} \longmapsto \lambda\underline{v}$, φ è un'azione di K^* su V.

Sia $\varphi : G \longrightarrow S(X)$ un'azione, φ definisce una relazione di equivalenza su X:

$$x \sim y \iff \exists g \in G : \varphi_g(x) = y$$

ovvero due elementi sono in relazione se esiste un'applicazione $\varphi_g \in S(X)$, per cui un elemento è l'immagine dell'altro mediante tale applicazione. La relazione è appunto di equivalenza, infatti: $x \sim x$, per $g = e$ si ha (essendo φ un omomorfismo) $\varphi_e(x) = id(x) = x$, $x \sim y \implies y \sim x$:

$$\varphi_g(x) = y \implies x = (\varphi_g(y))^{-1} = \varphi_{g^{-1}}(y)$$

infine $x \sim y$, $y \sim z \implies x \sim z$, infatti si avrebbe: $\varphi_g(x) = y$, $\varphi_h(y) = z$ da cui:

$$z = \varphi_h(\varphi_g(x)) = \varphi_{hg}(x) \implies x \sim z$$

Definizione 1.19. Data la relazione di equivalenza $\sim$ si definiscono **orbite** le classi di equivalenza di X rispetto alla relazione $\sim$:

$$\mathrm{Orb}(x) = \{\varphi_g(x) | g \in G\} (\subseteq X)$$

Da cui:

$$X = \bigsqcup_{x \in \mathcal{R}} \mathrm{Orb}(x)$$

Con $\mathcal{R}$ insieme di rappresentanti. Un'orbita è quindi l'insieme di tutte le immagini di un elemento in un insieme, mediante tutte le possibili applicazioni (permutazioni) dell'insieme $\varphi(G)$.

[3] Alternativamente si può indicare l'immagine con $\varphi_g : x \longmapsto g * x$, dove $*$ è l'operazione definita su X.

Definizione 1.20. Per ogni $x \in X$ si dice **stabilizzatore** di x:

$$\mathrm{St}(x) = \{g \in G | \varphi_g(x) = x\}$$

Cioè lo stabilizzatore è l'insieme degli elementi di G, che danno origine mediante φ alle applicazioni $\varphi_g \in S(X)$, che lasciano fisso un determinato elemento.

Esempio 1.21

Se $X = \mathbb{R}^2$ e G è il gruppo di traslazioni di vettore $\underline{v} = (0, l)$, allora:

$$\varphi : G \longrightarrow S(X) : \tau_{(0,l)} \longmapsto \tau_{(0,l)}{}^{a}$$

con:

$$\mathrm{Orb}(x, y) = \{(x, y + l) | l \in \mathbb{R}\} \quad \text{e} \quad \mathrm{St}(x, y) = \{\tau_{(0,l)} | (x, y + l) = (x, y)\} = \{id\}$$

[a] Si osserva che il primo $\lambda_{(0,l)}$ è un elemento del gruppo G, mentre il secondo è un'applicazione bigettiva di X.

Esempio 1.22

Se $X = \mathbb{R}^2$ e G è il gruppo delle rotazioni di centro O, allora:

$$\varphi : G \longrightarrow S(\mathbb{R}^2) : r_\theta \longmapsto r_\theta$$

con:

$$\mathrm{St}(x, y) = \begin{cases} \{id\} & \text{se } (x, y) \neq (0, 0) \\ G & \text{se } (x, y) = (0, 0) \end{cases}$$

e, detta ω la circonferenza di centro O raggio $\sqrt{x^2 + y^2}$:

$$\mathrm{Orb}(x, y) = \{(x', y') \in \mathbb{R}^2 | (x', y') \in \omega\}$$

Proposizione 1.23 ($\mathrm{St}(x) \leqslant G$)

Dato un gruppo G e un'azione $\varphi : G \longrightarrow S(X)$, si ha che $\mathrm{St}(x) \leqslant G$.[a]

[a] In generale lo stabilizzatore non è un sottogruppo normale.

Dimostrazione. Si osserva che $e \in \mathrm{St}(x)$, in quanto $\varphi_e(x) = id(x) = x$, inoltre, presi $g, h \in \mathrm{St}(x)$, ovvero $\varphi_g(x) = \varphi_h(x) = x$, allora:

$$\varphi(gh) = \varphi_{gh}(x) = \varphi_g \circ \varphi_h(x) = \varphi_g(\varphi_h(x)) = \varphi_g(x) = x \implies gh \in \mathrm{St}(x)$$

dove si ha che $\varphi_{gh}(x) = \varphi_g \circ \varphi_h(x)$ in quanto φ è un omomorfismo. Infine, preso $g \in \mathrm{St}(x)$, si ha $g^{-1} \in \mathrm{St}(x)$, infatti φ_g è bigettiva e quindi ammette inversa:

$$(\varphi_g)^{-1} \circ \varphi_g(x) = x \implies (\varphi_g)^{-1}(\varphi_g(x)) = x \implies (\varphi_g)^{-1}(x) = x$$

con $(\varphi_g)^{-1}(x) = (\varphi(g))^{-1}(x) = (\varphi(g^{-1}))(x) = \varphi_{g^{-1}}(x)$ e per quanto detto:

$$\varphi_{g^{-1}}(x) = x \implies g^{-1} \in \mathrm{St}(x)$$

$\square$

Osservazione 1.24 — Sia $x \in X$ e $g, h \in G$, allora:

$$\varphi_g(x) = \varphi_h(x) \iff \varphi_{h^{-1}}(\varphi_g(x)) = x$$

e per le proprietà di omomorfismo dell'azione φ, si ha:

