

# RIASSUNTI DI ALGEBRA

MANUEL DEODATO

## INDICE

<b>1</b>	<b>Teoria dei gruppi</b>	<b>2</b>
1.1	Automorfismi e azioni	2
1.2	I p-gruppi	3
1.3	Teoremi di Cauchy e Cayley	3
1.4	Commutatore e gruppo derivato	3
1.5	Il gruppo diedrale	4
1.6	Il gruppo simmetrico	5
1.7	I quaternioni	7
1.8	Prodotti diretti	8
1.9	Prodotti semi-diretti	8
1.10	Teorema di struttura per gruppi abeliani finiti	9
1.11	Teoremi di Sylow	9
1.12	Risultati sulle classificazioni	10
1.13	Risultati vari sui gruppi	11
<b>2</b>	<b>Esercizi</b>	<b>12</b>
2.1	Esercizi su gruppi 1	12
2.2	Esercizi su campi e anelli 1	12
2.3	Esercizi su gruppi 2	22
2.4	Esercizi su anelli 2	23
<b>A</b>	<b>Nozioni fondamentali</b>	<b>24</b>
A.1	Applicazioni	24
A.2	Relazioni	24

# 1 | TEORIA DEI GRUPPI

## §1.1 Automorfismi e azioni

**Proposizione 1.1.** Dato un gruppo  $G$ , si ha che  $\text{Int } G \triangleleft \text{Aut } G$  e  $\text{Int } G \cong G/Z(G)$ .

**Definizione 1.1 (Azione).** Un'azione di  $G$  gruppo su  $X$  insieme è un omomorfismo

$$\gamma : \begin{array}{ll} G & \longrightarrow S(X) = \{f : X \rightarrow X \mid f \text{ biettiva}\} \\ g & \longmapsto \psi_g : \psi_g(x) = g \cdot x \end{array}$$

Cioè un'azione di  $G$  permette di identificare un modo in cui un elemento del gruppo può agire (tramite una permutazione) sull'insieme  $X$ .

Un'azione di gruppo è ben definita se:

- (a).  $e \cdot x = x$ ,  $\forall x \in X$ , con  $e \in G$  identità;
- (b).  $h \cdot (g \cdot x) = (hg) \cdot x$ , per  $g, h \in G$  e  $x \in X$ .

Relativamente ad un'azione  $\gamma : G \rightarrow S(X)$ , si definiscono:

- **orbita:** dato  $x \in X$ , la sua orbita è l'insieme  $\text{Orb } x = \{g \cdot x \mid g \in G\}$ ;
- **stabilizzatore:** dato  $x \in X$ , il suo stabilizzatore è l'insieme

$$\text{Stab } x = \{g \in G \mid g \cdot x = x\} < G$$

Le orbite partizionano  $X$ , visto che  $x \sim_\gamma y \iff \text{Orb } x = \text{Orb } y$ , quindi:

$$|X| = \sum_{x \in \mathcal{R}} |\text{Orb } x|$$

**Lemma 1.0.1 (Orbita-stabilizzatore).** Esiste una biezione  $\text{Orb } x \rightarrow G/\text{Stab } x$  definita da  $g \cdot x \mapsto g \text{Stab } x$ .

Per  $X = G$  e  $\gamma : G \rightarrow \text{Int } G \subset S(G)$  si ha l'azione per coniugio. Le orbite sono le **classi di coniugio**  $\text{Cl}(x)$  e gli stabilizzatori sono detti **centralizzatori**  $Z(x)$ . Per il lemma orbita-stabilizzatore, si ha  $|G| = |\text{Cl}(x)||Z(x)|$ .

Si può far agire  $G$  su  $X = \{H \leq G\}$  con  $g \cdot H = gHg^{-1}$ . In questo caso, le orbite non hanno un nome particolare, ma gli stabilizzatori si dicono **normalizzatori**  $N_G(H)$ . In questo senso,  $H \triangleleft G \iff N_G(H) = G$ . Questo significa che  $N_G(H)$  contiene tutti i generatori  $g_1, \dots, g_n$  di  $G$ , quindi  $g_i H g_i^{-1} = H, \forall i$ .

Dall'azione per coniugio, si ottiene la **formula delle classi di coniugio**:

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

## §1.2 I p-gruppi

**Definizione 1.2.** Un  $p$ -gruppo è un gruppo  $G$  di ordine  $p^n$  per qualche  $n \in \mathbb{N}$ .

**Proposizione 1.2.** Il centro di un  $p$ -gruppo è non-banale.

**Proposizione 1.3.** Un gruppo di ordine  $p^2$  è abeliano.

**Teorema 1.1.** Ogni  $p$ -gruppo  $G$  di ordine  $p^n$  ha sottogruppi  $G_k$  di ordine  $p^k$ ,  $k = 0, \dots, n$  tali che

$$\{e\} = G_0 \triangleleft G_1 \triangleleft \dots \triangleleft G_{n-1} \triangleleft G_n = G$$

## §1.3 Teoremi di Cauchy e Cayley

**Teorema 1.2 (Cauchy).** Sia  $p$  un primo e  $G$  un gruppo finito; se  $p \mid |G|$ , allora  $G$  ha un elemento di ordine  $p$ .

**Teorema 1.3 (Cayley).** Ogni gruppo  $G$  è isomorfo a un sottogruppo di  $S(G)$ . Se  $|G| = n$ , allora  $G \hookrightarrow S_n$ .

## §1.4 Commutatore e gruppo derivato

**Definizione 1.3 (Derivato).** Dato  $G$  gruppo, si definisce il derivato come

$$G' = [G : G] := \langle [g, h] \mid g, h \in G \rangle$$

cioè è il più piccolo sottogruppo di  $G$  contenente tutti i commutatori.

Le sue proprietà sono le seguenti:

- $G' = \{e\} \iff G$  abeliano;
- $G' \triangleleft G$ ;
- $G'$  caratteristico in  $G$ ;
- se  $H \triangleleft G$  è tale che  $G/H$  è abeliano, allora  $G' \subset H$ .

**Proposizione 1.4.** Sia  $G$  un gruppo e  $G'$  il suo derivato. Allora  $G_{\text{ab}} = G/G'$  è abeliano ed è il più grande quoziente abeliano di  $G$ .

## §1.5 Il gruppo diedrale

**Proposizione 1.5.** Tutti gli elementi di  $D_n$  si scrivono come  $\sigma\rho^i$ , oppure come  $\rho^i$ , per  $i = 0, \dots, n-1$ .

**Proposizione 1.6.** In  $D_n$ , il numero di elementi di ordine  $k$  è dato da:

$$\begin{cases} n+1 & , \text{ se } k=2, n \text{ pari} \\ n & , \text{ se } k=2, n \text{ dispari} \\ \phi(k) & , \text{ se } k \mid n \\ 0 & , \text{ altrimenti} \end{cases}$$

Di seguito, si riportano tutte le caratteristiche riguardanti la struttura di  $D_n$ .

- **Sottogruppi.** Un sottogruppo di  $D_n$  può essere composto da sole rotazioni, caso in cui coincide con un sottogruppo di  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ , oppure ha, in egual numero, rotazioni e riflessioni, caso in cui è isomorfo a  $D_m$ , per qualche  $m$ .
- **Sottogruppi normali.** Visto che  $[D_n : C_n] = 2$ , allora  $C_n \triangleleft D_n$ . Ogni sottogruppo di  $C_n$  è caratteristico in  $C_n$  perché unico, quindi è automaticamente normale in  $D_n$ . Se  $n$  è pari, si può definire  $H = \langle \rho^2 \rangle \sqcup \tau \langle \rho^2 \rangle$ , per cui  $[D_n : H] = 2 \Rightarrow H \triangleleft D_n$ . In questo caso, sottogruppi di questa forma sono  $\langle \rho^2, \sigma \rangle$  e  $\langle \rho^2, \sigma\rho \rangle$ . Se  $n$  è dispari, invece, un sottogruppo normale contenente una riflessione, le deve contenere tutte, quindi coincide con  $D_n$ .
- **Sottogruppi caratteristici.** Per  $n \geq 3$ ,  $C_n$  e i suoi sottogruppi di ordine  $d > 2$ ,  $d \mid n$  sono gli unici ad essere sempre caratteristici. Per gli  $n$  pari,  $\langle \rho^2, \sigma \rangle$  e  $\langle \rho^2, \sigma\rho \rangle$  non sono caratteristici perché  $\tau : D_n \rightarrow D_n$  con  $\tau(\rho) = \rho$  e  $\tau(\sigma) = \sigma\rho$  è un automorfismo ben definito che scambia i due sottogruppi.