$$\varphi_{h^{-1}}(\varphi_g(x)) = x \iff \varphi_{h^{-1}g}(x) = x \iff h^{-1}g \in \mathrm{St}(x)$$

ovvero $g\,\mathrm{St}(x) = h\,\mathrm{St}(x)$, in quanto $\mathrm{St}(x) \leqslant G$ e la condizione ottenuta è esattamente quella dell'equivalenza modulo $\mathrm{St}(x)$, quindi:

$$\mathrm{Orb}(x) \longleftrightarrow \text{classi laterali di } \mathrm{St}(x) \text{ in } G$$

cioè due elementi danno la stessa immagine se e solo se stanno nella stessa classe laterale modulo $\mathrm{St}(x)$, e la corrispondenza biunivoca tra orbita e classi laterali è data da:

$$g\,\mathrm{St}(x) \longmapsto \varphi_g(x) \qquad \text{e} \qquad h\,\mathrm{St}(x) \longmapsto \varphi_h(x)$$

che è ben definita e per quanto detto all'inizio è iniettiva:

$$\varphi_g(x) = \varphi_h(x) \iff g\,\mathrm{St}(x) = h\,\mathrm{St}(x)$$

(quindi due elementi di un'orbita sono uguali se e solo se lo sono le classi laterali dei rispettivi elementi che generano le applicazioni sono uguali modulo $\mathrm{St}(x)$, duqnue per ogni elemento dell'orbita c'è una classe laterale di $\mathrm{St}(x)$) e surgettiva:

$$\forall y \in \mathrm{Orb}(x), y = \varphi_g(x) \implies g\,\mathrm{St}(x) \longmapsto y$$

e quindi concludiamo che il numero di classi laterali di $\mathrm{St}(x)$ in G è lo stesso della cardinalità di $\mathrm{Orb}(x)$.

Per quanto detto si ha:

$$|G| = |\,\mathrm{St}(x)|[G : \mathrm{St}(x)]$$

ma $[G : \mathrm{St}(x)]$ è il numero di classi laterali di $\mathrm{St}(x)$ in G, che è proprio uguale a $|\,\mathrm{Orb}(x)|$ pertanto vale la seguente:

Proposizione 1.25

Sia G un gruppo finito e X un insieme, allora:

$$|G| = |\,\mathrm{Orb}(x)||\,\mathrm{St}(x)| \qquad \forall x \in X$$

Osservazione 1.26 — Si osserva che essendo $\mathrm{St}(x) \leqslant G$, allora è ovvio (per Lagrange) che $|\,\mathrm{St}(x)| \mid |G|$, tuttavia, per la proposizione precedente, si ha che: $|\,\mathrm{Orb}(x)| \mid |G|$ con $\mathrm{Orb}(x) \subseteq X$.

Ricordando che:

$$X = \dot{\bigcup_{x \in \mathcal{R}}} \operatorname{Orb}(x)$$

se $|X| < +\infty$ si ha:

$$\boxed{|X| = \sum_{x \in \mathcal{R}} |\operatorname{Orb}(x)| = \sum_{x \in \mathcal{R}} \frac{|G|}{|\operatorname{St}(x)|}}$$

§1.4 Azione di coniugio

Definizione 1.27. Si parla di **azione di coniugio**, quando si ha un'azione di G su G stesso:

$$\varphi : G \longrightarrow \text{Inn}(G)(\trianglelefteqslant S(G)) : g \longrightarrow \varphi_g$$

Abbiamo già osservato che è un'azione (ovvero che φ è un omomorfismo). In questo caso:

$$\text{Orb}(x) = \{\varphi_g(x) | g \in G\} = \{gxg^{-1} | g \in G\} = C_x$$

dove C_x prende il nome di **classe di coniugio** di x. Mentre:

$$\text{St}(x) = \{g \in G | \varphi_g(x) = gxg^{-1} = x\} = Z_G(x)$$

dove $Z_G(x)$ si dice **centralizzatore** di x. Per quanto detto in precedenza si ha:

$$|G| = |C_x||Z_G(x)|$$

In particolare $|C_x| \mid |G|$ e :

$$|G| = \sum_{x \in \mathcal{R}} |C_x| = \sum_{x \in \mathcal{R}} \frac{|G|}{|Z_G(x)|}$$

Osservazione 1.28 — C_x è un sottoinsieme, non un sottogruppo di G, poiché non c'è mai l'identità.

Osservazione 1.29 — Osserviamo che $Z_G(x) = G \iff x \in Z(G)$, infatti la per un elemento del centro si ha che $\forall g \in G$ l'elemento commuta, e dunque il suo centralizzatore è tutto il gruppo.

Osservazione 1.30 — Per un'azione di coniugio ha che $x \in Z(G)$ se e solo se $\text{Orb}(x) = \{x\}$ (ovvero $\varphi_g(x) = x$, $\forall g \in G$).

$$|G| = \sum_{x \in Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|} + \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|}$$

ma, per quanto detto, se $x \in Z(G)$, allora $\dfrac{|G|}{|Z_G(x)|} = |C_x| = \{x\}$, segue dunque la relazione:

$$\boxed{|G| = |Z(G)| + \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|}}$$

che prende il nome di **formula delle classi** (di coniugio).

§1.5 Applicazioni ai p-gruppi

Definizione 1.31. Si definisce **p-gruppo** un gruppo di ordine p^n, con p primo e $n \geq 1$.

Se G è un p-gruppo la formula delle classi diventa:

$$p^n = |G| = |Z(G)| + \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|}$$

con $|Z(G)| = p^z$, $0 \leq z \leq n$, facciamo due osservazioni fondamentali:

(1) Il centro di un p-gruppo non è mai banale, infatti, se osserviamo la formula delle classi, si ha:

$$p^n = |Z(G)| + \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|} \implies |Z(G)| + \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|} \equiv 0 \pmod p$$

con $\dfrac{|G|}{|Z_G(x)|} > 1$, poiché se un elemento sta nel centro tutti gli addendi sono 1 per quanto detto, viceversa deve essere che $\dfrac{|G|}{|Z_G(x)|} = p^k x$, $k > 0$, poiché G è un p-gruppo, dunque:

$$|Z(G)| \equiv 0 \pmod p \implies |Z(G)| \geq 2$$

e quindi il centro di un p-gruppo non è mai banale.

(2) Un gruppo di ordine p^2 è abeliano, infatti, si ha:

$$|G| = p^2 \implies |Z(G)| = \begin{cases} 1 & \text{non può accadere per (1)} \\ p & \text{no perché allora } G/Z(G) \text{ ciclico, ma } G \text{ non è abeliano} \\ p^2 & \end{cases}$$

dunque l'unica possibilità è che $Z(G) = G \iff G$ abeliano.

§1.6 Teorema di Cauchy

Teorema 1.32 (Teorema di Cauchy)
Dato un gruppo G e un primo p, se $p \mid |G|$, allora $\exists x \in G : \mathrm{ord}_G(x) = p$. [a]

[a] Si considera già noto il teorema per gruppi abeliani.

Dimostrazione. Sia $|G| = pn$, procediamo per induzione su n, nel caso $n = 1$ il teorema è ovvio. Supponiamo vera la tesi per i gruppi di ordine pm, con $1 \leq m < n$ e proviamola per n. Distinguiamo due casi:

- Se esiste $H \lneq G$ con $p \mid H$, ovvero $|H| = pm \implies$ vale il teorema di Cauchy per ipotesi induttiva (essendo $m < n$), quindi $\exists x \in H : \mathrm{ord}_H(x) = p$, ma essendo $H \subset G \implies x \in G$ e quindi la tesi è vera.

- Se $\forall H \lneq G$ si ha $p \nmid |H|$, allora si può applicare a G la formula delle classi:

$$pn = |G| = |Z(G)| + \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|}$$

ricordando il centralizzatore di x è uno stabilizzatore (e quindi un sottogruppo di G), si ha $p \nmid |Z_G(x)|$, e quindi:

$$p \left| \sum_{x \in \mathcal{R} \setminus Z(G)} \frac{|G|}{|Z_G(x)|} \right.$$

da cui segue che $p \mid |Z(G)| = |G| - \sum pl_x$, per quanto premesso ($\forall H \lneq G$ si ha $p \nmid |H|$), ed essendo $Z(G) \leqslant G$, l'unica possibilità è che $Z(G) = G$ e vale il teorema poiché è già stato dimostrato per il caso in cui G è abeliano.

□

§1.7 Azione di coniugio su un sottogruppo

Sia $X = \{H \leqslant G\}$ e $\varphi : G \longrightarrow S(X) : g \longmapsto \varphi_g(X)$, con $\varphi_g : X \longrightarrow X : H \longmapsto gHg^{-1}$. Si verifica facilmente che φ è un omomorfismo, per verificare l'iniettività si osserva che:

$$\varphi_g(H) = \varphi_g(K) \iff gHg^{-1} = gKg^{-1} \iff H = K$$

mentre per la surgettività si ha che $\forall H \in X, \exists L \in X$:

$$\varphi_g(L) = H \iff gLg^{-1} = H \implies L = g^{-1}Hg$$

inoltre si ha anche:

$$\mathrm{Orb}(H) = \{\varphi_g(H) | g \in G\} = \{gHg^{-1} | g \in G\} \quad \mathrm{St}(H) = \{g \in G | \varphi_g(H) = H\} = N_G(H)$$

dove $\mathrm{Orb}(H)$ è l'insieme dei coniugati di H, mentre $\mathrm{St}(H) = N_G(H)$ prende il nome di **normalizzatore** di H.

Osservazione 1.33 — Si osserva che $N \trianglelefteq G$ se e solo se $\mathrm{Orb}(H) = \{H\} \iff N_G(H) = G$, ovvero se H è sempre chiuso per coniugio in G.

Per quanto affermato nella Proposizione 1.25 si ha:

$$|G| = |\,\mathrm{Orb}(H)||N_G(H)| \implies |\,\mathrm{Orb}(H)| = \frac{|G|}{|N_G(H)|}$$

Osservazione 1.34 — Quindi in generale, dato $H \leqslant G$ si ha che $\#\{gH\} = [G : H]$ e $\#\{gHg^{-1}\} = [G : N_G(H)]$.

Osservazione 1.35 (Sulla definizione di sottogruppo normale) — I sottogruppi normali possono essere ridefiniti nella maniera seguente, $H \trianglelefteq G$ se e solo se:

$$H = \dot{\bigcup_{h \in H}} C_h$$

cioè un sottogruppo è normale se e solo se è l'unione delle classi di coniugio dei suoi elementi. Infatti:

$$H \trianglelefteq G \iff ghg^{-1} \in H \qquad \forall h \in H, \forall g \in G$$

che equivale a:

$$C_h = \{ghg^{-1} | h \in H\} \subseteq H \quad \forall h \in H \implies \dot{\bigcup_{h \in H}} C_h \subseteq H$$

d'altra parte se H è normale è chiuso per coniugio, ovvero il coniugio di ogni suo elemento è ancora in H ($ghg^{-1} = h'$, $\forall h \in H$) e in particolare ciò significa che:

$$H \subseteq \dot{\bigcup_{h \in H}} C_h$$

§1.8 Teorema di Cayley

Teorema 1.36

Ogni gruppo è isomorfo ad un sottogruppo di un gruppo di permutazioni. In particolare, se $|G| = n$, allora G è isomorfo a un sottogruppo di S_n.