- **Centro.** Se  $n$  è dispari,  $Z(D_n) = \{e\}$ , mentre, se  $n$  è pari,  $Z(D_n) = \{e, \rho^{n/2}\} \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ .
- **Quozienti.** Questi sono in corrispondenza biunivoca con i sottogruppi normali. In generale, si ha  $D_n/\langle \rho^m \rangle \cong D_m$ . Per  $n$  pari, invece, i quozienti relativi a  $\langle \rho^2, \sigma \rangle$  e  $\langle \rho^2, \sigma\rho \rangle$  hanno indice due, quindi sono isomorfi a  $\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ .
- **Automorfismi.** Un automorfismo di  $D_n$  è della forma

$$\gamma : \begin{array}{ccc} D_n & \longrightarrow & D_n \\ \rho & \longmapsto & \rho^i \\ \sigma & \longmapsto & \sigma\rho^j \end{array}, \quad \gcd(i, n) = 1$$

Allora  $|\text{Aut}(D_n)| = n\phi(n)$ .

$$D_n \cong \mathbb{Z}/n\mathbb{Z} \rtimes_{\varphi} \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

## §1.6 Il gruppo simmetrico

**Proposizione 1.7.** Ogni  $k$ -ciclo ha  $k$  scritte equivalenti.

**Proposizione 1.8.** I cicli di una permutazione di  $S_n$  sono le orbite degli elementi di  $X = \{1, \dots, n\}$  formate dall'azione indotta da tale permutazione.

**Corollario 1.3.1.**  $S_n$  è generato dai cicli.

**Proposizione 1.9.** Ogni permutazione si scrive come composizione di trasposizioni.

L'applicazione **segno** è definita da

$$\text{sgn} : \begin{array}{ccc} S_n & \longrightarrow & \{\pm 1\} \\ \sigma & \longmapsto & \prod_{1 \leq i < j \leq n} \frac{\sigma(i) - \sigma(j)}{i - j} \end{array}$$

ed è un omomorfismo di gruppi. Vale  $-1$  sulle trasposizioni; infatti, restituisce la parità del numero di trasposizioni presenti nella decomposizione di una permutazione. Il suo nucleo coincide con  $A_n \triangleleft S_n$ .

**Teorema 1.4.** Due permutazioni in  $S_n$  sono coniugate se e solo se hanno lo stesso tipo di decomposizione in cicli disgiunti.

Di seguito, la caratterizzazione di  $S_n$  e dei suoi elementi.

- **Numero di un certo tipo di permutazioni con precisa decomposizione.** In  $S_n$ , il numero complessivo di  $k$ -cicli è ottenuto tramite

$$\binom{n}{k}(k-1)!$$

Volendo cercare quante permutazioni con una precisa decomposizione in cicli disgiunti ci sono, si procede come da esempio. In  $S_{12}$ , il numero di permutazioni date dalla composizione di due 3-cicli e tre 2-cicli è

$$\binom{12}{3} \frac{3!}{3} \binom{9}{3} \frac{3!}{3} \binom{6}{3} \frac{2!}{2} \binom{4}{2} \frac{2!}{2} \binom{2}{2} \frac{2!}{2} \frac{1}{3!2!}$$

Questo si generalizza nella seguente formula:

$$\frac{n!}{\prod_{k \geq 1} [k^{m_k}(m_k!)]}$$

con  $m_k$  numero di  $k$ -cicli.

- **Ordine di una permutazione.** Un  $k$ -ciclo ha ordine  $k$ ; se una permutazione è composta da  $\ell$  cicli disgiunti  $\sigma_i$ , allora il suo ordine è

$$\text{lcm}(\text{ord}(\sigma_1), \dots, \text{ord}(\sigma_\ell))$$

- **Centralizzatore di una permutazione.** Sapendo che due permutazioni sono coniugate se e solo se hanno lo stesso tipo di decomposizione in cicli disgiunti, si sa calcolare  $|\text{Cl}(\sigma)|$  tramite la formula al primo punto. Per orbita-stabilizzatore, si ha  $|Z(\sigma)||\text{Cl}(\sigma)| = n!$ , quindi si può calcolare  $|Z(\sigma)|$ .

**Proposizione 1.10.** Per la formula delle classi,  $|Z_{S_n}(\sigma)||\text{Cl}_{S_n}(\sigma)| = n!$  e  $|Z_{A_n}(\sigma)||\text{Cl}_{A_n}(\sigma)| = n!/2$ , con:

$$Z_{A_n}(\sigma) = Z_{S_n}(\sigma) \cap A_n$$

Per la stessa formula, nel passare da  $\text{Cl}_{S_n}(\sigma)$  a  $\text{Cl}_{A_n}(\sigma)$  e da  $Z_{S_n}(\sigma)$  a  $Z_{A_n}(\sigma)$ , uno dei due dimezza di ordine, mentre l'altro rimane invariato.

**Proposizione 1.11.** Dato  $H < S_n$ , allora o  $H \subset A_n$ , quindi  $|H \cap A_n| = |H|$ , oppure  $|H \cap A_n| = |H|/2$ .

**Proposizione 1.12.** I 3-cicli sono tutti coniugati in  $A_n$ , per  $n \geq 5$ .

- | **Proposizione 1.13.** I 5-cicli in  $A_5$  NON sono tutti coniugati.
- | **Proposizione 1.14.**  $A_4$  non ha sottogruppi di ordine 6.
- | **Teorema 1.5.**  $A_n$  è semplice  $\forall n \geq 5$ .

$$S_n \cong A_n \rtimes \langle \tau \rangle, \text{ con } \tau \text{ trasposizione}$$

## §1.7 I quaternioni

Il gruppo è definito come  $Q_8 = \langle i, j \mid i^4 = 1, i^2 = j^2, ij = j^3i \rangle$ .  $i^4 = 1$  e  $i^2 = j^2$ , allora  $j^4 = 1$ , quindi  $\text{ord}(j) \mid 4$ . Poi  $\text{ord}(j^2) = \text{ord}(i^2) = 2$ , quindi  $\text{ord}(j) = 4$ . Allora  $Q_8$  ha due gruppi ciclici di ordine 4:  $\langle i \rangle$  e  $\langle j \rangle$ , con  $\langle i \rangle \cap \langle j \rangle = \{1, i^2 = j^2\}$ . Visto che  $\langle i \rangle, \langle j \rangle < Q_8$  e  $|\langle i \rangle \langle j \rangle| = 8$ , allora

$$Q_8 = \langle i \rangle \langle j \rangle = \{1, i, i^2, i^3, j, j^3, ij, i^3j\}$$

visto che  $\langle i \rangle, \langle j \rangle < Q_8$  (hanno indice 2).

- | **Osservazione 1.1.**  $Q_8$  non è abeliano:  $ij = j^3i = j^{-1}i \neq ji$ .

Di seguito, la caratterizzazione strutturale del gruppo.

- **Sottogruppi.**  $\langle i \rangle, \langle j \rangle < Q_8$  perché hanno indice 2. Anche  $\langle i^2 \rangle = \langle j^2 \rangle < Q_8$  perché  $i^2$  (quindi  $j^2$ ) commuta con i generatori.
- **Centro.** Si ha  $\langle i^2 \rangle = Z(Q_8)$  perché  $\langle i^2 \rangle$  ha ordine 2, quindi contenuto in  $Z(Q_8)$ ; al contempo,  $|Z(Q_8)| \in \{2, 4, 8\}$ , ma, se non fosse 2,  $Q_8$  sarebbe abeliano.
- **Elementi.** Prendendo  $k = ij$  e  $i^2 = -1$ , si ha

$$Q_8 = \{\pm 1, \pm i, \pm j, \pm k\}$$

Si ha  $i^2 = -1 \Rightarrow i^3 = -i \Rightarrow i^3j = -ij = -k$ . Quindi:  $ij = k$ ,  $jk = i$ ,  $ki = j$  e  $ji = -k$ ,  $ik = -j$  e  $kj = -i$ . Infine,  $k^2 = (ij)^2 = ijij = i^2$ , quindi  $\text{ord}(k) = 4$ . In questi termini,  $\langle -1 \rangle = Z(Q_8)$ .

- **Sottogruppi normali e caratteristici.** Per quanto detto,  $\langle -1 \rangle = Z(Q_8)$  quindi è caratteristico e, in particolare, normale. Invece  $\langle i \rangle, \langle j \rangle, \langle k \rangle < Q_8$ , ma non sono caratteristici. Allora ogni sottogruppo di  $Q_8$  è normale.

- **Prodotto semi-diretto.** Si nota che  $Q_8$  non si può ottenere come prodotto semi-diretto perché ogni coppia di sottogruppi non si interseca mai solo in 1, ma anche  $-1$ .

## §1.8 Prodotti diretti

**Teorema 1.6 (Decomposizione diretta).** Sia  $G$  un gruppo e siano  $H, K \triangleleft G$ ; se  $HK = G$  e  $H \cap K = \{e\}$ , allora  $G \cong H \times K$ .