Dimostrazione. Definiamo la mappa:

$$\lambda : G \longrightarrow S(G) : g \longmapsto \varphi_g$$

con $\varphi_g : G \longrightarrow G : g \longmapsto gx$, l'applicazione λ prende il nome di **rappresentazione regolare a sinistra** di G, si vuole dimostrare che λ è un omomorfismo iniettivo. Osserviamo innanzitutto che λ è ben definita, cioè $\varphi_g \in S(G)$, infatti φ_g è iniettiva (segue dalle leggi di cancellazione) e surgettiva, perché $\forall y \in G$, $\exists g^{-1}y \in G : \varphi_g(g^{-1}y) = y$. Verifichiamo che λ è un omomorfismo:

$$\lambda(g_1 g_2) = \varphi_{g_1 g_2}$$

con $\varphi_{g_1 g_2}(x) = \varphi_{g_1} \circ \varphi_{g_2}(x)$, $\forall x \in G$, e quindi:

$$\lambda(g_1 g_2) = \lambda(g_1)\lambda(g_2) \qquad \forall g_1, g_2 \in G$$

infine, per l'iniettività si ha che:

$$\ker \lambda = \{g \in G | \lambda(g) = \varphi_g = id = \varphi_e\} = \{e\}$$

da ciò segue che $G \cong \operatorname{Im}(G) \leqslant S(G)$, e se $|G| = n$ si ha che $\operatorname{Im}(G) \leqslant S_n$. $\square$

Osservazione 1.37 — In generale, dato $G = \{g_1 = e, g_2, \ldots, g_n\}$ e $\lambda : G \longrightarrow S(G) \cong S_n$, si ha che:

$$g_1 = e \longmapsto \lambda_{g_1} : G \longrightarrow G : g_i \longmapsto g_i$$

$$g_2 \longmapsto \lambda_{g_2} : G \longrightarrow G : x \longmapsto g_2 x : g_2^2 x \longmapsto \ldots \longmapsto g_2^{k-1} x$$

con $k = \operatorname{ord}_G(g_2)$. λ_{g_2} può essere rappresentata mediante la notazione dei cicli:

$$(x, g_2 x, \ldots, g_2^{k-1} x)$$

preso poi $y \notin \lambda_{g_2}(G)$, si ha analogamente:

$$(y, g_2 y, \ldots, g_2^{k-1} y)$$

Esempio 1.38
Nel caso in cui $G = \mathbb{Z}/8\mathbb{Z}$ consideriamo l'azione:

$$\lambda : G \longrightarrow S(\mathbb{Z}/8\mathbb{Z}) \cong S_8{}^{a} : \overline{a} \longmapsto \lambda_a$$

che, per quanto visto genera ad esempio le applicazioni:[b]

$$\begin{array}{lll} 1 & \longmapsto \lambda_1 : X \longrightarrow X : a \longmapsto 1 + a \implies & (0, 1, \dots, 7) \\ 2 & \longmapsto \lambda_2 : X \longrightarrow X : a \longmapsto 2 + a \implies & (0, 2, 4, 6)(1, 3, 5, 7) \\ 4 & \longmapsto \lambda_4 : X \longrightarrow X : a \longmapsto 4 + a \implies & (0, 4)(1, 5)(2, 6)(3, 7) \end{array}$$

che permutano gli elementi di X secondo i cicli trovati.

[a] Perché appunto $S(\mathbb{Z}/8\mathbb{Z})$ è l'insieme di permutazioni di un insieme di 8 elementi.
[b] Per + si intende la somma modulo 8.

Definizione 1.39. Un'azione λ si dice **fedele** se è iniettiva.

Ad esempio l'azione di rappresentazione regolare a sinistra è fedele:

$$\ker \lambda = \{g \in G | \lambda(g) = id\} = \{g \in G | \lambda_g(e) = e\} = \{g \in G | ge = e\} = \{e\}$$

da cui λ fedele.

Osservazione 1.40 — Esiste anche un'applicazione $\rho : G \longrightarrow S(G)(\cong S_n)$, $(n = |G|)$, detta azione di **rappresentazione regolare a destra**, con:

$$g \longmapsto \rho_g : x \longmapsto xg^{-1}$$

Lemma 1.41
Sia G un gruppo abeliano di ordine n, allora $\forall d \mid n, \exists H \leqslant G : |H| = d$. [a]

[a] La dimostrazione non è stata fatta durante il corso, ma è stata comunque aggiunta per completezza.

Dimostrazione. Si consideri innanzitutto il caso $d = p^k$, p primo, e mostriamolo per induzione: per $k = 1$ la tesi è equivalente al Teorema di Cauchy (anche solo per i gruppi abeliani). Supponiamo la tesi per $k - 1$. Poiché in particolare $p \mid |G|$ scegliamo un sottogruppo H di G di ordine p; tale sottogruppo è normale poiché G è abeliano. $p^{k-1} \mid |G/H| \implies$ per ipotesi induttiva $\exists K \leqslant G,\ |K| = p^{k-1}$.
Prendendo la controimmagine di K tramite la proiezione al quoziente troviamo il sottogruppo di G cercato. A questo punto possiamo scrivere in generale $d = p_1^{k_1} \dots p_s^{k_s}$; per ogni i troviamo sottogruppi H_i di ordini $p_i^{k_i}$ (tutti normali). Si ha quindi che $H_1 H_2 \leqslant G$ per normalità, inoltre $|H_1 \cap H_2| = 1$ poiché l'ordine di un elemento in tale intersezione deve dividere $(p_1^{k_1}, p_2^{k_2}) = 1$. Pertanto $|H_1 H_2| = p_1^{k_1} p_2^{k_2}$. Ragionando per induzione otteniamo che il sottogruppo $H_1 \dots H_k$ ha ordine d come voluto. $\square$

Esercizio 1.42. Sia G un gruppo, se $|G| = p^n$, allora esiste:

$$\{e\} = H_n < H_{n-1} < \ldots < H_1 < G$$

con $H_i \trianglelefteq G$ e $|H_i| = p^{n-i}$, $\forall i \in \{1, \ldots, n\}$.

Soluzione. Procediamo per induzione su n, per $n = 1$ è ovvio, infatti si ha $H_1 = \{e\} \leqslant G$. Supponiamo la tesi vera $\forall 1 \leq k \leq n-1$, osserviamo che G è un p-gruppo, pertanto il suo centro non è banale:

$$|Z(G)| = p^z \qquad z \geq 1$$

sia $\mathcal{G} = {}^{G}\!/\!_{Z(G)}$, essendo $|G/Z(G)| < p^n$ (perché deve essere $|Z(G)| \geq p$), allora vale l'ipotesi induttiva, dunque $|\mathcal{G}| = p^m$, con $m = n - z$ $(< n)$, allora esiste:

$$\mathcal{H}_m = \{e_{\mathcal{G}}\} < \mathcal{H}_{m-1} < \ldots < \mathcal{H}_1 < \mathcal{G}$$

con $|\mathcal{H}_i| = p^{m-i}$ e $\mathcal{H}_i \trianglelefteq \mathcal{G}$. Data la proiezione al quoziente:

$$\pi_{Z(G)} : G \longrightarrow \mathcal{G}$$

per il Teorema di Corrispondenza dei sottogruppi, esiste una bigezione tra i sottogruppi di ${}^{G}\!/\!_{Z(G)}$ e i sottogruppi di G che contengono $Z(G)$, la quale preserva normalità e indice del sottogruppo, pertanto preso $\mathcal{H}_i \leqslant {}^{G}\!/\!_{Z(G)}$ è sufficiente applicare $\pi^{-1}_{Z(G)}$ alla catena scritta sopra, e si trova:

$$Z(G) = \pi^{-1}_{Z(G)}(\mathcal{H}_m) < \ldots < \pi^{-1}_{Z(G)}(\mathcal{H}_1) < \pi^{-1}_{Z(G)}(\mathcal{G})(= G)$$

Segue per il teorema di corrispondenza che $\pi^{-1}_{Z(G)}(\mathcal{H}_i) = H_i \trianglelefteq G$, ovvero si preserva la normalità dei sottogruppi, inoltre, segue sempre dal teorema che:

$$p^i = [\mathcal{G} : \mathcal{H}_i] = [G : H] = p^i$$

dunque la catena esiste e $|H_i| = p^{n-i}$ per $1 \leq i \leq m$, essendo $Z(G)$ abeliano, i sottogruppi di ogni suo ordine (che esistono sempre per il Lemma Di Ranieri) sono normali in $Z(G)$, inoltre $|Z(G)| = p^z$ (dunque si hanno sottogruppi normali di ordine p^l per $l \mid z$), pertanto esiste la catena:

$$\{e\} = H_n < \ldots < H_m = Z(G) \qquad \text{con } |H_j| = p^{n-j}, \forall m \leq j \leq n$$

bisogna infine verificare che $H_j \trianglelefteq G$, dunque:

$$gH_jg^{-1} = H_j \qquad \forall g \in G$$

ma $H_j \subset Z(G)$ (sta nel centro, quindi è invariante per coniugio con tutti i $g \in G$, e in particolare quelli richiesti) dunque è sempre verificata l'ultima uguaglianza. $\square$

§1.9 Permutazioni

Ricordiamo brevemente che:

Definizione 1.43. Dato un insieme X si definsce **permutazione** un'applicazione bigettiva di X in se stesso.

Indichiamo con $S(X)$ il gruppo delle permutazioni di X e con S_n il gruppo delle permutazioni di un insieme di cardinalità n, che per semplicità indichiamo con $\{1, \dots, n\}$. Le permutazioni si possono indicare in vari modi, ad esempio, preso $\sigma \in S_{12}$ si può rappresentare mediante la matrice di permutazione:

$$\sigma = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 \\ 3 & 2 & 4 & 5 & 1 & 9 & 8 & 7 & 6 & 12 & 11 & 10 \end{pmatrix}$$

o anche con la notazione dei cicli:

$$\sigma = (1\ 3\ 4\ 5)(6\ 9)(7\ 8)(10\ 12)$$

ogni ciclo prende il nome di ***k*-ciclo** (dove k indica la sua lunghezza), come si osserva i cicli di lunghezza 1 sono stati omessi, in quanto lasciano fissi gli elementi, inoltre, i 2-cicli prendono il nome di **trasposizioni**. Formalmente, sia $\sigma \in S_n$ una permutazione di un insieme di n elementi, possiamo considerare l'insieme X, con $|X| = n$, il gruppo $G = \langle\sigma\rangle$ e definire l'azione:

$$\varphi : G = \langle\sigma\rangle \longrightarrow S(X) \cong S_n : \sigma \longmapsto \sigma$$