**Corollario 1.6.1.** In un prodotto diretto, i fattori commutano fra loro.

**Corollario 1.6.2.** Se  $G = H \times K$ , allora  $Z(H \times K) \cong Z(H) \times Z(K)$ , visto che  $Z(H) \times \{e_K\}$  e  $\{e_H\} \times Z_K$  sono sottogruppi normali di  $Z(H \times K)$ . Questo implica che

$$\text{Int}(H \times K) \cong \frac{H \times K}{Z(H \times K)} \cong H/Z(H) \times K/Z(K) \cong \text{Int}(H) \times \text{Int}(K)$$

**Teorema 1.7.** Si ha  $\text{Aut}(H \times K) \cong \text{Aut}(H) \times \text{Aut}(K)$  se e soltanto se  $H \times \{e_K\}$  e  $\{e_H\} \times K$  sono caratteristici in  $H \times K$ . Altrimenti  $\text{Aut}(H) \times \text{Aut}(K) \hookrightarrow \text{Aut}(H \times K)$ .

**Corollario 1.7.1.** Sia  $G = H \times K$ , con  $|H| = n$  e  $|K| = m$ ; se  $\gcd(n, m) = 1$ , allora  $H \times \{e_K\}$ ,  $\{e_H\} \times K$  sono caratteristici in  $G$ .

## §1.9 Prodotti semi-diretti

**Definizione 1.4 (Prodotto semi-diretto).** Siano  $H, K$  due gruppi e  $\gamma : K \rightarrow \text{Aut}(H)$  un omomorfismo tale che  $\gamma(k) = \gamma_k \in \text{Aut}(H)$ . Allora si definisce  $H \rtimes_\gamma K$  il gruppo  $H \times K$  la cui operazione di gruppo è definita da

$$(h, k) * (h', k') = (h\gamma_k(h'), kk')$$

Il prodotto diretto è dato da  $\gamma(K) = \text{Id}_H$ .

**Proposizione 1.15.** Si considera  $H \rtimes_\gamma K$  e si definiscono  $\overline{H} = H \times \{e_K\}$  e  $\overline{K} = \{e_H\} \times K$ . Per costruzione,  $\overline{K}, \overline{H} \triangleleft H \times K$ , mentre:

- $\overline{H} \triangleleft H \rtimes_\gamma K$  sempre;
- $\overline{K} \triangleleft H \rtimes_\gamma K \iff$  il prodotto è diretto.



**Teorema 1.8 (Decomposizione semi-diretta).** Sia  $G$  un gruppo e siano  $H \triangleleft G$  e  $K < G$ . Se  $HK = G$  e  $H \cap K = \{e\}$ , allora  $G \cong H \rtimes_{\gamma} K$ , con  $\gamma : K \rightarrow \text{Aut}(H)$  e  $\gamma(k) = khk^{-1}$ .

### §1.10 Teorema di struttura per gruppi abeliani finiti

**Definizione 1.5 ( $p$ -torsione).** Dato un gruppo abeliano finito  $G$ , se ne definisce la  $p$ -componente

$$G(p) := \{g \in G \mid \text{ord}(g) = p^k, k \in \mathbb{N}\}$$

**Proposizione 1.16.** La  $p$ -torsione  $G(p)$  di un gruppo  $G$  abeliano finito è un sottogruppo caratteristico.

**Teorema 1.9.** Se  $G$  è un gruppo abeliano di ordine  $|G| = n = p_1^{e_1} \cdots p_s^{e_s}$ , con  $p_i$  primi diversi fra loro, allora

$$G \cong G(p_1) \times \cdots \times G(p_s)$$

**Lemma 1.9.1.** Sia  $G$  un  $p$ -gruppo e  $x_1 \in G$  elemento di ordine massimo. Dato anche  $\bar{x} \in G/\langle x_1 \rangle$ ,  $\exists y \in \pi_{\langle x_1 \rangle}^{-1}(\bar{x})$  tale che  $\text{ord}_G(y) = \text{ord}_{G/\langle x_1 \rangle}(\bar{x})$ .

**Teorema 1.10.** Se  $G$  è un  $p$ -gruppo abeliano, allora esistono unici  $r_1, \dots, r_t \in \mathbb{N}$  tali che

$$G \cong \mathbb{Z}/p^{r_1}\mathbb{Z} \times \cdots \times \mathbb{Z}/p^{r_t}\mathbb{Z}$$

con  $r_1 \geq r_2 \geq \cdots \geq r_t$ .

**Teorema 1.11 (Teorema di struttura).** Sia  $G$  un gruppo abeliano finito; allora  $G$  si decompone univocamente come

$$G \cong \mathbb{Z}/n_1\mathbb{Z} \times \cdots \times \mathbb{Z}/n_s\mathbb{Z}$$

dove  $n_{i+1} \mid n_i, \forall i = 1, \dots, s-1$ .

### §1.11 Teoremi di Sylow

Per i seguenti teoremi, si considera un gruppo finito  $G$  di ordine  $|G| = p^n m$ , con  $p$  primo e  $\gcd(m, p) = 1$ .

**Teorema 1.12 (I teorema).** Dato  $\alpha \in \mathbb{N}$ , con  $0 \leq \alpha \leq n$ , allora  $\exists H < G$  di ordine  $|H| = p^\alpha$ .

**Teorema 1.13 (II teorema).** Ogni  $p$ -gruppo di  $G$  è contenuto in un  $p$ -Sylow. Inoltre, due qualunque  $p$ -Sylow di  $G$  sono coniugati.

**Teorema 1.14 (III teorema).** Dato  $n_p$  il numero di  $p$ -Sylow di  $G$ , si ha che  $n_p \mid |G|$  e  $n_p \equiv 1 \pmod{p}$ . In particolare, si avrà  $n_p \mid m$ .

## §1.12 Risultati sulle classificazioni

### • Classificazione dei gruppi di ordine 6.

Si ha  $|G| = 2 \cdot 3$ , quindi sono presenti, per Cauchy, un sottogruppo  $P_2$  di ordine 2 e un sottogruppo  $P_3$  di ordine 3. Visto che  $P_3$  ha indice 2 è normale in  $G$ . Inoltre,  $P_3 \cap P_2 = \{e\}$  perché gli altri elementi di un gruppo hanno ordine coprimo con l'ordine dell'altro gruppo. Questo implica che  $P_2 P_3 = G$ , quindi  $G \cong P_3 \rtimes_{\phi} P_2$ , con

$$\phi : \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \longrightarrow \text{Aut } \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \cong (\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})^* \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

Ne segue che ci sono due possibili omomorfismi:  $\phi(1) = 0$ , che corrisponde al prodotto diretto  $G \cong \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}/6\mathbb{Z}$ , oppure  $\phi(1) = 2 \in (\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})^*$ . Riguardo l'ultimo caso, notando che  $2 \equiv -1 \pmod{3}$ , si conclude che l'ultimo omomorfismo consiste nel prodotto per  $-1$ . Pertanto, dati  $(a, b), (c, d) \in \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \rtimes_{\phi} \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ , il prodotto è definito da:

$$(a, b) * (c, d) = (a + (-1)^b c, b + d)$$

Per finire, si nota che, per  $a \in (\mathbb{Z}/3\mathbb{Z})^*$ :

$$(0, 1)(a, 0)(0, 1)^{-1} = (0, 1)(a, 0)(0, 1) = (-2a, 0) = (a, 0)^{-1}$$

Quindi,  $G$  soddisfa la presentazione di  $S_3$ , per cui  $G \cong S_3$ . Si conclude che se  $G$  è un gruppo di ordine 6, le possibilità sono:

$$\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \quad S_3$$

rispettivamente nel caso abeliano e non-abeliano.

- **Classificazione dei gruppi di ordine  $pq$ .** Se  $p = q$ ,  $G$  è abeliano e  $G \cong \mathbb{Z}/p\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/p\mathbb{Z}$  oppure  $G \cong \mathbb{Z}/p^2\mathbb{Z}$ .

Se  $q > p$  e  $p \nmid q - 1$ , allora si può avere solo  $G \cong \mathbb{Z}/pq\mathbb{Z}$ ; altrimenti si ha un prodotto semi-diretto non-banale, unico a meno di isomorfismo.

- **Classificazione dei gruppi di ordine 12.**

$$\mathbb{Z}/12\mathbb{Z} \quad \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \quad A_4 \quad \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \rtimes_{\varphi} \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \quad D_6$$

- **Classificazione dei gruppi di ordine 8.**

$$\mathbb{Z}/8\mathbb{Z} \quad \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \quad (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^3 \quad D_4 \quad Q_8$$

- **Classificazione dei gruppi di ordine 30.**

$$\mathbb{Z}/30\mathbb{Z} \quad D_{15} \quad D_5 \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z} \quad D_3 \times \mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$$

### §1.13 Risultati vari sui gruppi

**Proposizione 1.17.**  $G/Z(G)$  ciclico  $\iff G$  abeliano.

**Proposizione 1.18.** Se  $H, K < G$ , allora  $HK < G \iff HK = KH$ ; in questo caso,  $|HK| = \frac{|H||K|}{|H \cap K|}$ .

**Proposizione 1.19.** Se  $H, K \triangleleft G$ , con  $H \cap K = \{e\}$ , allora  $hk = kh$ ,  $\forall h \in H, \forall k \in K$ .

**Proposizione 1.20.** Sia  $H < G$  con  $[G : H] = 2$ ; allora  $H \triangleleft G$ .

**Proposizione 1.21.** Siano  $H \triangleleft G$  e  $K$  sottogruppo caratteristico di  $H$ ; allora  $K \triangleleft G$ .