con $\sigma \in S_n$ e $\sigma : i \longmapsto \sigma(i)$. Osserviamo quindi che:

$$\mathrm{Orb}(x) = \{\sigma(x) | \sigma \in \langle\sigma\rangle\} = \{\sigma^l(x) | l \in \mathbb{N}\} = \{x, \sigma(x), \sigma^2(x), \dots, \sigma^{m-1}(x)\}$$

con $|\mathrm{Orb}(x)| = m_x$, con $m_x = \min\{k > 0 | \sigma^k(x) = x\}$, perché se $\sigma^k(x) = x$, allora $\sigma^{k+1}(x) = \sigma(x)$, pertanto, sia $k \in \mathbb{N}$ tale che $\sigma^k(x) \in \{x, \dots, \sigma^{k-1}(x)\}$, allora $\exists h :$

$$\sigma^k(x) = \sigma^h(x) \qquad \text{con } 0 \leq h < k$$

Dunque vale che $\sigma^{k-h}(x) = x \in \{x, \dots, \sigma^{k-1}(x)\}$ e per la minimalità di k si ha che $h = 0$. L'azione di $\langle\sigma\rangle$ su X divide X in orbite e su ogni orbita σ agisce ciclicamente (ovvero $\sigma(\mathrm{Orb}(x)) = \mathrm{Orb}(x)$).

Definizione 1.44. Si dice **ciclo** di $\sigma \in S_n$ l'orbita di un elemento $x \in \{1, \dots, n\}$ vista come insieme ordinato:

$$(x, \sigma(x), \dots, \sigma^{m_x - 1}(x))$$

Osservazione 1.45 — Un ciclo di lunghezza k (un k-ciclo) ha k scritturture distinte, in quanto possiamo scegliere arbitrariamente il primo elemento.

Osservazione 1.46 — Data $\sigma \in S_n$, essa è determinata dalle immagini di $\{1, \dots, n\}$, dunque è determinata dai suoi cicli.

Esempio 1.47
Presa ad esempio $\sigma \in S_{10}$:

$$\sigma = (1\ 2\ 3)(4\ 5)(6\ 7\ 8\ 9)$$

chiamiamo i suoi cicli:

$$\sigma_1 = (1\ 2\ 3) \qquad \sigma_2 = (4\ 5) \qquad \sigma_3 = (6\ 7\ 8\ 9)$$

dove appunto $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 \in S_{10}$ e:

$$\sigma = \sigma_1 \circ \sigma_2 \circ \sigma_3$$

Definizione 1.48. Una permutazione si dice **ciclica** se ha un unico ciclo (orbita) non banale.

Osservazione 1.49 — Si osserva che:

- Cicli disgiunti commutano.
- L'ordine di una permutazione ciclica è la lunghezza del suo ciclo:

  $$\sigma = (x_1, \ldots, x_k) \implies \operatorname{ord} \sigma = k$$

  quindi $\sigma^k = id$ e se $d < k$, allora $\sigma^d(x_1) = x_{d+1} \neq x$.

Proposizione 1.50 (Struttura Delle Permutazioni)
Ogni permutazione si scrive in modo unico (a meno dell'ordine e della scrittura di cicli) come prodotto di cicli disgiunti, ovvero come composizione di permutazioni cicliche che agiscono su insiemi disgiunti.

Dimostrazione. I cicli della permutazione sono univocamente determinati in quanto orbite della permutazione, sappiamo che ogni permutazione si scrive come prodotto dei suoi cicli, e per concludere basta osservare che i cicli disgiunti commutano. □

Osservazione 1.51 — Si osserva che l'unicità della scrittura di una permutazione vista nella Proposizione 1.50 è effettivamente valida solo nel caso di cicli disgiunti, infatti, prendendo ad esempio:

$$\sigma = (1\ 2)(2\ 4) \in S_4 \qquad \text{con} \qquad \sigma_1 = (2\ 4) \quad \text{e} \quad \sigma_2 = (1\ 2)$$

non essendo σ_1, σ_2 cicli disgiunti, si osserva che $\sigma_2 \circ \sigma_1 = (2\ 4\ 1)$ e quindi σ era in realtà un 3-ciclo, e la sua fattorizzazione è unica come tale (mentre non era unica come prodotto di cicli non disgiunti).

Corollario 1.52

S_n è generato dalle permutazioni cicliche.

Dimostrazione. Segue immediatamente dal fatto che ogni permutazione si ottiene mediante composizione di permutazioni cicliche. $\square$

Esempio 1.53

Per esempio, preso S_4, le permutazioni possibili sono cicli del tipo:

$$id \qquad (a\ b) \qquad (a\ b\ c) \qquad (a\ b\ c\ d) \qquad (a\ b)(c\ d)$$

per contare il numero di 2-cicli, ci basta scegliere 2 elementi dell'insieme in $\binom{4}{2}$ modi e poi considerare tutti i possibili riordinamenti ciclici (dove la scelta del primo elemento è arbitraria), e ciò può essere fatto in $\frac{2!}{2}$ modi, per un totale di:

$$\binom{4}{2}\frac{2!}{2} = 6$$

e ragionando analogamente per i 3-cicli e i 4-cicli si ottiene:

$$\binom{4}{3}\frac{3!}{3} = 8 \qquad \text{e} \qquad \binom{4}{3}\frac{3!}{3} = 6$$

infine, per quanto riguarda le permutazioni ottenute dalla composizione di due 2-cilci, possiamo scegliere e permutare due coppie di elementi, come nei casi precedenti, tuttavia, essendo i cicli disgiunti commutanto (banlmente perché lasciano fissi gli altri elementi del dominio), quindi bisogna anche dividere per il numero di scambi per i cicli della stessa lunghezza, ovvero 2! dunque:

$$\binom{4}{2}\frac{2!}{2}\binom{2}{2}\frac{2!}{2}\cdot\frac{1}{2!} = 4$$

e dal conteggio delle permutazioni di S_4 divise per cicli di diversa lunghezza si ottiene: $6+8+6+4 = 24 = |S_4|$.

Osservazione 1.54 — Quanto visto nell'esempio precedente può essere generalizzato ottenendo:

$$\#\{\sigma \in S_n | \sigma \text{ è un } k\text{-ciclo}\} = \binom{n}{k}\frac{k!}{k} = \binom{n}{k}(k-1)!$$

Esempio 1.55

Per quanto detto risulta semplice ad esempio calcolare:

$$\#\{\sigma \in S_{20} | \sigma \text{ si fattorizza in cicli del tipo } 2+2+2+4+5+5\}$$

applicando quanto detto nell'osservazione pretendente si trovano:

$$\frac{\binom{20}{2}\binom{18}{2}\binom{16}{2}1!1!1!}{3!} \cdot \binom{14}{4}3! \cdot \frac{\binom{10}{5}\binom{5}{5}4!4!}{2!}$$

Proposizione 1.56 (Ordine Di Una Permutazione)

Data $\sigma \in S_n$ con $\sigma = \sigma_1 \dots \sigma_k$, con σ_i cicli disgiunti, allora:

$$\operatorname{ord} \sigma = [\operatorname{ord} \sigma_1, \dots, \operatorname{ord} \sigma_k]$$

Dimostrazione. Sia σ_i un l_i-ciclo, ovvero $\operatorname{ord} \sigma_i = l_i$, vogliamo dimostrare che:

$$\operatorname{ord} \sigma = [l_1, \dots, l_k] = d$$

osserviamo che $\sigma^d = (\sigma_1 \dots \sigma_k)^d = \sigma_1^d \dots \sigma_k^d$, in quanto i cicli σ_i sono disgiunti (pertanto commutano), essendo $d = [l_1, \dots, l_k] \implies d \mid l_i, \forall \in \{1, \dots, k\}$, pertanto:

$$\sigma^d = \sigma_1^d \dots \sigma_k^d = id \implies \operatorname{ord} \sigma = m \mid d$$

d'altra parte, si ha che:

$$\sigma^m = \sigma_1^m \dots \sigma_k^m = id \iff \sigma_i = id, \forall i \in \{1, \dots, k\}$$

dunque $\operatorname{ord} \sigma_i = l_i \mid m$, $\forall i \in \{1, \dots, k\}$, ovvero $[l_1, \dots, l_k] \mid m$ da cui si conclude che $m = [l_1, \dots, l_k]$. $\square$

Proposizione 1.57

Le trasposizioni generano S_n, $\forall n \geq 3$.

Dimostrazione. Per dimostrare l'affermazione bisogna mostrare che ogni permutazione è prodotto di trasposizioni (in generale non disgiunte). Poiché ogni permutazione, per quanto affermato nella Proposizione 1.50, è il prodotto di cicli (permutazioni cicliche) disgiunti, è sufficiente mostrare che i cicli sono tutti prodotto di trasposizioni, infatti si può osservare che:

$$(1 \ \dots \ k) = (1 \ k)(1 \ k-1) \dots (1 \ 2)$$

dove l'uguaglianza è tra funzioni, quindi ci basta mostrare che danno la stessa immagine. Se $i > k$, allora entrambe le funzioni mandano $i \longmapsto i$, se $i \leq k$, allora la funzione a sinistra manda $i \longmapsto i+1$ e $k \longmapsto 1$, quella a destra lascia fisso i fino al ciclo $(1 \ i)$ che manda $i \longmapsto 1 \longmapsto i+1$ che rimane fisso in $i+1$, mentre $k \longmapsto \dots \longmapsto 1$. $\square$

Osservazione 1.58 — La scrittura di una permutazione come prodotto di trasposzioni non è unica. Ad esempio in S_4:

$$\sigma = (1\ 2)(2\ 4) = (1\ 2)(3\ 4)(3\ 4)(2\ 4)$$

La segeunte proposizione ci mostra invece che è fissata la parità della decomposizione in trasposizioni, cioè se σ si compone come prodotto di m trasposizioni, ogni altra decomposizione come prodotto di trasposizioni ha un numero di trasposizioni con la stessa parità.

Proposizione 1.59

L'applicazione:

$$sgn : S_n \longmapsto \{\pm 1\} : \sigma \longmapsto sgn(\sigma) = \prod_{1 \leq i < j \leq k} \frac{\sigma(i) - \sigma(j)}{i - j}$$

è un omomorfismo di gruppi. Inoltre, se σ è una trasposizione, allora $sgn(\sigma) = -1$.