**Proposizione 1.22.** Sia  $H < G$ , con  $|H| = 2$ ; allora  $H$  è normale se e solo se  $H < Z(G)$ .

## 2 | ESERCIZI

### §2.1 Esercizi su gruppi 1

**Esercizio 2.1.** Sia  $G = \mathbb{Z}/20\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/8\mathbb{Z}$ ; determinare il numero degli omomorfismi  $f : G \rightarrow G$ . Inoltre, dati  $n \in \mathbb{N}$  e  $f_n : G \rightarrow G$  l'omomorfismo dato da  $f_n(x) = nx$ , determinare:

- (a). per quali valori di  $n$ ,  $\text{Ker } f_n$  è ciclico;
- (b). per quali valori di  $n$ ,  $\text{Im } f_n$  è ciclico.

### §2.2 Esercizi su campi e anelli 1

**Esercizio 2.2.** Sia  $f(x) = x^4 + x^3 - 3 \in \mathbb{F}_7[x]$ . Determinare il numero di divisori dello zero e l'inverso di  $\overline{x+1}$  in  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$ .

*Svolgimento.* Si scompone  $f(x)$  in  $\mathbb{F}_7[x]$ ; per farlo, si vede se ha radici, calcolando  $f(a)$ , per  $a = 0, 1, \dots, 6$ . Provando, si vede che:

$$f(0) = -3 \equiv 4 \pmod{7}$$

$$f(1) = -1 \equiv 6 \pmod{7}$$

$$f(2) = 16 + 8 - 3 = 21 \equiv 0 \pmod{7}$$

$$f(3) = 81 + 27 - 3 = 105 \equiv 0 \pmod{7}$$

$$f(4) = 256 + 64 - 3 = 317 = 280 + 37 \equiv 2 \pmod{7}$$

$$f(5) = 625 + 125 - 3 = 747 = 735 + 12 \equiv 5 \pmod{7}$$

$$f(6) = 1296 + 216 - 3 = 1509 = 1498 + 11 \equiv 4 \pmod{7}$$

Per effettuare la fattorizzazione di  $f(x)$ , si usa Ruffini. Iniziando con  $(x - 2)$ , visto che  $f(x) = x^4 + x^3 - 3 \equiv x^4 + x^3 + 4 \pmod{7}$ , si ottiene:

$$\begin{array}{r|rrrrr} 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ & & 2 & 6 & 5 & 3 \\ \hline & 1 & 3 & 6 & 5 & 0 \end{array}$$

$$f(x) = (x - 2)(x^3 + 3x^2 + 6x + 5) = (x - 2)g(x)$$

Evidentemente,  $g(3) = 0 \implies (x - 3) \mid g(x)$ ; usando ancora Ruffini, si ha:

$$\begin{array}{r|rrrr} 3 & 1 & 3 & 6 & 5 \\ & & 3 & 4 & 2 \\ \hline & 1 & 6 & 3 & 0 \end{array}$$

$$f(x) = (x - 2)g(x) = (x - 2)(x - 3)(x^2 + 6x + 3)$$

dove si nota che  $x^2 + 6x + 3$  non si annulla né per  $x = 2$ , né per  $x = 3$ , quindi è irriducibile in  $\mathbb{F}_7[x]$  (altrimenti  $f(x)$  avrebbe una radice diversa da  $x = 2, 3$ , che è assurdo per i calcoli svolti sopra). In questo modo, si può studiare nel dettaglio  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$ . Intanto, visto che  $f(x)$  è un polinomio di grado 4 in  $\mathbb{F}_7[x]$ , tale quoziente sarà composto da tutti i polinomi della forma

$$ax^3 + bx^2 + cx + d, \quad a, b, c, d \in \mathbb{F}_7$$

pertanto avrà un totale di  $7^4$  elementi. Le unità di  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$  sono tutte quelle classi  $\overline{h(x)}$  tali che  $(f(x), h(x)) = 1$ ; per studiare meglio questo fatto, si usa il teorema cinese del resto per anelli a partire dall'osservazione che  $x - 2$ ,  $x - 3$  e  $x^2 + 6x + 3$  sono coprimi tra loro:

$$\frac{\mathbb{F}_7[x]}{\langle (x - 2)(x - 3)(x^2 + 6x + 3) \rangle} \cong \mathbb{F}_7[x]/\langle x - 2 \rangle \times \mathbb{F}_7[x]/\langle x - 3 \rangle \times \mathbb{F}_7[x]/\langle x^2 + 6x + 3 \rangle$$

Per studiare il numero delle unità complessive di  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$ , si studia singolarmente ciascun fattore:

- $\mathbb{F}_7[x]/\langle x - 2 \rangle \cong \mathbb{F}_7$ , quindi ha 7 elementi, per un totale di 6 unità;
- $\mathbb{F}_7[x]/\langle x - 3 \rangle \cong \mathbb{F}_7$ , quindi ha 6 unità;
- $\mathbb{F}_7[x]/\langle x^2 + 6x + 3 \rangle$  è un campo perché  $x^2 + 6x + 3$  è irriducibile in  $\mathbb{F}_7[x]$  e ha un totale di  $7^2 = 49$  elementi, quindi è isomorfo a  $\mathbb{F}_{49}$ , con un totale di 48 unità.

Da questo si conclude che il numero totale di unità in  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$  è  $6 \cdot 6 \cdot 48 = 1728$  unità. Essendo interessati ai divisori dello zero, sapendo che divisori dello zero e unità partizionano l'anello (a parte lo zero), si ha che, in totale, sono  $7^4 - 1728 = 2401 - 1728 = 673$  incluso lo zero.

Per finire, si calcola l'inverso di  $\overline{x + 1}$  in  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$ . Intanto si nota che  $x + 1$  è coprimo con  $f(x)$  perché si annulla in  $-1 \equiv 6 \pmod{7}$ , quindi l'inverso in  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$

esiste. Si cerca un polinomio  $a(x) \in \mathbb{F}_7[x]$  che soddisfa

$$a(x)(x+1) + b(x)f(x) = 1$$

cosicché, in  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$ ,  $\overline{a(x)}\overline{(x+1)} = 1$ . Per iniziare, si divide  $f(x)$  per  $x+1$  (usando  $-1 \equiv 6 \pmod{7}$ ):

$$\begin{array}{r|rrrrr} 6 & 1 & 1 & 0 & 0 & 4 \\ & & 6 & 0 & 0 & 0 \\ \hline & 1 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{array}$$

$$f(x) = (x+1)x^3 + 4$$

In  $\mathbb{F}_7[x]$ ,  $4^{-1} \equiv 2 \pmod{7}$ , quindi, moltiplicando tutto per 2 in  $\mathbb{F}_7[x]/\langle f(x) \rangle$ , si ha:

$$1 = 2f(x) - 2(x+1)x^3 \implies \overline{1} = \overline{-2(x+1)x^3}$$

da cui l'inverso di  $\overline{x+1}$  è proprio  $\overline{-2x^3} \equiv \overline{5x^3}$ , visto che  $-2 \equiv 5 \pmod{7}$ . ■

**Esercizio 2.3.** Sia  $m$  un numero intero e sia

$$f_m(x) = (x^2 - m)(x^4 - 25)$$

Determinare, per ogni valore intero di  $m$ , il grado del campo di spezzamento di  $f_m(x)$  su  $\mathbb{Q}$ .

*Svolgimento.* Il campo di spezzamento per  $f_m(x)$  si ottiene aggiungendo a  $\mathbb{Q}$  le radici dei due fattori  $x^2 - m$  e  $x^4 - 25$ . Si può notare che

$$x^4 - 25 = (x^2 + 5)(x^2 - 5)$$

Da qui, si ottiene che le radici di  $x^4 - 25$  sono  $\pm\sqrt{5}$  e  $\pm i\sqrt{5}$ , quindi il suo campo di spezzamento corrisponde con  $K = \mathbb{Q}(\sqrt{5}, i)$ . Per finire, si osserva che  $[\mathbb{Q}(\sqrt{5}) : \mathbb{Q}] = 2$  e  $[\mathbb{Q}(i) : \mathbb{Q}] = 2$ , per cui  $[K : \mathbb{Q}] = 4$ , dato che  $i \notin \mathbb{Q}(\sqrt{5})$ . Visto che  $K$  è indipendente da  $m$ , rimarrà fisso per il resto dell'esercizio.

Quanto al fattore  $x^2 - m$ , le sue radici sono  $\pm\sqrt{m}$ , ma qui il campo di spezzamento dipende dalla scelta dell'intero  $m$ .

- Se  $m = 0$ , le radici di  $x^2 - m$  sono già contenute in  $\mathbb{Q}$  poiché è proprio lo zero.
- Se  $m$  è un quadrato perfetto positivo, allora  $\sqrt{m} \in \mathbb{Q}$  e, anche in questo caso,  $\mathbb{Q}$  contiene già le radici.

- Se  $m < 0$ , invece, le radici sono date da  $\pm i\sqrt{|m|}$ ; in questo caso, se  $m = -n^2$ , per qualche intero  $n$ , allora il suo campo di spezzamento coincide con  $\mathbb{Q}(i)$ , visto che  $\sqrt{|m|} \in \mathbb{Q}$ . Altrimenti, il suo campo di spezzamento sarà dato da  $\mathbb{Q}(i\sqrt{|m|})$ .
- Infine, se  $m > 0$  non è un quadrato perfetto, il campo di spezzamento è ottenuto aggiungendo  $\sqrt{m}$ , quindi coincide con  $\mathbb{Q}(\sqrt{m})$ .

Allora, il campo di spezzamento per questo fattore, al variare di  $m \in \mathbb{Z}$ , è dato da:

$$L = \begin{cases} \mathbb{Q} \\ \mathbb{Q}(i\sqrt{m}) \\ \mathbb{Q}(\sqrt{m}) \end{cases}$$

Visto che  $i$  è già stato aggiunto per la radice del secondo fattore, ci si può concentrare sul trattare i casi in cui  $L = \mathbb{Q}(\sqrt{m})$  o  $L = \mathbb{Q}$ .

Per concludere, quindi, il campo di spezzamento del polinomio  $f_m(x)$  su  $\mathbb{Q}$  è dato da  $E = KL$ , con le varie possibilità per  $L$  al variare di  $m \in \mathbb{Z}$ :

- se  $m = 0$ ,  $m$  (positivo o negativo) quadrato perfetto, oppure  $m = \pm 5$ , allora  $E = \mathbb{Q}(\sqrt{5}, i)$ ;
- se  $m$  (positivo o negativo) NON è un quadrato perfetto e  $|m| \neq 5$ , allora  $E = \mathbb{Q}(\sqrt{5}, \sqrt{|m|}, i)$ .

Nel primo caso, il grado dell'estensione rimane quello di  $K$ , ossia  $[E : \mathbb{Q}] = 4$ , mentre, nel secondo caso,  $[E : \mathbb{Q}] = 2^3 = 8$ . ■

**Esercizio 2.4.** Siano  $f(x) = x^3 + 3x - 1$  e  $g(x) = x^2 - 2$ .

- Se  $\alpha$  è una radice complessa di  $f(x)$ , determinare il polinomio minimo di  $1/(\alpha + 2)$  su  $\mathbb{Q}$ .
- Determinare l'insieme dei numeri primi  $p$  tali che  $f(x)$  e  $g(x)$ , considerati a coefficienti in  $\mathbb{F}_p$ , hanno una radice comune.

*Svolgimento.* Si divide lo svolgimento nei due punti.

- Sia  $\alpha$  una radice complessa di  $f(x)$ . Si cerca il polinomio minimo di

$$\beta = \frac{1}{\alpha + 2} \implies \alpha\beta + 2\beta = 1 \implies \alpha = \frac{1}{\beta} - 2$$

Visto che  $f(\alpha) = 0$ , allora:

$$\left(\frac{1}{\beta} - 2\right)^3 + 3\left(\frac{1}{\beta} - 2\right) - 1 = 0$$

Esponendo e riordinando si ottiene un polinomio in  $\beta$ :

$$\begin{aligned} \frac{1}{\beta^3} - 8 - \frac{6}{\beta^2} + \frac{12}{\beta} + \frac{3}{\beta} - 6 - 15 &= 0 \implies \frac{1}{\beta^3} - \frac{6}{\beta^2} + \frac{15}{\beta} = 15 \\ \implies 15\beta^3 &= 1 - 6\beta + 15\beta^2 \implies 15\beta^3 - 15\beta^2 + 6\beta - 1 = 0 \end{aligned}$$

In questo modo, si ricava il polinomio  $p(x) = 15x^3 - 15x^2 + 6x - 1$ , che è a coefficienti razionali, ha  $\beta$  come radice ed è di grado 3. Usando Eisenstein con  $p = 3$  su  $f(x)$ , si conclude che è irriducibile su  $\mathbb{Q}$ , quindi  $[\mathbb{Q}(\alpha) : \mathbb{Q}] = 3$ . Infine, visto che  $\beta \in \mathbb{Q}(\alpha)$  e, viceversa,  $\alpha \in \mathbb{Q}(\beta)$ , si conclude che  $[\mathbb{Q}(\beta) : \mathbb{Q}] = 3$ , pertanto  $p(x)$  coincide proprio con il polinomio minimo di  $\beta$ .

- (b). Si cercano i primi  $p$  tali per cui  $\exists a \in \mathbb{F}_p$  con  $f(a) = g(a) = 0$ . Si nota che  $g(a) = 0 \implies a^2 = 2$  in  $\mathbb{F}_p$ . Passando alla condizione  $f(a) = 0$ , si ha  $a^3 + 3a - 1 = 0$ ; moltiplicando tutto per  $a$ , si ottiene  $a^4 + 3a^2 - 1 = 0$ . Sostituendo la condizione trovata prima, cioè  $a^2 = 2$ , si ottiene  $4 + 6 - a = 0$ , quindi  $a = 10$  in  $\mathbb{F}_p$ .

In questo modo, si ricava che  $a$  deve soddisfare due condizioni in  $\mathbb{F}_p$ :  $a \equiv 10 \pmod{p}$  e  $a^2 \equiv 2 \pmod{p}$ , cioè

$$100 \equiv 2 \pmod{p} \implies p \mid 98 = 2 \cdot 7^2$$

Allora le possibilità sono  $p = 2$ , oppure  $p = 7$ . Si nota che, per  $p = 2$ ,  $g(x) = x^2$  e  $f(x) = x^3 + x + 1$ , che non hanno radici comuni. Perciò, ci si convince facilmente che l'unico  $p$  che soddisfa la richiesta è  $p = 7$ .

■

**Esercizio 2.5.** Sia  $f(x) = x^6 + 4x^3 + 2$ .

- (a). Detta  $\alpha$  una radice complessa di  $f(x)$ , determinare il polinomio minimo di  $1/\alpha^2$  su  $\mathbb{Q}$ .
- (b). Determinare il campo di spezzamento di  $f(x)$  su  $\mathbb{F}_7$ .

*Svolgimento.* Si divide lo svolgimento nei due punti.



- (a). Si nota preliminarmente che  $f(x)$  è irriducibile per il criterio di Eisenstein con  $p = 2$ . Inoltre,  $f(\alpha) = 0$ , quindi  $\alpha^6 + 2 = -4\alpha^3$ ; elevando al quadrato, si ottiene che:

$$\alpha^{12} + 4 + 4\alpha^6 = 16\alpha^6 \implies \alpha^{12} - 12\alpha^6 + 4 = 0$$

In questo modo, sostituendo  $y = \alpha^2$ , si trova  $y^6 - 12y^3 + 4 = 0$ , quindi  $y = \alpha^2$  soddisfa  $p(y) = 0$ , con  $p(x) = x^6 - 12x^3 + 4$ . Ora si deve mostrare che  $p(x)$  è irriducibile per far vedere che è il polinomio minimo per  $\alpha^2$ . Visto che  $\mathbb{Q}(\alpha^2) \subseteq \mathbb{Q}(\alpha)$ , allora  $[\mathbb{Q}(\alpha) : \mathbb{Q}(\alpha^2)] \leq 2$ , quindi  $[\mathbb{Q}(\alpha^2) : \mathbb{Q}] = 3, 6$ ; si vuole escludere il caso in cui il grado sia 3. In questo caso, è facile convincersi che  $p(x)$  dovrebbe scomporsi in due fattori cubici; riducendolo modulo 2, poi, si vede che  $\overline{p(x)} = \overline{x^6}$ , pertanto i polinomi di grado 3,  $A(x)$  e  $B(x)$ , in cui si scompone  $p(x)$  devono avere coefficienti pari, ad eccezione del primo. Svolgendo il prodotto, si vede anche che i termini noti dei due polinomi devono essere  $c = c' = \pm 2$ , quindi

$$A(x) = x^3 + ux^2 + vx \pm 2 \quad B(x) = x^3 + u'x^2 + v'x \pm 2$$

con  $u, v, u', v' \equiv 0 \pmod{2}$ . Svolgendo il prodotto, si ottengono le condizioni  $u' = -u$ ,  $v' = -v$  per i termini di grado 1 e 5, mentre si ottiene  $u^2 = v^2 = 0$  per quelli di grado 4 e 2, da cui l'assurdo. Pertanto,  $\mathbb{Q}(\alpha^2) = \mathbb{Q}(\alpha)$  e, visto che  $\mathbb{Q}(1/\alpha^2) = \mathbb{Q}(\alpha^2)$ , si conclude che il polinomio minimo di  $\beta = 1/\alpha^2$  ha grado 6. Riprendendo l'espressione  $\alpha^{12} - 12\alpha^6 + 4 = 0$  trovata prima e sostituendo  $\alpha^2 = 1/\beta$ , si trova:

$$\frac{1}{\beta^6} - \frac{12}{\beta^3} + 4 = 0 \implies 4\beta^6 - 12\beta^3 + 1 = 0 \implies \beta^6 - 3\beta^3 + \frac{1}{4} = 0$$

da cui  $P(x) = x^6 - 3x^3 + 1/4$  è il polinomio minimo di  $\beta$  perché soddisfa  $P(\beta) = 0$  e ha stesso grado dell'estensione  $\mathbb{Q}(\beta)$ .