Dimostrazione. Osserviamo inizialmente che sgn è ben definita cioè:

$$sgn(\sigma) = \prod_{1 \leq i < j \leq k} \frac{\sigma(i) - \sigma(j)}{i - j} \in \{\pm 1\}$$

al denominatore del prodotto vi sono tutte le possibili coppie $i - j$ e anche al numeratore poiché σ è bigettiva, l'unica cosa che può cambiare è l'ordine (ovvero potrebbe comparire $i - j$ al numeratore e $j - i$ al denominatore), quindi $sgn(\sigma) \in \{\pm 1\}$. Mostriamo che sgn è un omomorfismo:

$$sgn(\sigma \circ \tau) = \prod_{i<j} \frac{\sigma(\tau(i)) - \sigma(\tau(j))}{\tau(i) - \tau(j)} \frac{\tau(i) - \tau(j)}{i - j}$$

da cui:

$$\prod_{i<j} \frac{\sigma(\tau(i)) - \sigma(\tau(j))}{\tau(i) - \tau(j)} \frac{\tau(i) - \tau(j)}{i - j} = \underbrace{\prod_{i<j} \frac{\sigma(\tau(i)) - \sigma(\tau(j))}{\tau(i) - \tau(j)}}_{sgn(\sigma)} \underbrace{\prod_{i<j} \frac{\tau(i) - \tau(j)}{i - j}}_{sgn(\tau)} \qquad \forall \sigma, \tau \in S_n$$

Ci resta da verificare che il segno di una trasposizione è -1. Sia $\sigma = (a\ b)$, analizziamo il segno delle varie coppie, distinguiamo le seguenti possibilità:

- $\{i, j\} \cap \{a, b\} = \emptyset$, in tal caso $\sigma(i) = i, \sigma(j) = j \implies \frac{\sigma(i) - \sigma(j)}{i - j} = 1$.
- $\{i, a\}$ (o $\{i, b\}$), in tal caso $\frac{\sigma(i) - \sigma(a)}{i - a} = \frac{i - b}{i - a}$, però vi è anche $\frac{\sigma(i) - \sigma(b)}{i - b} = \frac{i - a}{i - b}$ e quindi il fattore dà 1.
- Infine, nel caso in cui $\{i, j\} = \{a, b\}$ si ha:

$$\frac{\sigma(a) - \sigma(b)}{a - b} = \frac{b - a}{a - b} = -1$$

Dunque si conclude che $sgn((a\ b)) = -1$. $\square$

Osservazione 1.60 — La proposizione appena vista dimostra quanto detto sopra, ovvero:

$$\sigma = \tau_1 \dots \tau_m \qquad \text{con } \tau_i \text{ trasposizione}$$

allora $sgn(\sigma) = \prod_{1 \leq i \leq m} sgn(\tau_i) = (-1)^m$.

Definizione 1.61. Una permutazione $\sigma \in S_n$ si dice **pari** se $sgn(\sigma) = 1$, **dispari** se $sgn(\sigma) = -1$.

Definizione 1.62. Dato l'omomorfismo $sgn : S_n \longmapsto \{\pm 1\}$, si definisce **gruppo alterno**:

$$\mathcal{A}_n = \ker sgn = \{\sigma \in S_n | \, \sigma \text{ è pari}\}$$

Osservazione 1.63 — Si osserva che $\mathcal{A}_n \trianglelefteq S_n$, $|\mathcal{A}_n| = \frac{n!}{2}$ e ${}^{S_n}\!/\!_{\mathcal{A}_n} \cong \{\pm 1\}$.

Osservazione 1.64 — Per quanto detto nella Proposizione 1.57, un k-ciclo si può scrivere nella forma:

$$(1 \ \dots \ k) = \underbrace{(1 \ k)(1 \ k-1) \dots (1 \ 2)}_{k-1 \text{ trasposizioni}}$$

dunque un k-ciclo è pari se $k \equiv 0 \pmod 2$, dispari se $k \equiv 1 \pmod 2$.

§1.10 Classi di coniugio in S_n

Teorema 1.65

Due permutazioni in S_n sono coniugate se e solo se hanno la stessa decomposizione in cicli disgiunti.

Dimostrazione. Mostriamo le due implicazioni:

- Presa $\sigma = (a_1 \ \dots \ a_k)$ e $\tau \in S_n$, vogliamo dimostrare che $\tau \circ \sigma \circ \tau^{-1}$ è ancora un k-ciclo.

- Mostriamo ora che due permutazioni con la stessa fattorizzazione in cicli disgiunti sono coniugate. Siano:

$$\sigma = (a_1 \ \dots \ a_l)(b_1 \ \dots \ b_s)\dots(z_1 \ \dots \ z_t)$$

$$\rho = (a'_1 \ \dots \ a'_l)(b'_1 \ \dots \ b'_s)\dots(z'_1 \ \dots \ z'_t)$$

per dimostrare la tesi è sufficiente trovare $\tau \in S_n$ tale che $\tau \circ \sigma \circ \tau^{-1} = \rho$. Scegliamo τ definita da:

$$\tau(a_i) = a'_i, \tau(b_i) = b'_i, \dots, \tau(z_i) = z'_i$$

ed eventualmente si aggiungono altri elementi. Verifichiamo allora che $\tau \circ \sigma \circ \tau^{-1} = \rho$, consideriamo (WLOG) il primo ciclo:

$$a'_i \xmapsto{\tau^{-1}} a_i \xmapsto{\sigma} a_{i+1} \xmapsto{\tau} a'_{i+1}$$

e quindi $a'_i \longmapsto a'_{i+1}$, pertanto $\tau \circ \sigma \circ \tau^{-1}$ e ρ coincidono sempre.

$\square$

Esempio 1.66

In S_5 le classi di coniugio di $\sigma = (1\ 2)(3\ 4)$ sono $C_\sigma = \{(a\ b)(c\ d) \in S_5\}$, con:

$$\#C_\sigma = \frac{\binom{5}{2}\binom{3}{2}1!1!}{2!} = 15$$

e da ciò si ricava anche che:

$$\#Z_{S_5}(\sigma) = \frac{|S_5|}{|C_\sigma|} = \frac{5!}{15} = 8$$