- (b). Bisogna capire se  $f(x)$  è irriducibile in  $\mathbb{F}_7$ . Si osserva che, ponendo  $t = x^3$ , si ottiene  $t^2 + 4t + 2 = 0$ , con  $\Delta = 16 - 8 = 8 \equiv 1 \pmod{7}$ , che è un quadrato in  $\mathbb{F}_7$ , pertanto  $f(x)$  non è irriducibile. Si nota, poi, che  $-3 \equiv 4 \pmod{7}$  e  $-5 \equiv 2 \pmod{7}$ , per cui le radici di  $t^2 + 4t + 2 = 0$  sono  $t = 1, 2$ . Tale polinomio, quindi, si scompone in

$$t^2 + 4t + 2 = (t - 1)(t - 2) \implies f(x) = x^6 + 4x^3 + 2 = (x^3 - 1)(x^3 - 2)$$

Si osserva, ora, che gli elementi di  $\mathbb{F}_7^\times$  soddisfano  $x^6 = 1$ ; tramite la mappa  $\varphi : \mathbb{F}_7^\times \rightarrow \mathbb{F}_7^\times$  tale che  $x \mapsto x^3$ , si ottiene che  $x^2 = 1$ . In questo modo, si possono capire quali sono i cubi di  $\mathbb{F}_7$ ; da tale relazione, si trova che questi sono  $x = \pm 1$ ,

cioè 1, 6. Questo significa che 1 è un cubo e, pertanto,  $x^3 - 1$  è riducibile, mentre  $x^3 - 2$  no. Le radici di  $x^3 = 1$  sono gli elementi di  $\mathbb{F}_7^\times$  che hanno ordine 3; visto che  $3 \mid 6$ , ci sono sicuramente elementi del genere e sono dati da 1, 2, 4, quindi

$$f(x) = (x - 1)(x - 2)(x - 4)(x^3 - 2)$$

è la scomposizione in irriducibili di  $f(x)$ . Visto che le radici dei fattori di primo grado sono già in  $\mathbb{F}_7$ ,  $\text{Spl}_{\mathbb{F}_7} f(x) = \text{Spl}_{\mathbb{F}_7} x^3 - 2$ . Essendo  $x^3 - 2$  irriducibile di grado 3, allora, se  $\xi$  è una radice  $x^3 - 2$ , si ha  $\mathbb{F}_7(\xi) \cong \mathbb{F}_{7^3}$ . Questo permette di concludere che  $\text{Spl}_{\mathbb{F}_7} f(x) = \mathbb{F}_{7^3}$ . ■

**Esercizio 2.6.** Determinare il campo di spezzamento di  $x^6 - 4$  su  $\mathbb{Q}$  e su  $\mathbb{F}_{11}$ .

*Svolgimento.* Si inizia col determinarlo su  $\mathbb{Q}$ . Per farlo, è necessario capire se  $x^6 - 4$  è irriducibile; si nota, però, che  $x^6 - 4 = (x^3 - 2)(x^3 + 2)$ . Questi due fattori, poi, sono irriducibili per Eisenstein con  $p = 2$ , quindi il campo di spezzamento di  $x^6 - 4$  è determinato dai campi di spezzamento di questi due polinomi di grado 3 su  $\mathbb{Q}$ . Visto che sono irriducibili, la loro estensione avrà grado 3:

- per  $\text{Spl}_{\mathbb{Q}} x^3 - 2$ , si ha  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \zeta_3)$ , con  $\zeta_3 = e^{2\pi i/3}$  radice cubica dell'unità;
- per  $\text{Spl}_{\mathbb{Q}} x^3 + 2$ , si ha lo stesso campo di spezzamento  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \zeta_3)$ , visto che  $(-\sqrt[3]{2})^3 = -2$ .

Se ne conclude che il campo di spezzamento di  $x^6 - 4$  su  $\mathbb{Q}$  è dato da  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}, \zeta_3)$  ed è un'estensione di grado 6 perché prodotto di un'estensione di grado 2,  $\mathbb{Q}(\zeta_3)$ , e di un'estensione di grado 3,  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$ .

Quanto al caso su  $\mathbb{F}_{11}$ , il procedimento è analogo: si cerca di capire se  $x^6 - 4$  ha qualche radice, o se è irriducibile. Si deve capire se  $\exists x \in \mathbb{F}_{11}^\times$  tale che  $x^6 = 4$ , sapendo che gli elementi di tale campo soddisfano  $x^{10} = 1$ . Pertanto  $x^6 = 4$  è soddisfatta se e solo se  $4^{10/\text{gcd}(10,6)} = 1$  in  $\mathbb{F}_{11}$ ; visto che  $\text{gcd}(10, 6) = 2$ , si verifica che  $4^5 = 1024 \equiv 1 \pmod{11}$ . Si nota che:

$$\begin{aligned} 4^2 &= 16 \equiv 5 \pmod{11} & 4^4 &\equiv 5^2 = 25 \equiv 3 \pmod{11} \\ 4^5 &\equiv 3 \cdot 4 = 12 \equiv 1 \pmod{11} \end{aligned}$$

Quindi  $x^6 - 4$  si scompone in  $\mathbb{F}_{11}$ . Per trovare le radici di questo polinomio ci sono due vie: partendo dal fatto che ci sono due elementi che soddisfano  $x^6 - 4 = 0$  in  $\mathbb{F}_{11}$ ,

essendo  $\gcd(10, 6) = 2$ , si procede a trovarle manualmente e si usa che, se  $a$  è una radice, allora anche  $-a$  lo è, oppure si usa che 2 è un generatore di  $\mathbb{F}_{11}^\times$ , quindi

$$x^6 = 4 \iff (2^k)^6 = 2^2 \iff 6k \equiv 2 \pmod{10}$$

che si riduce, dividendo per 2, a  $3k \equiv 1 \pmod{5}$ . Usando che l'inverso di 3 modulo 5 è 2, si ha la congruenza  $k \equiv 2 \pmod{5}$ , che, modulo 10, si traduce in  $k = 2, 7$ . In questo modo, gli elementi che soddisfano  $x^6 - 4 = 0$  sono  $2^2 = 4$  e  $2^7 = 128 \equiv 7 \pmod{11}$ . Se ne conclude che  $x^6 - 4 = (x - 4)(x - 7)p(x)$ , dove la divisione per  $x - 2$  restituisce (usando che  $-4 \equiv 7 \pmod{11}$ ):

$$\begin{array}{r|rrrrrrr} 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \\ & & 4 & 5 & 9 & 3 & 1 & 4 \\ \hline & 1 & 4 & 5 & 9 & 3 & 1 & 0 \end{array}$$

$$x^6 - 4 = (x - 4)(x^5 + 4x^4 + 5x^3 + 9x^2 + 3x + 1)$$

Applicando nuovamente Ruffini, si ottiene:

$$\begin{array}{r|rrrrrr} 7 & 1 & 4 & 5 & 9 & 3 & 1 \\ & & 7 & 0 & 2 & 0 & 10 \\ \hline & 1 & 0 & 5 & 0 & 3 & 0 \end{array}$$

$$x^6 - 4 = (x - 4)(x - 7)(x^4 + 5x^2 + 3)$$

Allora il campo di spezzamento su  $\mathbb{F}_{11}$  di  $x^6 - 4$  coincide con quello di  $x^4 + 5x^2 + 3$ . Per trovare il campo di spezzamento di questo polinomio, si prende  $t = x^2$ , per cui si ottiene  $t^2 + 5t + 3 = 0$ , da cui

$$t_{1,2} = \frac{-5 \pm \sqrt{25 - 12}}{2} \equiv \frac{6 \pm \sqrt{2}}{2} = 3 \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \in \mathbb{F}_{11}(\sqrt{2}) \cong \mathbb{F}_{11^2}$$

Ne segue che il campo di spezzamento di  $x^6 - 4$  è proprio  $\mathbb{F}_{11^2}$ , in quanto, contenendo  $t_1$  e  $t_2$ , contiene anche le rispettive radici quadrate  $\pm\sqrt{t_1}$  e  $\pm\sqrt{t_2}$ . ■

**Esercizio 2.7.** Calcolare i gradi delle estensioni  $\mathbb{Q}(\sqrt{3}, \sqrt{5})/\mathbb{Q}$  e  $\mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5})/\mathbb{Q}$ . Poi, trovare i polinomi minimi di  $\sqrt{3} - \sqrt{5}$  e di  $\sqrt{\sqrt{3} - \sqrt{5}} - 1$  su  $\mathbb{Q}$ .

*Svolgimento.* Per calcolare  $[\mathbb{Q}(\sqrt{3}, \sqrt{5}) : \mathbb{Q}]$ , si nota che una possibile base è data da  $\{1, \sqrt{3}, \sqrt{5}, \sqrt{3}\sqrt{5}\}$ . Questo significa che tale estensione ha grado 4. Si nota che quella

esposta è effettivamente una base perché  $\sqrt{3}$  e  $\sqrt{5}$  sono indipendenti. Per calcolare il grado della seconda estensione, si tiene a mente quanto appena visto; si farà vedere che  $\sqrt{3}, \sqrt{5} \in \mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5})$ . Per farlo, è sufficiente osservare che  $1/(\sqrt{3} - \sqrt{5}), (3 - 5) \in \mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5})$ , per cui:

$$\frac{3 - 5}{\sqrt{3} - \sqrt{5}} = \frac{(\sqrt{3} - \sqrt{5})(\sqrt{3} + \sqrt{5})}{\sqrt{3} - \sqrt{5}} = \sqrt{3} + \sqrt{5} \in \mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5})$$

Ma allora

$$\sqrt{3} = \frac{(\sqrt{3} - \sqrt{5}) + (\sqrt{3} + \sqrt{5})}{2} \quad \sqrt{5} = \frac{(\sqrt{3} + \sqrt{5}) - (\sqrt{3} - \sqrt{5})}{2}$$

quindi  $\sqrt{3}, \sqrt{5} \in \mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5})$ . Visto che  $\sqrt{3} - \sqrt{5} \in \mathbb{Q}(\sqrt{3}, \sqrt{5})$ , si conclude facilmente che  $\mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5}) = \mathbb{Q}(\sqrt{3}, \sqrt{5})$ , da cui  $[\mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5}) : \mathbb{Q}] = 4$ .

Per trovare il polinomio minimo di  $\sqrt{3} - \sqrt{5}$ , si prende  $x = \sqrt{3} - \sqrt{5}$ ; allora si nota che:

$$\begin{aligned} x^2 &= 3 + 5 - 2\sqrt{15} \Rightarrow \sqrt{15} = \frac{x^2 - 8}{2} \\ \Rightarrow 15 &= \frac{1}{4} [x^4 + 64 - 16x^2] \Rightarrow x^4 - 16x^2 + 4 = 0 \end{aligned}$$

In questo modo, il candidato polinomio minimo di  $\sqrt{3} - \sqrt{5}$  è proprio  $p(y) = y^4 - 16y^2 + 4$  perché è stato costruito in modo tale che  $p(x) = 0$ ,  $x = \sqrt{3} - \sqrt{5}$ . Visto che l'estensione  $\mathbb{Q}(\sqrt{3} - \sqrt{5})/\mathbb{Q}$  ha grado 4 e che  $p(y)$  è un polinomio di grado 4 a coefficienti razionali che ha  $\sqrt{3} - \sqrt{5}$  come radice, allora è automaticamente il polinomio minimo.

Per  $\sqrt{\sqrt{3} - \sqrt{5}} - 1$ , si procede in maniera analoga, ponendo  $\beta = \sqrt{\sqrt{3} - \sqrt{5}} - 1 \Rightarrow \beta + 1 = \sqrt{\sqrt{3} - \sqrt{5}}$ ; in questo modo, si ha:

$$\begin{aligned} (\beta + 1)^2 &= \sqrt{3} - \sqrt{5} \Rightarrow (\beta + 1)^4 = 3 + 5 - 2\sqrt{15} \\ \Rightarrow \sqrt{15} &= \frac{8 - (\beta + 1)^4}{2} \Rightarrow 15 = \frac{1}{4} [64 + (\beta + 1)^8 - 16(\beta + 1)^4] \\ \Rightarrow (\beta + 1)^8 &- 16(\beta + 1)^4 + 4 = 0 \end{aligned}$$

Questo permette di ottenere un polinomio monico di grado 8 a coefficienti razionali e con  $\beta$  come radice; per concludere che è il polinomio minimo, è sufficiente mostrare che il grado dell'estensione è 8. Si osserva che, per  $\alpha = \sqrt{3} - \sqrt{5}$ , si ha  $\beta + 1 = \sqrt{\alpha}$ ,

quindi  $\mathbb{Q}(\beta) = \mathbb{Q}(\sqrt{\alpha})$ . Perciò

$$[\mathbb{Q}(\sqrt{\alpha}) : \mathbb{Q}] = [\mathbb{Q}(\sqrt{\alpha}) : \mathbb{Q}(\alpha)][\mathbb{Q}(\alpha) : \mathbb{Q}] = 4[\mathbb{Q}(\sqrt{\alpha}) : \mathbb{Q}(\alpha)]$$

con  $[\mathbb{Q}(\sqrt{\alpha}) : \mathbb{Q}(\alpha)] \leq 2$  perché ottenuta aggiungendo una radice quadrata. Si può mostrare che questa estensione ha grado esattamente 2; infatti, se  $\alpha$  fosse un quadrato, avrebbe tutti coniugati positivi, visto che  $\mathbb{Q}(\alpha)$  è un campo totalmente reale, però un possibile coniugato è  $-\sqrt{3} - \sqrt{5} < 0$ , quindi  $\alpha$  non può essere un quadrato. Allora  $[\mathbb{Q}(\sqrt{\alpha}) : \mathbb{Q}] = 8$  e, dunque, quello trovato è proprio il polinomio minimo di  $\beta$ . ■

**Esercizio 2.8.** Determinare il grado del campo di spezzamento di  $f(x) = x^4 - 2$  su  $\mathbb{Q}$ , su  $\mathbb{F}_3$  e su  $\mathbb{F}_{17}$ .

*Svolgimento.* Per  $\text{Spl}_{\mathbb{Q}} x^4 - 2$ , si nota che ha radici date da  $\sqrt[4]{2}, \sqrt[4]{2}\zeta_4, \sqrt[4]{2}\zeta_4^2, \sqrt[4]{2}\zeta_4^3$ , con  $\zeta_4 = i$  radice quartica dell'unità. Evidentemente, il suo campo di spezzamento è dato da  $\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2}, \zeta_4)$ , dove  $[\mathbb{Q}(\sqrt[4]{2}) : \mathbb{Q}] = 4$  e  $[\mathbb{Q}(\zeta_4) : \mathbb{Q}] = 2$ ; essendo queste estensioni indipendenti, il grado complessivo dell'estensione è 8.

Per  $\text{Spl}_{\mathbb{F}_3} x^4 - 2$ , si nota che tale polinomio è irriducibile:  $-2 \not\equiv 0 \pmod{3}$ ,  $-1 \not\equiv 0 \pmod{3}$  e  $2^4 - 2 = 14 \equiv 2 \not\equiv 0 \pmod{3}$ . Inoltre,  $x^4 - 2$  non si scompone neanche in fattori quadratici in  $\mathbb{F}_3$  perché, altrimenti, 2 dovrebbe essere un quadrato, ma  $2^2 = 1$  e  $1^2 = 1$ . Allora  $x^4 - 2$  è irriducibile di grado 4 su  $\mathbb{F}_3$ , il che vuol dire che si decompone completamente in  $\mathbb{F}_{3^4}$ .

Per  $\text{Spl}_{\mathbb{F}_{17}} x^4 - 2$ , infine, si usa il fatto che un elemento di  $\mathbb{F}_{17}^\times$  soddisfa  $x^{16} = 1$ , per cui vale  $x^4 = 2$  se e soltanto se è verificata la relazione  $2^4 \equiv 1 \pmod{17}$ , ma questa non è verificata perché  $2^4 = 16$ . Inoltre,  $x^4 - 2$  non si può scomporre in fattori quadratici; se così fosse, infatti, dovrebbe essere soddisfatta la relazione  $x^2 = 2 \iff 2^8 \equiv 1 \pmod{17}$ , ma  $2^8 = 4^4 = 256 \equiv 8 \pmod{17}$ . Quindi  $x^4 - 2$  è irriducibile di grado 4 anche in  $\mathbb{F}_{17}$ , per cui il suo campo di spezzamento sarà  $\mathbb{F}_{17^4}$ .

**Nota:** si può dimostrare che  $x^4 - a$  è riducibile in un certo campo  $K$  se e soltanto se  $a$  è una potenza quarta in tale campo, oppure è un quadrato. Questo permette di giustificare i passaggi nell'esercizio e la dimostrazione si basa sul proseguire per conto diretto, assumendo una generica decomposizione in fattori quadratici. ■

## §2.3 Esercizi su gruppi 2

**Esercizio 2.9.** Sia  $G = \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \rtimes_{\phi} \mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$  definito da  $\phi(1) = -1 \in (\mathbb{Z}/4\mathbb{Z})^* \cong \text{Aut}(\mathbb{Z}/4\mathbb{Z})$ .

- (a). Per ogni intero  $n$ , contare gli elementi di ordine  $n$  in  $G$ .
- (b). Dimostrare che  $Z(G) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ .
- (c). Calcolare  $G'$  e la classe di isomorfismo di  $G_{\text{ab}} := G/G'$ .

*Svolgimento.* Si divide lo svolgimento nei vari punti.

- (a). I possibili  $n$  sono 1, 2, 4, 8, 16.

Per  $n = 1$ , si ha evidentemente l'identità  $(0, 0)$ .

Per  $n = 2$ , si osserva che:

$$(a, b)^2 = (0, 0) \iff (a + (-1)^b a, 2b) = (0, 0)$$

Conviene dividere i casi in cui  $b$  è pari o dispari. Se  $b$  pari (cioè  $b = 0, 2$ ), allora il quadrato è pari a  $(2a, 2b)$  e questo coincide con  $(0, 0)$  se e soltanto se  $a, b \in \{0, 2\}$ . Escludendo l'identità stessa, ci sono tre possibilità:  $(2, 0)$ ,  $(2, 2)$ ,  $(0, 2)$ . Se  $b$  è dispari, invece, il quadrato è pari a  $(0, 2b)$ ; questo risulterebbe pari a  $(0, 0)$  se  $b \equiv 0 \pmod{2}$ , ma questo è impossibile perché si è assunto  $b$  dispari.

Per  $n = 4$ , invece, si impone  $(a, b)^4 = (0, 0)$ , cioè:

$$(a + (-1)^b a, 2b)(a + (-1)^b a, 2b) = \begin{cases} (0, 4b) \equiv (0, 0) \pmod{4} & , b \text{ dispari} \\ (4a, 4b) \equiv (0, 0) \pmod{4} & , b \text{ pari} \end{cases}$$

Questo conteggio permette di concludere che tutti gli elementi di  $G$  che non sono di ordine 1 o 2 sono di ordine 4. Visto che l'identità e gli elementi di ordine 2 sono quattro in totale, si conclude che quelli di ordine 4 sono 12.

- (b). Per il lemma orbita-stabilizzatore,  $|Z(G)| \mid |G|$ , quindi le possibili cardinalità sono 1, 2, 4, 8, 16.  $G$  è un  $p$ -gruppo, quindi 1 non è ammissibile; inoltre, 8 e 16 non sono possibili in quanto  $G$  risulterebbe abeliano, che è assurdo. Allora  $|Z(G)| \in \{2, 4\}$ . Tuttavia, neanche  $|Z(G)| = 2$  è possibile perché  $Z(G)$  contiene tutti gli elementi

di ordine 2; infatti, dato  $(a, b) \in G$  con  $a, b \equiv 0 \pmod{2}$ , si ha:

$$\begin{aligned}(c, d)(a, b) &= (c + (-1)^d a, d + b) \\ (a, b)(c, d) &= (a + (-1)^b c, b + d) = (a + c, b + d)\end{aligned}$$

Questi coincidono per ogni elemento  $(c, d) \in G$  se e solo se  $a + c = c - a$ ; però si è assunto  $a \equiv 0 \pmod{2}$ , quindi verifica  $a \equiv -a \pmod{4}$  e, allora,  $(c, d)(a, b) = (a, b)(c, d)$ ,  $\forall (c, d) \in G$ . Se ne conclude che  $|Z(G)| = 4$ , dove tre elementi sono di ordine 2 e l'ultimo è l'identità. Essendo un gruppo di ordine 4 per forza abeliano, il teorema di struttura assicura che  $Z(G) \cong \mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ , oppure  $Z(G) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ ; per quanto appena detto sugli ordini degli elementi di  $Z(G)$ , l'unica possibilità è proprio quella richiesta:  $Z(G) \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$ .

(c). Per costruire  $G'$ , si nota che i quozienti

$$G/Z(G) \cong \frac{G}{\mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times \{0\}}$$

sono abeliani (visto che il quoziente ha cardinalità 4), quindi

$$G' \subseteq Z(G) \cap (\mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times \{0\}) \cong (\mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}) \cap (\mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \times \{0\}) = \{(0, 0), (1, 0)\}$$

Quindi  $|G'| = \{1, 2\}$ ; visto che  $G$  non è abeliano,  $|G'| = 2$  e, quindi,  $G' = \{(0, 0), (2, 0)\}$ , dato che  $Z(G)$  contiene gli elementi di  $G$  di ordine 2. In questo modo,  $G_{\text{ab}}$  ha cardinalità 8 ed è abeliano, quindi le classi di isomorfismo possibili, per il teorema di struttura, sono le seguenti:

$$(\mathbb{Z}/2\mathbb{Z})^3 \quad \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/4\mathbb{Z} \quad \mathbb{Z}/8\mathbb{Z}$$

Però  $G_{\text{ab}}$  ha elementi di ordine 4 e non ha elementi di ordine 8, quindi l'unica possibilità rimanente è  $G_{\text{ab}} \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/4\mathbb{Z}$ . ■

## §2.4 Esercizi su anelli 2

**Esercizio 2.10.** Siano  $I = (4, 3x + 1)$  e  $J = (3, x^2 + 1)$ , ideali dell'anello  $\mathbb{Z}[x]$ . Contare gli ideali massimali di  $\mathbb{Z}[x]/IJ$ .

# A | NOZIONI FONDAMENTALI

## §A.1 Applicazioni

**Proposizione A.1.** Sia  $f : X \rightarrow Y$ ; valgono le seguenti proprietà:

$$\begin{aligned} f^{-1}(A \cup B) &= f^{-1}(A) \cup f^{-1}(B) & f^{-1}(A \cap B) &= f^{-1}(A) \cap f^{-1}(B) \\ f(A \cup B) &= f(A) \cup f(B) & f(A \cap B) &\subseteq f(A) \cap f(B) \end{aligned}$$

Un diagramma è detto **commutativo** se e soltanto se ogni cammino con stessa partenza e stesso arrivo danno lo stesso risultato per composizione. Nel caso del diagramma

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \\ g \downarrow & & \downarrow h \\ A & \xleftarrow{i} & B \end{array}$$

questo è commutativo se e solo se  $(h \circ f)(x) = (i \circ g)(x)$ .

## §A.2 Relazioni

Sia  $X$  un insieme e  $R \subseteq X \times X$ . Si dice che ad  $R$  è associata una **relazione**  $\sim_R$  (o più semplicemente  $\sim$  quando non vi è ambiguità) su  $X$  se  $x \sim_R y \iff (x, y) \in R$ .

Un esempio, sono le relazioni di equivalenza, cioè relazioni che soddisfano le proprietà *riflessiva* ( $x \sim x$ ), *simmetrica* ( $x \sim y \iff y \sim x$ ) e *transitiva* ( $x \sim y, y \sim z \implies x \sim z$ ).

**Teorema A.1.** Se  $\sim$  è una relazione di equivalenza su  $X$ , allora la famiglia delle sue classi di equivalenza è una partizione di  $X$ . Viceversa, se  $\mathcal{P}$  è una partizione di  $X$ , allora induce, su  $X$ , una relazione di equivalenza data da

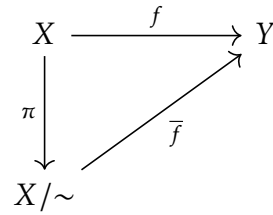
$$x \sim y \iff \exists C \in \mathcal{P} : x, y \in C$$

che ha, per classi, gli insiemi  $C$  della partizione  $\mathcal{P}$ .

**Definizione A.1.**  $f : X \rightarrow Y$  è *compatibile* con  $\sim$  su  $X$  se  $x \sim y \implies f(x) = f(y)$ .

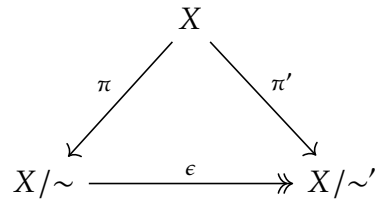


Data  $X \xrightarrow{f} Y$  compatibile con  $\sim$  su  $X$  e  $\pi : X \rightarrow X/\sim$  proiezione al quoziente, allora esiste un'unica applicazione  $\bar{f} = \bar{f} \circ \pi$  che rende



commutativo.

Se  $\sim$  e  $\sim'$  sono due relazioni su  $X$ , con  $x \sim y \Rightarrow x \sim' y$ , allora la partizione  $\mathcal{P}$  indotta da  $\sim$  è più fine di  $\mathcal{P}'$ , cioè quella indotta da  $\sim'$ . Questo significa che per ogni classe  $C \in \mathcal{P}$ ,  $\exists C' \in \mathcal{P}'$  tale che  $C \subseteq C'$ ; in questo senso, la corrispondenza  $C \mapsto C'$  è un'applicazione suriettiva  $\epsilon$  che rende commutativo il seguente diagramma:



**Definizione A.2 (Insieme di rappresentanti).** Dato  $X$  un insieme e  $\sim$  relazione di equivalenza su  $X$ , un insieme  $\mathcal{R} \subseteq X$  è un *insieme di rappresentanti* se

$$\pi|_{\mathcal{R}} : \mathcal{R} \subseteq X \rightarrow X/\sim$$

è biettiva.

Questo vuol dire che, per ogni classe di equivalenza, si è scelto un singolo elemento di  $X$  ad essa associato tramite la proiezione al quoziente  $\pi$ .